

TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

## DISSERTATION

### **Oberflächenmodifikation unter Einsatz der Technologie des Schlagverdichtens (Machine Hammer Peenings)**

zum Zwecke der Erlangung  
des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften

ausgeführt am  
E311 - Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik  
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von  
Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

durch  
Dipl.-Ing. Christoph Lechner  
0325200  
Kaiser Franz Josef Straße 50-52, 1230 Wien

Wien, am

Christoph Lechner

## Kurzfassung

Die funktionelle Leistungsfähigkeit eines Bauteils ist im höchsten Maße durch die Eigenschaften seiner Oberfläche sowie der oberflächennahen Randschicht bestimmt. Durch eine zielgerichtete technologische Beeinflussung dieser Eigenschaften im Zuge einer Oberflächenbehandlung kann beispielsweise eine deutliche Optimierung von Verschleiß, Reibung, chemischer Widerstandsfähigkeit sowie statischer und dynamischer Festigkeit erreicht werden. Die Technologie des Schlagverdichtens (Machine Hammer Peenings, MHP) stellt eine derartige Oberflächenbehandlung dar, deren weitreichendes technologisches Potential in Hinblick auf die Steigerung der Oberflächenhärte, die Beeinflussung der Oberflächentopographie sowie die Generierung oberflächennaher Druckeigenspannungen anhand der vorliegenden Arbeit untersucht und dargestellt wird. Mit der Zielsetzung der Erweiterung des Anwendungsgebietes der MHP-Technologie, welches zum gegenwärtigen Zeitpunkt in erster Linie bei der maschinellen Oberflächenglättung von Umformwerkzeugen gesehen werden kann, werden dabei mit dem rost- und säurebeständigen Stahlwerkstoff X3CrNiMo 13-4 (1.4313) sowie dem unlegierten Vergütungsstahl C45E (1.1191) auch Werkstoffe näher betrachtet, deren Einsatzgebiete in einem breiten Feld des Hydro- sowie allgemeinen Maschinenbaus gefunden werden können. Des Weiteren wird anhand der gegenständlichen Arbeit der prozessbedingte Verlauf der Materialmodifikation im Zuge von experimentellen Untersuchungen näher betrachtet, um die dabei abgeleiteten Einflüsse gewisser Stellgrößen auf die effektiv vorliegende Materialumformung für die Optimierung von Bahnführungsstrategien zu nutzen. Mit der mechanischen Einbettung von Beschichtungsstoffen in die Materialoberfläche sowie der Oberflächenstrukturierung unter Einsatz von zweckmäßig formgestalteten MHP-Werkzeugen werden zudem zwei Einsatzmethoden des vorliegenden Prozesses diskutiert, welche durchaus Potential für eine zusätzliche Erweiterung des Anwendungsspektrums der vorliegenden Technologie bieten könnten.

## **Abstract**

The functional performance of a component is heavily influenced by the properties of its surface and the metallurgical and mechanical state of the subsurface layers. Through exerting a targeted technological influence on these properties as part of a surface treatment, a significant optimization of wear, friction and chemical resistance as well as static and dynamic strength can be achieved. The technology of machine hammer peening (MHP) represents such a surface treatment with a far-reaching technological potential in terms of increasing the surface hardness, influencing the surface topography and generating near-surface compressive residual stresses, as investigated and presented in this dissertation. With the objective of extending the application area of the MHP-technology, which at the present time can be seen primarily in the mechanical surface smoothing of forming tools, materials such as the stainless and acid resistant steel material X3 CrNiMo 13 4 (1.4313) and the unalloyed quenched and tempered steel C45E (1.1191), whose areas of application can be found in a wide field of hydro- and mechanical engineering, were considered. Furthermore, this paper considers the process-related material modification in the course of experimental investigations in more detail in order to use the derived influences of certain process parameters on the actual material deformation for the optimization of machining strategies. With the mechanical embedding of coating materials in the near-surface zone of treated parts and the surface structuring using appropriate form designed MHP-tools two methods are discussed, which may well have potential for further extension of the application scope of the technology at hand.

**gewidmet meiner Frau Barbara  
und meinen Eltern Brigitte und Walter**

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Vorwort.....	4
Abkürzungsverzeichnis .....	6
1 Einleitung.....	7
2 Stand der Technik .....	9
2.1 Schlagverdichten (Machine Hammer Peening).....	9
2.2 Einordnung der maschinellen MHP-Oberflächenbehandlung .....	11
2.3 Wirkmechanismen mechanischer Oberflächenverfestigungsverfahren .....	15
2.3.1 Kaltverfestigungsmechanismen.....	15
2.3.2 Beeinflussung des Eigenspannungszustandes .....	18
2.3.3 Kugelförmige Eindringkörper im Kontakt mit Oberflächen .....	19
2.4 Ausgangspunkt der wissenschaftlichen Betrachtung.....	23
2.4.1 Darstellung des aktuellen Kenntnisstandes .....	23
2.4.2 Zusammenfassende Betrachtung.....	32
3 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	34
4 Methoden und Werkstoffe .....	36
4.1 Experimenteller Aufbau.....	36
4.1.1 Schlagverdichtungsaktuator .....	36
4.1.2 Werkzeugmaschinen .....	36
4.2 Prozessparameter.....	37
4.3 Messmethoden und Messmittel .....	40
4.3.1 Oberflächentopographieuntersuchungen.....	40
4.3.2 Ermittlung der Oberflächenrauheitswerte .....	41
4.3.3 Messtechnische Erfassung von Oberflächenhärtewerten.....	41
4.4 Untersuchungswerkstoffe .....	41
4.4.1 Unlegierter Vergütungsstahl C45E (1.1191).....	41
4.4.2 Hochlegierter Kaltarbeitsstahl X155CrVMo 12-1 (1.2379).....	42
4.4.3 Rost- und säurebeständiger Stahl X3 CrNiMo 13-4 (1.4313) .....	42
4.4.4 Aluminiumlegierung AlMgSi 0,5 (AA6060; 3.3206).....	43
5 Wirkungsweise des Modifikationsprozesses .....	44
5.1 Parametereinfluss auf die plastische Deformation.....	45
5.1.1 Auswirkung der Schlagdistanz.....	45
5.1.2 Untersuchungen an unterschiedlichen Werkstoffen .....	47

5.2 Superposition von Einschlägen infolge einer Bearbeitungsbahn .....	54
5.3 Materialverteilung bei Flächenbearbeitung .....	62
5.4 Untersuchung der Beeinflussung des Werkstoffgefüges .....	70
5.5 Optimierung der Bearbeitungsstrategie .....	75
6 Experimentelle Untersuchung der technologischen Potentiale.....	85
6.1 Beeinflussung der Oberflächenhärte.....	86
6.1.1 Auswirkung der plastischen Verformung auf den Oberflächenhärtewert ...	86
6.1.2 Einfluss von Mehrfachbearbeitung .....	91
6.2 Beeinflussung der Oberflächentopographie.....	93
6.2.1 Prozessparametereinfluss auf die Oberflächenglättung .....	93
6.2.2 Einfluss der Vorbearbeitung .....	101
6.2.3 Einfluss der Einzelschlaganordnung.....	108
6.2.4 Einfluss des Schlagwinkels.....	118
6.3 Einbringung von Druckeigenstressungen .....	124
6.3.1 Einfluss von Vorschubrichtung und Mehrfachbearbeitung.....	124
6.3.2 Vergleich zu materialabtragenden Prozessen .....	128
6.4 Verfahrensvergleich nach Almen .....	133
6.5 Zusammenfassung der technologischen Potentiale.....	141
7 Untersuchungen zu erweiterten Anwendungsmöglichkeiten .....	143
7.1 Funktionelle Oberflächenstrukturierung .....	143
7.1.1 Motivation und Untersuchungsansatz.....	143
7.1.2 Untersuchung der funktionellen Eignung .....	144
7.1.3 Erzeugung von Mikrostrukturierungen.....	149
7.1.4 Erzeugung zusammenhängender Strukturen .....	153
7.1.5 Strukturierung unebener Oberflächen.....	159
7.1.6 MHP-Strukturierung großflächiger Bereiche .....	162
7.2 Einbetten von Beschichtungsmaterialien .....	170
7.2.1 Motivation und Untersuchungsansatz.....	170
7.2.2 Untersuchung der funktionellen Eignung .....	171
7.2.3 Experimentelle Untersuchung zur Einbettung von Hartstoffen .....	174
7.2.4 Einbettung von Hartstoffen in hochlegiertem Kaltarbeitsstahl.....	179
7.2.5 Einbetten von Schmiermittel .....	183
7.3 Diskussion der Untersuchungsergebnisse.....	185
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	187
Abbildungsverzeichnis.....	189

Tabellenverzeichnis.....	195
Literaturverzeichnis .....	198
Anhang A – Erhobene Oberflächenrauheitswerte .....	I
Anhang B – Erhobene Topographiemesswerte.....	XI
Lebenslauf.....	XVII

## Vorwort

Die gegenständliche Arbeit entstand im Zuge der Betreuung des Arbeitspaketes 2 des Mehrfirmenprojektes (MFP) 3.6 „*Tribological effects of structured and densified surfaces*“ durch den Autor.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, wurde im Zuge dieses Projektes die Technologie des Machine Hammer Peenings (Schlagverdichtens) durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von vier wissenschaftlichen Partnern (s.u.) umfassend beleuchtet.

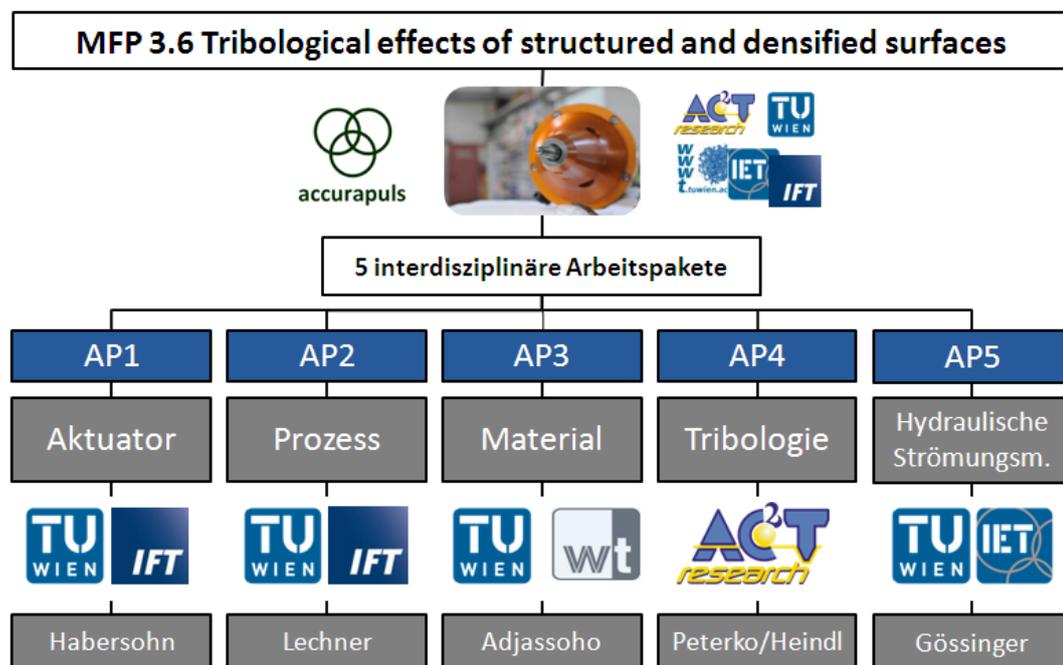


Abbildung 1: Projektstruktur MFP 3.6 "Tribological effects of structured and densified surfaces"

Ausgehend von der Betrachtung des Aktuator systems durch Herrn DI Christoph Habersohn (IFT) wurde dabei neben dem Prozess der Oberflächenmodifikation dessen Auswirkung auf den behandelten Werkstoff durch Frau DI Beatrix Adjassoho (WWWT) untersucht.

Zudem wurden zunächst durch Herrn Philip Peterko, M.Sc. und später durch Herrn DI Franz Heindl die tribologischen Eigenschaften MHP-behandelter Oberflächen am Kompetenzzentrum für Tribologie (AC<sup>2</sup>T) beleuchtet.

Im Zuge von Arbeitspaket 5 fand desweiteren die Analyse potentieller Anwendungsmöglichkeiten mit speziellem Fokus auf das Gebiet hydraulischer Strömungsmaschinen durch Herrn DI Stefan Gössinger (IET) ihre Betrachtung.

Die Forschungsergebnisse des dargestellten Projektes wurden aus dem österreichischen COMET-Programm im Rahmen des Förderprojekts XTribology Nr. 824187 gefördert und sind wie oben ausgeführt am Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik (IFT; TU-Wien) in Zusammenarbeit mit dem Exzellenzzentrum für Tribologie (AC<sup>2</sup>T research GmbH.; Wr. Neustadt), dem Institut für Energietechnik und Thermodynamik (IET; TU-Wien) und dem Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie (WWWT; TU-Wien) entstanden.

## Abkürzungsverzeichnis

---

Abkürzung	Bedeutung
-----------	-----------

---

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCD	Charged Coupled Device – Sensoren-Technologie für Kamerasysteme
DMS	Dehnungsmessstreifen
DIN	Deutsche Industrienorm
ECM	Electrochemical Machining – Elektrochemisches Erodieren
EDM	Electric Discharge Machining – Funkenerosives Abtragen
FEM	Finite Element Methode – Numerisches Lösungsverfahren
HRC	Härte nach Rockwell bestimmt mit Diamantkegel als Eindringkörper
HV	Härte nach Vickers
IFM	InfiniteFocus Microscope – 3D-Oberflächenmesssystem
KWL	Konstruktion und Werkzeugbau Löcker
MHP	Machine Hammer Peening – Schlagverdichten
PAO	Polyalphaolefine – Gruppe der synthetischen Kohlenwasserstoffe
REM	Rasterelektronenmikroskop
SRV	Schwing-Reib-Verschleiß
TIV	Through Indenter Viewing – Härteprüfverfahren
UCI	Ultrasonic Contact Impedance – Härteprüfverfahren

## 1 Einleitung

Die Bearbeitung metallischer Werkstoffe durch gezielte, aneinandergereihte Hammerschläge diente schon in frühester Zeit der Steigerung der Oberflächenqualität von Werkzeugen. Ein Beispiel dafür kann anhand des Dengelns von Sensen und Sichel gegeben werden, im Zuge dessen die dünnen und scharfen Schneiden von Mähwerkzeugen mittels Hammer und Amboss seit dem Altertum verfestigt wurden (vgl. [1]). Neben dem Wiederherstellen der Schärfe und der Möglichkeit der Reparatur von kleinen Ausbruchstellen, wurde dabei auch schon früh die positive Auswirkung auf die Standzeit der Werkzeuge erkannt.

Im Zuge der modernen Produktion von technischen Komponenten werden auch heute Oberflächenverfestigungsverfahren eingesetzt, um durch eine Bearbeitung der Werkstückoberfläche eine Verschleißreduktion der Bauteile zu erzielen. Basierend auf der Tatsache, dass das Verhalten eines Bauteils neben dem zugrundeliegenden Werkstoff und dessen Gestalt im wesentlichen Maße durch dessen Oberfläche und der Eigenschaften der oberflächennahen Randzone (surface integrity) bestimmt wird, nimmt die gezielte Beeinflussung dieser Eigenschaften eine Schlüsselfunktion in der modernen Produktionstechnik ein.

So stellen Jawahir et al. fest: „*The constant need for improved surface integrity and enhanced functional performance of manufactured components has long acted as a driving force in the development of new production methods and high performance manufacturing technologies*” [2].

Die Technologie des Schlagverdichtens, für welche im deutschsprachigen Raum auch der Begriff des Oberflächenhämmerns oder Festklopfens weite Verbreitung findet, in englischsprachiger Literatur jedoch weitgehend einheitlich der Begriff des Machine Hammer Peenings (MHP) genutzt wird, stellt eine unter diesem Sachverhalt zu sehende, neuartige und innovative Technologie dar.

Neben der Entwicklung neuer Oberflächenbehandlungen findet sich ein wesentliches Kriterium für deren optimale Nutzung in der zielgerichteten und umfassenden Erforschung der zugrundeliegenden Prozessarbeitsweise. So kann erst durch das Verständnis des Verlaufs der Oberflächenmodifikation die Grundlage für eine zielgerichtete Prozessoptimierung geschaffen werden, auf deren Basis das technologische Potential für spezifische Anwendungsfälle zur Gänze ausgeschöpft werden kann. Aus diesem Grund soll im Zuge der vorliegenden Arbeit versucht werden, einen Beitrag zur Schaffung eines derartigen Prozessverständnisses für die betrachtete Technologie zu leisten.

Darüber hinaus wird versucht, die Anwendungsmöglichkeiten des vorliegenden Verfahrens über das derzeitige bekannte Maß hinaus zu erweitern. Die vorgeschlagenen und im Zuge dieser Arbeit diskutierten Methoden sollen dazu beitragen, Möglichkeiten der technischen Funktionalisierung von Oberflächen bereitzustellen, um auf Basis eines automatisierten, leicht in eine bestehende Fertigungskette integrierbaren Prozesses die funktionelle Leistungsfähigkeit erzeugter Komponenten unter wirtschaftlich vertretbaren Kriterien zu optimieren.

## 2 Stand der Technik

Im Zuge dieses Kapitels werden zunächst die Technologie des Schlagverdichtens sowie deren spezifische Merkmale dargestellt, um in weiterer Folge die betrachtete Technologie in derzeit angewendete Verfahren der Oberflächenbearbeitung einzuordnen. Zudem werden die Wirkmechanismen derartiger Behandlungen besprochen und anhand einer Analyse des aktuellen Forschungsstandes in Bezug auf die betrachtete Technologie, die Anknüpfungspunkte der vorliegenden Arbeit an den Stand der Technik gegeben.

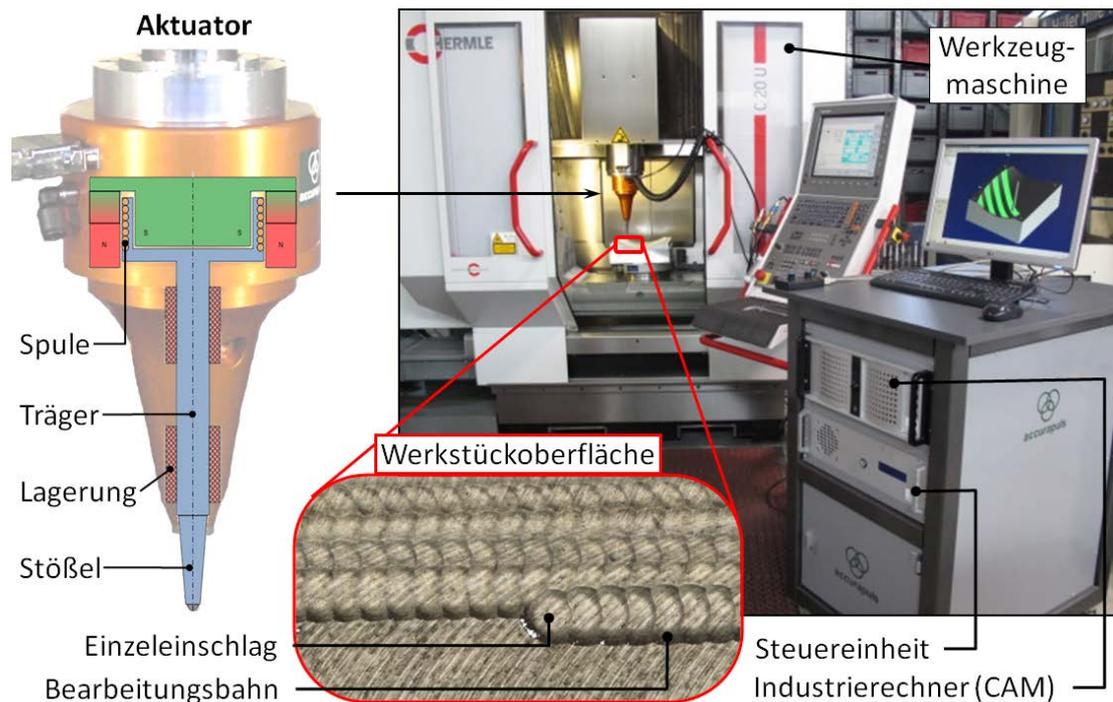
### 2.1 Schlagverdichten (Machine Hammer Peening)

Das deutsche Unternehmen KWL (Konstruktion und Werkzeugbau Löcker) startete 1996, ein Jahr nach dessen Gründung, mit der Entwicklung eines Systems zur Ersetzung des manuellen Polierprozesses von Werkzeugoberflächen (vgl. [3]).

Dieses gegenwärtig unter dem Namen accurapuls-Klopfsystem am Markt erhältliche Aktuatorssystem basiert auf einem elektromagnetischen Prinzip, welches einen Stößel mit Hartmetallkugelspitze (Schlagkopf) in Schwingungen mit definierter Schlagfrequenz, Schlagamplitude und Nulldurchgang versetzt. Der Schlagkopf ist dabei an einem Träger befestigt, welcher einen ferromagnetischen Teil besitzt. Ein Magnetfeld hält den Träger zunächst in einer definierten Ruhelage. Mittels eines, über ein externes Steuergerät geregelten Stromflusses durch eine mit dem Träger verbundenen Spule (siehe Abbildung 2) wird nun eine oszillierende Bewegung des seitlich durch Radiallager geführten Trägers und damit des Stößelwerkzeuges erzeugt (vgl. [4]).

Im Zuge der Anwendung der Technologie wird der Aktuator an einer Werkzeugmaschine beziehungsweise einem Roboter gespannt und das Bauteil durch eine Vielzahl einzelner, präzise aneinandergereihter Schläge der im Allgemeinen kugelförmigen Werkzeugspitze bearbeitet. Eine Bearbeitung kann dabei mehrachsig NC-geführt auch auf unebenen, komplexen Bauteiloberflächen durchgeführt werden, wobei eine Behandlung direkt in der Aufspannung einer eventuell vorangegangenen, formgebenden Fräsbearbeitung des Werkstücks erfolgen kann. Abbildung 2 illustriert die Wirkungsweise der Technologie anhand der Topographiemessung einer MHP-bearbeiteten AlMgSi 0,5 (3.3206) Werkstückoberfläche (Vorschub und Bahnversatz wurden für die bessere Darstellung der Einzeleinschläge bewusst hoch gewählt).

Zum Zweck der Bahngenerierung für die schlagverdichtungstechnische Bearbeitung stellt die Firma accurapuls zudem ein eigens entwickeltes CAM-System zur Verfügung. Ausgehend von der Werkstückgeometrie, welche als CAD-Datensatz importiert wird, können hierbei die Bearbeitungsbahnen in Verbindung mit speziellen Bearbeitungsstrategien erzeugt werden.



*Abbildung 2: Prozess des Schlagverdichtens mittels eines elektromagnetischen Aktuator systems der Firma accurapuls implementiert auf einem 5-achsigen Bearbeitungszentrum Hermle C20U (vgl. [5])*

Neben dem auch im Zuge dieser Arbeit angewendeten, elektromagnetischen Aktuator system sind seit 2012 auch pneumatische Aktuatoren für die klopftechnische Bearbeitung von Oberflächen auf dem Markt erhältlich (z.B.: Modell *FORGEfix* der Firma 3S-Engineering). Eine derartige im Center Betriebsmittel des Mercedes-Benz Werks Sindelfingen durch die Firma DAIMLER entwickelte pneumatische Kaltschmiedevorrichtung ist beispielsweise in [6] beschrieben. Das eigentliche Werkzeug, bestehend aus einem Pneumatikhammer mit Schlagkopf ist hierbei in einem Hohlkolbenelement angeordnet, welches verschiebbar in einem Gehäuse gelagert ist. Durch die Beaufschlagung des Hohlkolbens mit Druckluft wird nun das Gesamtsystem vorgespannt, wodurch im Gegensatz zum elektromagnetischen Verfahren die durch den Schlagkopf ausgeführten Hübe unter Vorspannung zur Materialoberfläche erfolgen.

Auch die Möglichkeit des Einsatzes eines piezoelektrischen Aktuator systems für die Oberflächenbehandlung von Bauteilen ist bekannt und wird in der Offenlegungsschrift [7] aus dem Jahr 2010 dargestellt. Das Problem des mit dieser Antriebsart verbundenen geringen Hub-zu-Baugrößen-Verhältnisses von etwa 1/1000 wird dabei durch die operative Koppelung eines Piezostapel-Elements mit einem Feder-Masse-System überwunden. Das Schlagwerkzeug wird durch die Federkraft gegen die Oberfläche vorgespannt. Durch das Anlegen einer Wechsellspannung wird eine periodische Ausdehnung der Piezoelemente erreicht,

welche durch eine zusätzliche Federbe- und entlastung zu einer oszillierenden Bewegung des Werkzeuges und damit, in Abhängigkeit der Vorspannung, zu einer zyklischen Änderung der Bearbeitungskraft führt. Trotz gewisser Vorteile eines piezoelektrischen Antriebssystems, wie geringer Verschleißanfälligkeit oder geringer Wärmeentwicklung im Betrieb, sind zum gegenwertigen Zeitpunkt keine marktreifen Ausführungen dieses Aktuators bekannt.

## 2.2 Einordnung der maschinellen MHP-Oberflächenbehandlung

In der industriellen Praxis kommen verschiedenartige mechanische Oberflächenbehandlungen zum Einsatz, welche das Ziel haben, die Beanspruchbarkeit, die Lebensdauer und/oder die Sicherheit gegen Versagen der behandelten Bauteile zu erhöhen (vgl. [8] S.3).

Das bekannteste Verfahren ist hierbei das Kugelstrahlen, im Zuge dessen meist kugelförmiges Strahlgut mittels Druckluft beziehungsweise über Zentrifugen beschleunigt und in Richtung der zu behandelnden Oberfläche gelenkt wird. Das Auftreffen der einzelnen Strahlmittel führt in weiterer Folge durch die Umsetzung deren kinetischer Energie zur plastischen Deformation der Oberfläche. Schulze (vgl. [9] S.10) unterscheidet nach dem jeweiligen Hauptfokus der Bearbeitung unter anderem nach:

- **Shot Peening (Verfestigungsstrahlen)** mit runden Strahlmedien aus Stahl, Industriekeramik oder Glas und dem primären Zweck der Druckeigenspannungseinbringung.
- **Blast Cleaning (Reinigungsstrahlen)** zum Abtragen von Fremdstoffen oder Beschichtungen mit kantigen Partikeln aus Hartguß, Korund, Stahl, Glas, Quarzsand oder Polymer-Granulat.
- **Finish Peening (Oberflächenveredelungsstrahlen)** zur Generierung einer gleichmäßigen, möglichst glatten Oberfläche mit runden oder kantigen Partikeln aus unterschiedlichen Materialien.

Da Kugelstrahlen ein vergleichsweise kostengünstiges Verfahren darstellt und sich des Weiteren durch robuste Prozesskomponenten sowie durch eine weitgehend Bauteilgrößen und -geometrie unabhängige, flexible Einsetzbarkeit auszeichnet, findet es seit Jahrzehnten weitverbreitet Anwendung (vgl. [10]).

Neben dem Kugelstrahlen kommen im Zuge von Oberflächenwalzverfahren meist mehrere, gehärtete und feinst bearbeitete Wälzkörper (Walzen oder Kugeln) unter einer werkstoffabhängigen Walzkraft zum Einsatz, um die Oberfläche von zumeist spanend bearbeiteten Werkstücken abschließend zu modifizieren (vgl. [11] S.310).

In der Fertigungstechnik werden auch diese Verfahren, ähnlich dem Kugelstrahlen, nach dem jeweiligen Hauptziel der Bearbeitung weiter unterschieden in (vgl. [9] S.16-17; [11] S.311ff):

- **Finish rolling (Glattwalzen)** zur Erzeugung von Oberflächen mit geringen Rautiefen und hohem Profiltraganteil ohne maßgebliche Formänderung der Werkstückgeometrie. Als Folge der Bearbeitung sollen hier die Gleit-, Verschleiß- und Korrosionseigenschaften von Bauteilen optimiert werden.
- **Size rolling (Maßwalzen)** wird angewendet, um durch eine gezielte Formänderung von weichen Bauteilen eines geringen Durchmessers (kleiner 20mm) eine Toleranzqualitätserhöhung sowie Rundheitsfehlerminimierung zu erreichen.
- **Deep rolling (Festwalzen)** verfolgt durch die Einbringung von Druckeigenspannungen, Kaltverfestigung und die Beseitigung von Mikrokerben eine Dauerfestigkeitserhöhung der bearbeiteten Bauteile (vgl. [11] S.310).

Die Technologien, insbesondere das Festwalzen, werden heute typischerweise für die Bearbeitung von Naben und Achsschenkeln, abgesetzten Wellen und Kurbelwellen eingesetzt. Neben Einzweck- und Sondermaschinen, welche beispielsweise für das Festwalzen von Kurbelwellen genutzt werden, sind auch diverse Sonderwerkzeuge für das Oberflächenfeinwalzen erhältlich. Diese können durch eine meist geringe Baugröße auch einfach in herkömmliche Werkzeugmaschinen integriert werden (vgl. [11] S.316ff).

Die Werkzeuge lassen sich dabei nach dem System der Zustellung in formschlüssige (Bearbeitung auf eingestellte Bearbeitungsdurchmesser ohne Änderung des Werkzeugdurchmessers), kraftschlüssige (Werkzeug gegen die Oberfläche vorgespannt) und expandierende Werkzeuge (Änderung des Arbeitsdurchmessers während der Bearbeitung möglich) unterscheiden (vgl. [11] S.317).

Obgleich als Trägersystem im Zuge dieses Verfahrens in erster Linie Drehmaschinen genutzt werden, kommen im zunehmendem Maße auch Fräszentren zum Einsatz, um geometrisch komplexe Bauteile einer Festwalzbearbeitung zu unterziehen. Diese kann beispielsweise, wie in Abbildung 3b dargestellt, in mäanderförmigen Bahnen durch ein kugelförmiges Walzelement erfolgen, welches während der Bearbeitung durch hydraulische Druckbeaufschlagung frei drehbar in einer Kugelpfanne gelagert ist (vgl. [27]).

Die Oberflächenmodifikation im Zuge dieses Prozesses ist damit durch die genaue Führung des Werkzeugs bestimmt und unter Kenntnis der Prozessparameter deterministisch beschreibbar.

Im Gegensatz dazu können im Falle des Kugelstrahlens die genauen Verhältnisse in der Wechselwirkungszone zwischen Werkzeug (einzelnes Strahlmittel) und Werkstückoberfläche (Auftreffpositionen, -winkel, -geschwindigkeit) nur bedingt beziehungsweise nicht vorgegeben werden. Aus diesem Grund wird das Kugelstrahlen in weiterer Folge den stochastischen Verfahren zugeordnet und damit gegenüber deterministischen Walzverfahren abgegrenzt.

Beide Prozesse (Verfahren) basieren jedoch einheitlich auf einer plastischen Verformung der zu bearbeiteten Oberfläche, welche sich als direktes Resultat des Werkzeugeingriffs (Strahlmittel, Kugel) ergibt. Daher werden beide Verfahren an dieser Stelle als direkte Verfahren klassifiziert.

Diesen werden indirekt wirkende Verfahren (Prozesse) gegenübergestellt, bei welchen der „Werkzeugeingriff“ (Laser-, Wasserstrahl) in erster Linie auf die Generierung einer Druckwelle ausgerichtet ist. Die eigentliche Werkstückmaterialmodifikation erfolgt somit nicht in direkter Weise durch das Werkzeug selbst sondern in indirekter Form über die hiermit herbeigeführte Druckwelle. Als Vertreter derartiger Technologien kann unter anderem das anhand von Abbildung 3a dargestellte Verfahren der Lasershockverfestigung (Laser-shock-processing) angeführt werden. Die Oberflächenbearbeitung basiert hier auf einer durch fokussierte Laserpulse mit Pulsdauer im Nanosekundenbereich herbeigeführten, lokal beschränkten Materialsublimation (vgl. [8] S.14; [9] S.19).

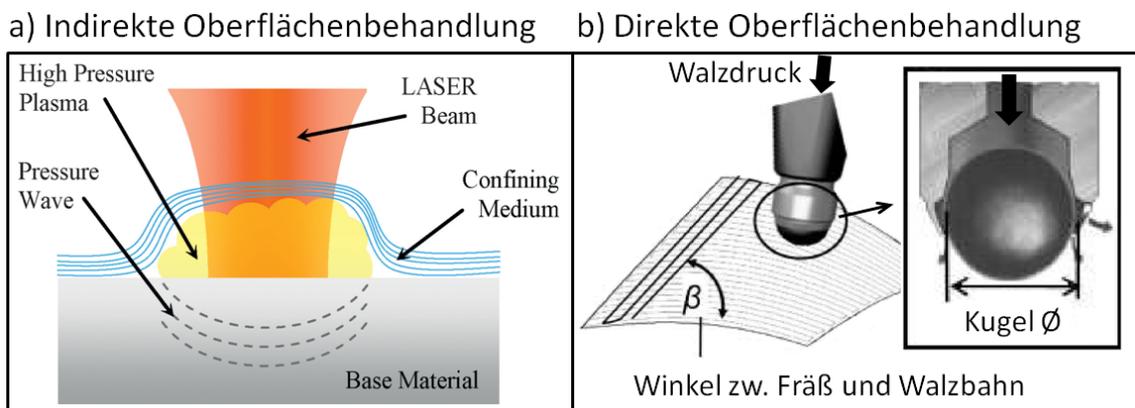


Abbildung 3: Vergleich direkter und indirekter Verfahren: a) Wirkungsweise indirekter Verfahren am Beispiel der Lasershockverfestigung [12] b) Darstellung der direkten Oberflächenbehandlung des Festwalzens (vgl. [29])

An der Oberfläche des Werkstücks bildet sich letztlich ein Plasma hoher Temperatur aus, welches durch seine rasche Ausdehnung eine Druckwelle erzeugt die sich in das Material ausbreitet (vgl. [8] S.14). Auf diese Weise kommt es im Zuge des Verfahrens zur Verfestigung des Werkstoffes sowie zur Einbringung von Druckeigenspannungen. Das hauptsächliche Anwendungsfeld der Technologie kann zurzeit in der Luftfahrtindustrie bei der Behandlung von Turbinenschaufeln gefunden werden (vgl. [9] S.20).

In Bezug auf die im Zuge dieses Kapitels vorgenommene Klassifizierung der vorgestellten Oberflächenbehandlungsverfahren kann die Technologie des Schlagverdichtens als direkter, deterministischer Prozess bezeichnet werden. Diese Klassifizierung basiert auf der Tatsache, dass ob der genauen NC-Führung des Schlagwerkzeugs die Position der einzelnen Werkzeugeinschläge über die Vorgabe der Prozessparameter deterministisch vorgegeben werden kann. Zudem führt eben dieser Werkzeugeingriff in direkter Weise zur Materialmodifikation durch plastische Deformation der Werkstückoberfläche. Wie in Abbildung 4 gezeigt, wird die MHP-Technologie damit, ungeachtet der Wirkungsweise des zugrundegelegten Aktuator systems, neben dem Festwalzen (in der Abbildung als Roller burnishing bezeichnet) in dieselbe Klasse eingeordnet. Der hier vorgeschlagenen Klassifizierung folgend, wird sie dadurch zu indirekt wirkenden Verfahren (Laser-shock-processing, Water-cavitation-peening) abgegrenzt und ist ob des deterministisch vorhersagbaren Prozessverlaufs auch gegenüber der gängigen Oberflächenbehandlung des Kugelstrahlens (Shot peening) zu unterscheiden.

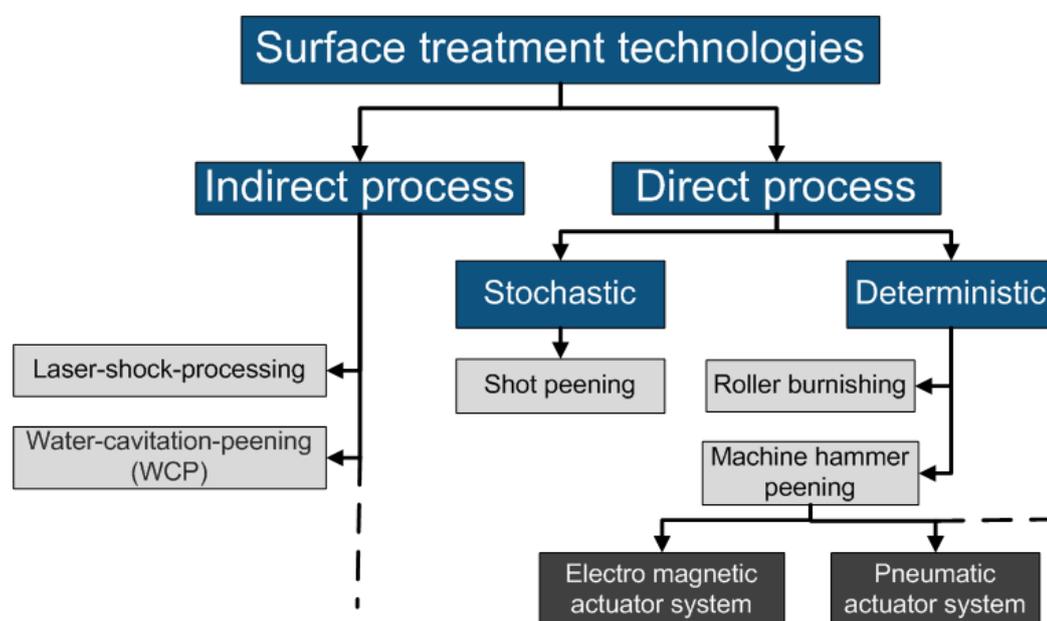


Abbildung 4: Einordnung der Technologie des Schlagverdichtens (Machine Hammer Peening) in gängige Verfahren der mechanischen Oberflächenbehandlung (vgl. [13])

## 2.3 Wirkmechanismen mechanischer Oberflächenverfestigungsverfahren

### 2.3.1 Kaltverfestigungsmechanismen

Metallische Festkörper verfügen im festen Aggregatzustand über einen kristallinen Aufbau. Die den Körper bildenden Atome befinden sich dabei in einer regelmäßigen, räumlichen Anordnung zueinander (vgl. [14] S.1).

Zur Darstellung des atomaren Aufbaus wird das Atomgitter verwendet. Den kleinsten Abschnitt eines Atomgitters stellt eine Gitterzelle dar, die durch die Gitterkonstanten (z.B.: die mit  $a$ ,  $b$  und  $c$  bezeichneten Atomabstände) gekennzeichnet ist. Die mit Atomen belegten, ebenen Schnittflächen des Gitters werden mit dem Begriff Gitterebene oder Netzebene bezeichnet (siehe Abbildung 5, Mitte) (vgl. [14] S.2).

Nach der Form der Gitterzellen unterscheidet man sieben verschiedene Kristallsysteme, von denen das kubische (in den Abwandlungen des Grundgittertyps, kubisch-raumzentriert und kubisch-flächenzentriert), das tetragonale und das hexagonale System (beispielsweise in Form des hexagonalen Gitters dichtester Kugelpackung) für metallische Werkstoffe am wichtigsten sind (vgl. [14] S.3).

Reale Werkstoffe weisen jedoch niemals einen idealen, regelmäßigen Gitteraufbau auf. Neben punktförmigen Gitterbaufehlern wie Leerstellen, Zwischengitteratomen oder Fremdatomen spielen hierbei linienförmige Gitterfehler eine wesentliche Rolle. Diese Baufehler werden als Versetzungen bezeichnet und in Stufenversetzungen und Schraubenversetzungen unterschieden (siehe Abbildung 5) (vgl. [14] S.5-6). Wie anhand der Abbildung illustriert, sind im Falle einer Schraubenversetzung die Gitterebenen im Bereich der senkrecht zu ihnen stehenden Versetzungslinie wendelförmig verzerrt.

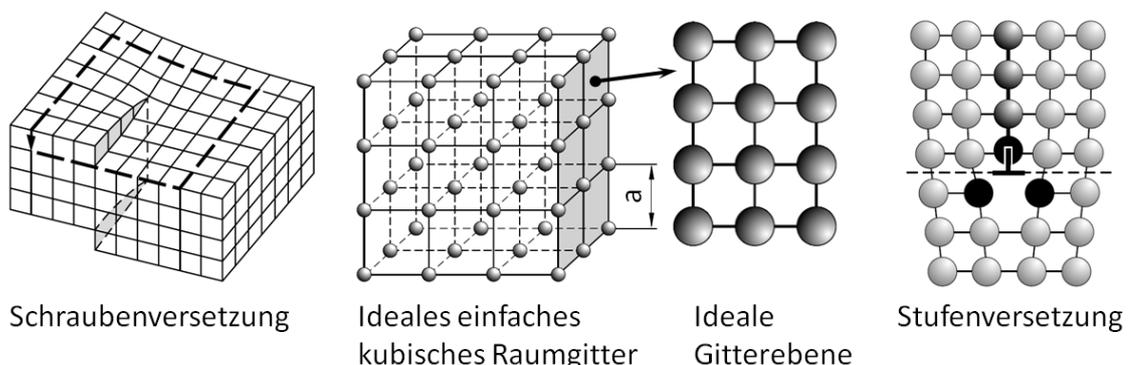


Abbildung 5: Ideales einfaches kubisches Raumgitter ohne Versetzungen (Mitte), Schraubenversetzung (links) und Stufenversetzung (rechts) (vgl. [14] S.2, 6)

Eine Stufenversetzung tritt dann auf, wenn eine Gitterebene direkt im Kristall endet (vgl. [14] S.6).

Derartige Gitterbaufehler sind, wie anhand der Illustration der Stufenversetzung in Abbildung 5 leicht nachvollzogen werden kann, auch immer mit weitreichenden Spannungsfeldern verbunden. Oberhalb der Stufenversetzung kommt es dabei zu Druckspannungen, wobei unterhalb Zugspannungen durch die Fehlstelle resultieren. Auf diese Weise kommt es über deren Spannungsfelder zur gegenseitigen Beeinflussung von Versetzungen, wie beispielsweise einer Aneinanderreihung gleichartiger Stufenversetzungen. Die dadurch entstehende zweidimensionale Fehlstelle wird mit dem Begriff Kleinwinkelkorngrenze bezeichnet, da Gitterebenen, die diese flächenmäßige Störung schneiden, lediglich um einen geringen Winkel abgelenkt werden und im Übrigen weitgehend ungestört bleiben.

Im Gegensatz dazu bildet sich an einer (Großwinkel-)Korngrenze, die im Zuge des Kristallwachstums bei der Erstarrung aus der Schmelze beziehungsweise bei Rekristallisation des Werkstoffs durch das Aufeinandertreffen einzelner Kristalle entsteht, eine deutliche Grenzfläche aus. Die Gitterebenen der beiden Kristalle beschreiben hier meist größere Winkel zueinander, wobei der Übergangsbereich durch eine strukturlose (amorphe) Zone einer Dicke von etwa zwei bis drei Atomabständen gekennzeichnet ist (siehe Abbildung 6) (vgl. [14] S.8).

Wird ein Werkstoff plastisch verformt, führt dies zu Versetzungsbewegungen (siehe Abbildung 6b).

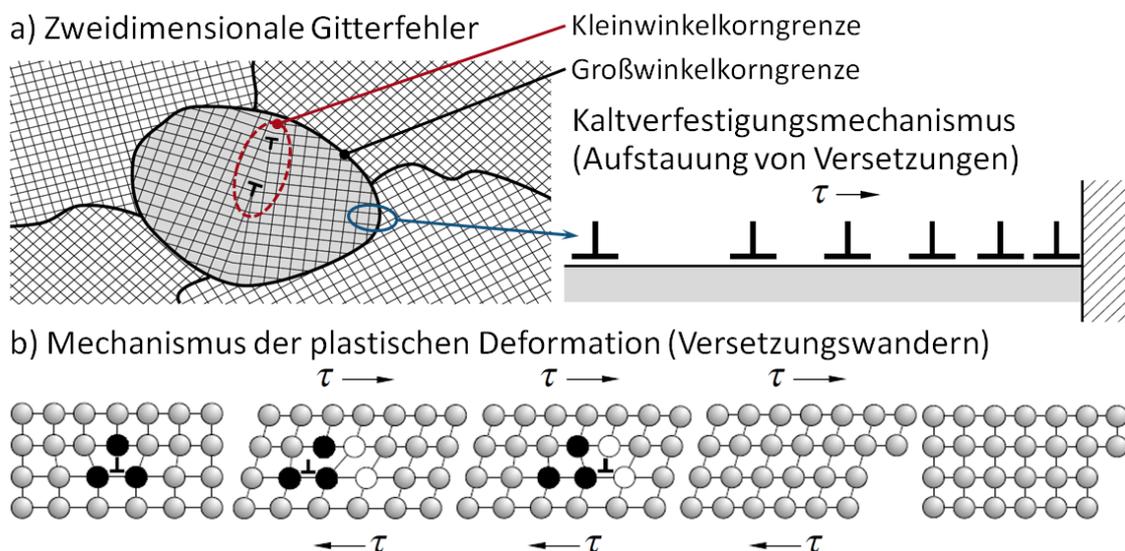


Abbildung 6: Plastische Deformation und Verfestigung: a) Mechanismus von Kaltverfestigung (vgl. [14] S.8, 16) b) Mechanismus der plastischen Deformation (vgl. [14] S.14)

Dabei kommt es zu einer fortlaufenden, geringfügigen Verlagerung von Atomen aufgrund einer Verzerrung des Gitters durch die Einwirkung von Schubspannungen  $\tau$ .

Diese Versetzungswanderung setzt sich bei dauerhaft anliegender Spannung so lange fort, bis die Versetzung, wie in Abbildung 6 dargestellt, die freie Oberfläche des Kristalls erreicht oder bis sie auf ein Hindernis stößt (vgl. [14] S.14). Derartige Hindernisse stellen in erster Linie Korngrenzen (Großwinkelkorngrenzen) dar, wo es aufgrund der unterschiedlichen Gitterorientierung des Nachbarkorns einer erhöhten Energie bedarf, um die Versetzungswanderung im angrenzenden Korn fortzusetzen. Die Versetzung wird daher vor der Korngrenze aufgehalten, wobei es durch abstoßende Kräfte, die diese Versetzung auf nachfolgende Versetzungen ausübt, zu einem Aufstauen von Versetzungen kommt (vgl. [14] S.17).

Im Zuge des Verformungsvorganges entstehen zudem neue Versetzungen und die Versetzungsdichte des Werkstoffs, welche als Versetzungslinienlänge pro Volumeneinheit angegeben wird, steigt signifikant an. Dies führt durch die gegenseitige Beeinflussung der Versetzungen dazu, dass für eine weitere Bewegung und Erzeugung von Versetzungen zunehmend eine höhere Spannung bereitgestellt werden muss. Der Werkstoff verfestigt (vgl. [14] S.17).

Es ist dabei anzumerken, dass die beschriebenen Mechanismen voraussetzen, dass die Temperatur des Werkstoffs unterhalb der Rekristallisationstemperatur liegt, wodurch man hier auch von Kaltverformung und Kaltverfestigung spricht. Im Falle einer höheren Temperatur geht hingegen durch Kornneubildung (Rekristallisation) die Zahl der energiereichen Versetzungen auf den Wert des nicht verformten Werkstoffs zurück (vgl. [14] S.29). Die Rekristallisationstemperatur eines Werkstoffs stellt dabei keinen festen Werkstoffwert dar und wird durch verschiedene Faktoren wie Verformungsgrad, Korngröße des verformten Gefüges oder Legierungselemente beeinflusst. Die untere Rekristallisationsschwelle kann jedoch in etwa mit 40% der absoluten Schmelztemperatur angenommen werden und liegt daher für Stahlmaterialien bei etwa 400°C (vgl. [14] S.31).

Da im Zuge der meisten Oberflächenbehandlungsverfahren ein derartiger Temperaturbereich im Zuge des Prozesses nicht erreicht wird, stellen die beschriebenen Mechanismen eine wesentliche Grundlage dieser Verfahren dar. Letztlich sind auch im Zuge der mechanischen Oberflächenbehandlung des Schlagverdichtens in Folge der systematischen, plastischen Verformung des Materials in der Wechselwirkungszone zwischen Werkstückoberfläche und Stößelspitze Kaltverfestigungsmechanismen zu erwarten.

### 2.3.2 Beeinflussung des Eigenspannungszustandes

Unter dem Begriff Eigenspannungen werden mechanische Spannungen in einem Material verstanden, welche im Gegensatz zu Lastspannungen frei von äußeren auf das Bauteil einwirkenden Kräften und Temperaturgradienten auftreten (vgl. [15] S.322).

Nach der Abmessungsskala der Betrachtung unterscheidet man derartige Spannungen in vielkristallinen Werkstoffen in:

- **Eigenspannungen I. Art (Makro eigenspannungen)**, die in einem Volumen auftreten, welches durch ausreichend viele Kristallite (Körner) aller vorhandenen Werkstoffphasen als repräsentativ für den betrachteten Werkstoff gesehen werden kann.
- **Eigenspannungen II. Art**, definiert als die Differenz der mittleren Spannung eines Kristallits (Korns) zur Eigenspannung I. Art.
- **Eigenspannungen III. Art**, bezeichnen die ortsabhängigen Abweichungen der Spannungen innerhalb eines Kristalliten von der Summe aus Eigenspannungen I. und II. Art.

Dabei werden sowohl Eigenspannungen II. als auch III. Art als Mikro eigenspannungen bezeichnet. Diese beziehen sich, der obigen Definition folgend, auf einen Kristalliten (ein Korn) und sind damit im Gegensatz zu Eigenspannungen I. Art nicht repräsentativ für das gesamte Material (vgl. [15] S.326).

Bei den meisten mechanischen Bearbeitungen, aber insbesondere im Zuge von mechanischen Oberflächenverfestigungsverfahren, werden durch eine räumlich inhomogene, plastische Verformung des Materials makroskopische Eigenspannungen verursacht. Zudem führt die mechanische Belastung des Werkstoffes in Verbindung mit der elastischen und plastischen Anisotropie der Kristalle sowie der Unterschiede in den elastischen und plastischen Eigenschaften der Phasen auch zur Bildung von Mikro eigenspannungen zwischen den Gefügebestandteilen (vgl. [15] S.329).

Die Verfahren der Oberflächenverfestigung zielen dabei in erster Linie auf die Erzeugung von Druckeigenspannungen in den oberflächennahen Randzonen eines Bauteils ab. Dies hat den Grund, dass eine Werkstoffschädigung beispielsweise durch Rissbildung in erster Linie in diesen Zonen ihren Ursprung nimmt. Da für die Entstehung eines Risses kritische Zugspannungswerte überschritten werden

müssen, behindert das Vorliegen von Druckeigenspannungen die Risseinleitung und später deren Ausbreitung. So müssen zunächst die vorliegenden Druckspannungen überwunden werden, bis es zur Ausbildung eines Zugspannungsbereiches kommt. Kritische Zugspannungswerte liegen damit erst für deutlich höhere, äußere Belastungen des Bauteiles vor (vgl. [14] S.95).

Auch eine positive Auswirkung von oberflächennahen Druckeigenspannungen auf die Dauerfestigkeit dynamisch beanspruchter Bauteile ist vielfach in der Literatur dokumentiert. Dabei überlagern die Druckeigenspannungen in der Werkstückrandzone die Belastungsspannungen, wobei die Werkstoffbeanspruchung im Zugbereich vermindert wird. Auf diese Weise bewirkt die Einbringung von Druckeigenspannungen infolge einer Oberflächenverfestigungsbehandlung neben weiteren zumeist mit dieser verbundenen Faktoren, wie der Reduzierung von Mikrokerben und der Kaltverfestigung der Werkstückrandzone, eine wesentliche Dauerfestigkeitssteigerung (vgl. [11] S.315-316).

### **2.3.3 Kugelförmige Eindringkörper im Kontakt mit Oberflächen**

Wie anhand von Kapitel 2.2 dargestellt, beruht die Oberflächenmodifikation im Zuge eines direkten, mechanischen Oberflächenverfestigungsverfahrens auf dem Kontakt von Werkzeug und Werkstückoberfläche. Hierbei weisen, wie am Beispiel des Festwalzens beziehungsweise auch des Kugelstrahlens gezeigt werden kann, die Werkzeuge zumeist eine kugelförmige Geometrie auf.

Auch im Zuge der technologischen Bearbeitung mittels Schlagverdichtens werden im Allgemeinen Werkzeuge mit kugelförmiger Spitzengeometrie zur Anwendung gebracht, deren Einschlag auf der Oberfläche die gewünschte Modifikation des Bauteils herbeiführen soll.

Erste kontaktmechanische Beziehungen für die Berührung zweier Kugeln wurden im Jahr 1881 durch Heinrich Hertz in [16] gegeben. Sofern einer der beiden Kugelradien dabei als unendlich angenommen wird, kann ob dieser Beziehungen auch auf die Berührung von Kugel und Oberfläche geschlossen werden. Die präsentierte, analytische Lösung zur Beschreibung von Verformungs- sowie Spannungsverteilung stellt auch heute trotz des auf

- statische Belastung,
- elastische Verformung der Kontaktpartner,
- vollkommen glatte und reibungsfreie Oberfläche sowie
- gegenüber den endlichen Abmessungen der Kontaktfläche unendlichen Abmessungen der Körper

beschränkten Geltungsbereiches die Grundlage für das Verständnis und die Beschreibung des betrachteten Kugel-Ebenen-Kontakts dar. Aus diesem Grund wird die Hertz'sche Theorie im Folgenden näher dargestellt.

Unter den oben genannten Kontaktbedingungen ergibt sich nach Hertz die Druckverteilung  $p(r)$  an der Kontaktfläche (Hertz'sche Pressung) als Funktion des radialen Abstandes  $r$  zu:

$$p(r) = p_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (1)$$

wobei  $p_0$  den maximalen Kontaktdruck im Zentrum der Kontaktfläche und  $a$  den, anhand von Abbildung 7 illustrierten, Kontaktradius bezeichnen.

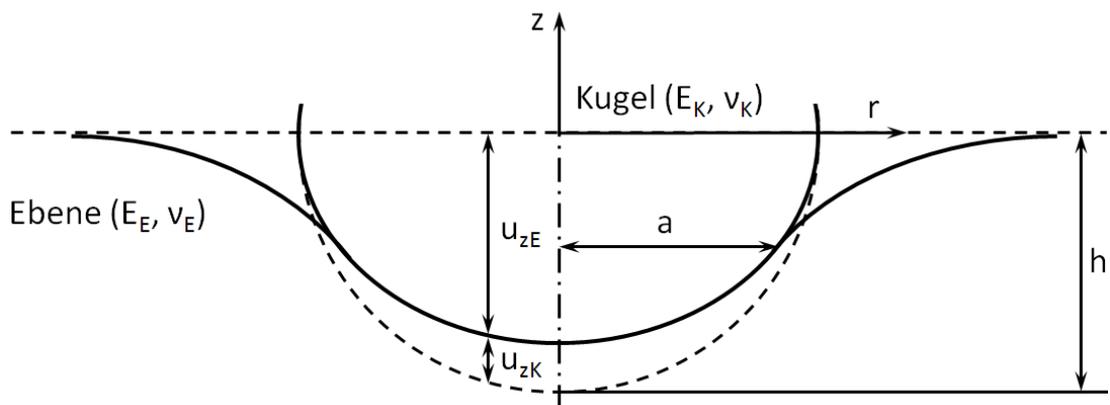


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Deformation im Zuge des Kugel-Ebenen-Kontaktes (vgl. [17] S.9)

Aus der Integration von Gleichung (1) ergibt sich des Weiteren der mittlere Kontaktdruck  $p_m$  sowie durch den Zusammenhang  $F_N = p_m \cdot \pi \cdot a^2$  die wirkende Kontaktkraft  $F_N$ :

$$F_N = \pi \cdot a^2 \int_0^a p(r) \cdot dr = \frac{2}{3} \cdot p_0 \cdot \pi \cdot a^2 \quad (2)$$

Die physikalische Deformation der beiden Kontaktpartner (Index  $i=1,2$ )  $u_{z,i} = u_{z,i}(r)$  folgt anhand der Überlagerung der Einzellasten im Bereich der Kontaktzone:

$$u_{z,i} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \cdot \frac{\pi \cdot p_0}{4a} (2a^2 - r^2) \quad \text{für } r \leq a, i=1,2 \quad (3)$$

wobei  $E_i$  den Elastizitätsmodul und  $\nu_i$  die Querkontraktionszahl des jeweiligen Kontaktpartners bezeichnet.

Durch die Addition der Einzelverschiebungen kann der Kontaktradius  $a$  der kreisrunden Kontaktfläche zwischen einer Kugel des Radius  $R$  und einer Ebene ( $R = \infty$ ) nach Gleichung (4) gegeben werden:

$$a = \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{F_N \cdot R}{E^*} \right)^{1/3} \quad (4)$$

sowie der mittlere Kontaktdruck  $p_m$  nach Gleichung (5):

$$p_m = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{6}{\pi^3} \cdot \frac{F_N \cdot E^{*2}}{R^2} \right)^{1/3} = \frac{2}{3} \cdot p_0 \quad (5)$$

Hierbei wird der, die Deformation der beiden Körper beschreibende, Ausdruck  $E^*$  als reduzierter Elastizitätsmodul bezeichnet und errechnet sich unter Kenntnis der Elastizitätsmodule  $E_K$  und  $E_E$  sowie der Querkontraktionszahlen  $\nu_K$  und  $\nu_E$  von Kugel und Ebene nach:

$$E^* = \left( \frac{1 - \nu_K^2}{E_K} + \frac{1 - \nu_E^2}{E_E} \right)^{-1} \quad (6)$$

Für den Fall des Eindrucks einer starren Kugel des Radius  $R$  in die unendliche Halbebene kann zudem auf Basis geometrischer Zusammenhänge für die Eindringtiefe  $h$  (Annäherung der beiden Kontaktkörpermittelpunkte  $u_{zK}(r=0) + u_{zE}(r=0)$ , siehe Abbildung 7) die Näherungsbeziehung:

$$h = \frac{a^2}{R} \quad (7)$$

gegeben werden.

Letztlich können für den vorliegenden Kontakt die Tiefenverteilungen der Spannungskomponenten im Kontaktzentrum anhand von Gleichung (8) und Gleichung (9) errechnet werden (siehe z.B.: [9] S.31).

$$\sigma_z(z) = -\frac{3}{2} p_m \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2} \quad (8)$$

$$\sigma_r(z) = \sigma_\theta(z) = -\frac{3}{2} (1 + \nu) p_m \left( 1 - \frac{z}{a} \tan^{-1} \frac{a}{z} \right) + \frac{3}{4} p_m \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2} \quad (9)$$

für welche sich (hier anhand des Fließkriteriums nach *von Mises*) die maximalen Scherspannungen entlang der Symmetrieachse  $z$  (siehe Abbildung 7) nach:

$$\tau_1(z) = \left| \frac{3}{2}(1 + \nu)p_m \left(1 - \frac{z}{a} \tan^{-1} \frac{a}{z}\right) - \frac{9}{4}p_m \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2} \right| \quad (10)$$

ergeben.

Wie anhand von Abbildung 8 dargestellt, liegt dabei für die Verteilung der *von Mises*-Spannung entlang der Mittelachse das Spannungsmaximum erst in einer gewissen Tiefe unterhalb der Oberfläche ( $z \approx 0,5 \cdot a$ ) vor.

Da an dieser Position des Spannungsmaximums die Fließspannung des Werkstoffs am ehesten (bzw. am frühesten) überschritten wird, kann in dieser Tiefe auch mit dem Beginn von plastischer Deformation des Materials gerechnet werden (vgl. [17] S.10).

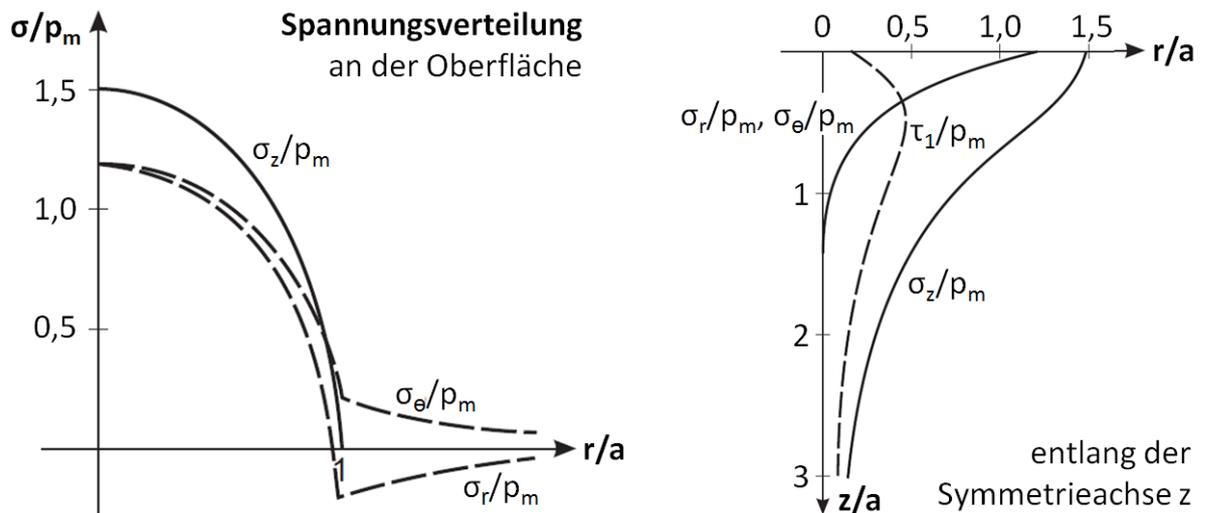


Abbildung 8: Spannungsverteilung in Folge des Kontakts eines kugelförmigen Eindringkörpers mit der Oberfläche (vgl. [18] S.94)

## 2.4 Ausgangspunkt der wissenschaftlichen Betrachtung

### 2.4.1 Darstellung des aktuellen Kenntnisstandes

Eine der ersten Betrachtungen der Technologie des Schlagverdichtens mit besonderem Fokus auf deren Eignung in Hinblick auf das Polieren von Umformwerkzeugwerkstoffen unterschiedlicher wärmetechnischer Behandlung wird durch Wied in [19] gegeben. Dabei wird der Einfluss der MHP-Behandlung anhand der Untersuchung von Testwerkstücken mit vorgegebenen Radien und Ecken abgeschätzt. Als Probenmaterialien kommen insgesamt sechs Umformwerkzeugwerkstoffe (siehe Tabelle 2 auf Seite 33) zum Einsatz, welche beziehungsweise auch nach dem MHP-Prozess unterschiedlicher Wärmebehandlungen (Laserhärten, Induktionshärten) unterzogen wurden (vgl. [19] S.26ff). Sämtliche Stahlwerkstoffe werden hierbei mit denselben Prozessparametern ( $D=6\text{mm}$ ;  $F=153\text{Hz}$ ;  $l=100\%$ ;  $t\sim 1\text{mm}$ ;  $s=0,1\text{mm}$ ;  $v=1500\text{mm/min}$ ; Parametererläuterung siehe Kapitel 4.2) einmalig, orthogonal bearbeitet und diese Parameter für den Gusswerkstoff EN-GJS-HB265 mit  $D=8\text{mm}$ ,  $F=168\text{Hz}$ ,  $v=2000\text{mm/min}$  lediglich geringfügig geändert (vgl. [19] S.38).

Die so präparierten Werkstücke werden in Hinblick auf die Rauheitsänderung der Oberfläche sowie deren Härtezustand untersucht. Auch Härtetiefenprofile der einzelnen Proben werden dargestellt. Im Zuge dieser Betrachtung wird für alle untersuchten Werkstoffe eine deutliche Reduzierung der Oberflächenrauheit in der Größenordnung von 70%-90% gefunden. Zudem führt die MHP-Behandlung zu einer werkstoffspezifischen Härtesteigerung, welche teilweise noch etwa 1mm im Material nachgewiesen wird (vgl. [19] S.70). Für einige Versuchsproben wird zudem der Eigenspannungszustand an der Oberfläche, bestimmt durch Röntgendiffraktometrie, angegeben. Hier zeigt sich eine deutliche Zunahme von bereits vor der MHP-Bearbeitung vorliegenden Druckeigenspannungen (gehärteter Caldie, gehärteter Caldie Cast) beziehungsweise die Wandlung von Zug- in Druckeigenspannungen (anhand von lasergehärtetem EN-GJS-HB265) infolge der MHP-Bearbeitung (vgl. [19] S.66).

In [20] widmet sich Wied erneut der Technologie sowie deren Einsatz zur Bearbeitung von Umformwerkzeugen des Karosseriebaus. Im Zuge von Versuchen mittels eines Aufprallversuchsstands wird hier zunächst ein einzelner Aufprall von MHP-Werkzeugen (Vollhartmetallkugelspitze mit 15% Kobalt-Anteil) auf die im entsprechenden Teil von Tabelle 2 (siehe Seite 33) angegebenen Materialien untersucht (vgl. [20] S.39). Durch die Variation des Werkzeugkugeldurchmessers (6mm, 12mm, 16mm sowie 20mm), der Stößelmasse (von 517g bis 917g in 100g Schritten) sowie der Aufprallgeschwindigkeit (von 0,75 bis 1,75m/s in 0,25m/s

Schritten) werden dabei die Auswirkung dieser Variablen auf den resultierenden Abdruckdurchmesser, die maximale Kontaktkraft sowie die Stoßzahl ermittelt (vgl. [20] S.40ff). Die wesentlichen Ergebnisse aus diesen Untersuchungen werden später zusammenfassend auch in [21] dargestellt. Im Zuge von Festklopffversuchen wird in [20] zudem ein pneumatisches Schlagwerkzeug F2505 der Firma Atlas Copco in Kombination mit einem Industrieroboter der Firma Kuka verwendet, um zunächst jeweils zwei Faktor-Ausprägungen für die Einflussparameter Werkstückmaterial (1.2358; ZnAl4Cu3), Bahnversatz der Fräsbearbeitung (0,4mm; 0,8mm), Kugeldurchmesser (8mm; 20mm), Aufprallenergie (0,7mJ; 0,35mJ) sowie Abstand zwischen den Einzeleinschlägen (0,2mm; 0,4mm) vollständig gegeneinander zu variieren (vgl. [20] S.47). In weiterer Folge werden anhand von zwei Parameterkombinationen die Auswirkungen des Vorschubrichtungswinkels  $\varphi$  (variiert von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  in  $15^\circ$  Schritten) und des Schlagwinkels  $\alpha$  ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  und  $45^\circ$ ) untersucht (siehe Parametererläuterung Kapitel 4.2). In sämtlichen Versuchen werden dabei der Mittenrauwert  $R_a$  (normal und senkrecht zur Klopfrichtung) über das Tastschnittverfahren sowie die Brinell-Härte der Oberfläche bestimmt. Anhand von Mikrovickers-Härtemessungen wird zudem durch Härtetiefenprofile die Wirktiefe der Verfestigung bewertet (vgl. [20] S.53ff).

Im Allgemeinen wird in [20] das höchste Glättungspotential unter Verwendung eines großen Kugeldurchmessers in Verbindung mit einem geringen Abstand der einzelnen MHP-Einschläge gefunden. Die Einschlagenergie des pneumatischen Klopfsystems ist dabei so einzustellen, dass einerseits die Fräsriefen der Vorbearbeitung vollends eingeebnet werden, andererseits aber keine ausgeprägten Materialanhäufungen entstehen (vgl. [20] S.113). Zudem wird eine deutliche Richtungsabhängigkeit der gemessenen Rauheitswerte insbesondere unter der Verwendung eines kleineren Kugeldurchmessers dargestellt. Anhand von mittels Konfokalmikroskop gemessener Topographien führt Wied die Abweichungen (geringere Rauheitswerte gemessen in MHP-Vorschubrichtung) auf ein Spiel der Klopfkugel zurück. Basierend auf der Tatsache, dass anhand der gemessenen Oberflächentopographie der sichtbare Abstand der Klopfrillen mit etwa dem doppelten Wert des ursprünglich durch das Maschinenprogramm vorgegebenen Bahnabstands abgeschätzt werden kann, geht er dabei davon aus, dass die Klopfkugel durch die im Zuge der vorangegangenen Bearbeitungsbahn erzeugte Rille geführt wird. Dadurch zeichnet sich letztlich nur jede zweite Bahn deutlich auf der Oberfläche ab, wodurch die höheren Rauheitswerte normal auf die Bahnen erklärt werden (vgl. [20] S.58f).

In Bezug auf die Verfestigungswirkung der MHP-Bearbeitung wird wie zuvor für die Glättung ein geringer Abstand zwischen den Einschlägen als vorteilhaft angegeben. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass durch eine Einschlagabstandverringerung

eine teils massive Erhöhung der Bearbeitungsdauer resultiert (vgl. [20] S.68ff). Anhand von Produktionsversuchen, im Zuge derer insgesamt achtzehn Ziehstempel bzw. Ziehmatrizen realer Umformwerkzeuge teils auch unter Verwendung eines elektromagnetischen Aktuatorsystems bearbeitet wurden, findet Wied jedoch im Vergleich zum konventionellen Fertigungsprozess erhebliche Vorteile der MHP-Bearbeitung. Wie anhand von Beispielen gezeigt wird, konnten durch die Verringerung von manueller Nacharbeit die Durchlaufzeiten sowie die Bearbeitungskosten erheblich reduziert werden (vgl. [20], S.107ff).

Neben diesen experimentellen Untersuchungen stellt Wied in [20] sowie auch in [21] (hier mit Erweiterung auf die Simulation von rauen Oberflächen) zur Abbildung der Verhältnisse im Schnitt durch Kugel und Werkstück eine zweidimensionale FEM-Simulation mittels LS-Dyna vor. Dabei nutzt er die Ergebnisse der vorangegangenen Aufprallversuche, um das Modell zu verifizieren und findet mit Ausnahme der Kontaktkraft (höhere Werte im Zuge der Simulation werden auf systematische Messabweichungen und vernachlässigte Randeffekte bei der Berechnung zurückgeführt) eine gute Übereinstimmung von Simulations- und Versuchsergebnissen. Das dargestellte FEM-Modell wird zudem für die Untersuchung der Parameter Kugeldurchmesser, Betriebsdruck und Abdruckabstand im Zuge einer Festklopfbearbeitung (MHP; Schlagverdichten) mittels eines pneumatischen Klopfsystems genutzt.

In [22] wird durch Berglund et al. ein elektro-magnetisches Aktuatorsystem der Firma KWL (später accurapuls) in Kombination mit einem 5-achsigen Bearbeitungszentrum Hermle C40U verwendet, um die Eignung der Technologie in Hinblick auf das Oberflächenglätten von Presswerkzeugen zu untersuchen. Die Prozessparameter werden hierbei für die Bearbeitung von mittels Kugelkopfräser  $\varnothing 12\text{mm}$  vorgefrästen EN-GJS-HB265 Proben auf zuvor festgelegten Ausprägungen belassen ( $D=8\text{mm}$ ;  $F=200\text{Hz}$ ;  $I=95\%$ ;  $v=3500\text{mm/s}$  [sic!];  $s=0,2\text{mm}$ ;  $\alpha=30^\circ$ ).

Im Zuge der Probenauswertung wird anhand von Härtemessungen mittels zweier Eindringmassen (1kg, 100g) eine auf die oberflächennahen Schichten begrenzte Steigerung des Härtewertes ( $\sim 100\text{HV}$ ) gezeigt. Durch eine weitreichende Betrachtung der Oberflächentopographie (Ermittlung von Rauheitsparametern und „*scale-sensitive fractal analysis*“ mittels Weißlichtinterferometrie sowie Mikroskopaufnahmen) wird einerseits ein deutlicher Glättungseffekt nachgewiesen und andererseits die Auswirkung der MHP-Bearbeitung auf die Grafitkugeln des untersuchten Gusswerkstoffs dargestellt. Dabei wird gezeigt, dass die Bearbeitung mittels MHP die Größe der Grafitkugel-Kavitäten deutlich reduziert, wobei der Grafit durch die Bearbeitung aus den Kavitäten ausgebracht werden dürfte.

Durch Medvedeva et al. erfolgt in [23] eine umfassende Betrachtung der Oberflächen-Charakteristik MHP-bearbeiteter Stahl- und Gusseisenproben (siehe Tabelle 2 auf Seite 33). Die mittels MHP-Werkzeugen des Durchmessers 6mm und 12mm und einem Bahnversatz von 0,2mm und 0,3mm bei konstantem Vorschub ( $v=2400\text{mm/min}$ ), konstanter Schlagdistanz ( $t=0,5\text{mm}$ ) und konstanter Frequenz ( $F=200\text{Hz}$ ) sowohl in orthogonaler Schlagrichtung als auch unter einer Anstellung von  $\alpha=30^\circ$  behandelten Proben werden dabei in vielerlei Hinsicht analysiert.

Neben der Betrachtung der resultierenden Oberflächenrauheit mittels Weißlichtinterferometrie sowie der Analyse der Oberflächenhärtewerte (Rockwell C-Härtemessung) werden Härtetiefenprofile dargestellt, die anhand von Mikrohärtmessungen (HV 0,005) am Schnittprofil ermittelt wurden. Zudem werden die bearbeiteten Oberflächen sowie auch die oberflächennahen Schichten anhand von Schnitten durch REM-Aufnahmen betrachtet. Der Eigenspannungszustand der einzelnen Proben wird des Weiteren sowohl an der Oberfläche, als auch in der Tiefe des Materials (durch schichtweisen Materialabtrag mittels elektrolytischen Polierens) durch Röntgendiffraktometrie analysiert.

Die Autoren finden anhand der Reduktion der arithmetischen Mittenrauheit der Oberfläche ( $S_a$ ) im Bereich von 60-70% eine signifikante Rauheitsreduktion der zuvor mittels Kugelpkopffräser  $\varnothing 12\text{mm}$  im Bahnabstand von 0,4mm vorgefrästen Oberflächen. Dabei werden an diesen keinerlei Beschädigungen (z.B. Mikrorisse) durch die MHP-Behandlung gefunden. Auch eine Härtesteigerung an der Oberfläche von etwa 2HRC für die Stahlmaterialien Impax Supreme und THG 2000 sowie etwa 9HRC für den Gusswerkstoff GGG70L wird dargestellt. Sowohl die Rauheitsreduktion als auch die Tiefe der kaltverfestigten Randschicht, welche anhand der REM-Aufnahmen an der Schnittfläche mit etwa  $15\mu\text{m}$  abgeschätzt wird, stellen sich weitgehend unabhängig vom untersuchten Material sowie dem betrachteten Anstellwinkel ein.

Die Messungen der Eigenspannungszustände zeigen eine deutliche Einbringung von Druckspannungen. Dabei wird für die untersuchten Werkzeugstähle nach orthogonaler Bearbeitung ein Druckspannungsmaximum von  $> -1000\text{MPa}$ , etwa  $100\mu\text{m}$  unter der Oberfläche gefunden. Bei einer Bearbeitung unter Anstellung ( $\alpha=30^\circ$ ) wird eine Erhöhung der maximalen Druckeigenspannungen, welche in diesem Fall direkt an der Materialoberfläche gefunden werden, verzeichnet. Auch im Fall der orthogonalen Bearbeitung des Gussmaterials (GGG70L) liegt das Maximum der Druckeigenspannungen direkt an der Materialoberfläche vor, dessen Betrag mit etwa max.  $-850\text{MPa}$  im Vergleich zu den untersuchten Stahlproben etwas niedriger ausfällt. Die Druckspannungen können dabei bis zu etwa  $1200\mu\text{m}$  noch in deutlich tieferen Werkstoffregionen als bei den untersuchten Stahlproben (Tiefe etwa  $500\mu\text{m}$ )

nachgewiesen werden. Zudem wird in [23] eine eindeutige Richtungsabhängigkeit der eingebrachten Druckeigenstressungen beschrieben, wobei deren Betrag in Richtung des MHP-Prozesses deutlich niedriger ausfällt. Die Autoren bringen dieses Phänomen mit der Richtung der vorangegangenen Fräsbearbeitung in Verbindung, die normal auf die nachfolgende MHP-Vorschubrichtung durchgeführt wurde ( $\varphi=90^\circ$ ). Sie vermuten, dass die durch diese Bearbeitung resultierenden Fräsriefen einfacher in Normalrichtung der MHP-Bearbeitung verformt werden können, wodurch die höhere Spannungseinbringung aufgrund höherer plastischer Deformation erklärt wird.

Groche et al. untersucht in [24] die Methoden des Festwalzens und Festklopfens (MHP, Schlagverdichten) als Verfahren der mechanischen Oberflächenverfestigung in Hinblick auf deren Eignung zur Steigerung der Randschichthärte und zur Einglättung von Werkzeugoberflächen. Hierbei werden zunächst anhand einer Parameterstudie an Proben des Werkstoffs EN-GJS-265B einzelne Verfahrensparameter variiert, um geeignete Parametersätze für die Bearbeitung von Werkzeugen zu finden. Derart modifizierte Werkzeuge werden in weiterer Folge anhand von Verschleißtests mittels Zylinder-Ebene-Streifenziehversuch untersucht (vgl. [24] S.30). Tabelle 1 gibt die im Zuge der Ausgangsstudie variierten Prozessparameter und die für diese gewählten Vorgabewerte wieder, welche allerdings nicht in sämtlichen Variationsmöglichkeiten angewendet wurden.

*Tabelle 1: Im Zuge der in [24] gegebenen Parameterstudie untersuchte Parameter und deren Ausprägungen (vgl. [24] S.81-82)\**

<b>Parameter</b>	<b>Untersuchte Ausprägungen</b>
Durchmesser $D$ [mm]	8 / 10 / 12 / 16
Bahnabstand $s$ [mm]	0,1 / 0,2 / 0,4
Frequenz $F$ [Hz]	50 / 150 / 200 / 250
Intensität $I$ [%]	95 / 100(2x)
Vorschubgeschw. $v$ [mm/min]	2500 / 1000(1x)
Abstand zw. Einschl. $f$ [mm]	0,5
Schlagwinkel $\alpha$ [°]	0 / 30
Vorschubrichtungswinkel $\varphi$ [°]	45 / 90(2x)

\*... Um einen direkten Vergleich mit der vorliegenden Arbeit zu ermöglichen, wurden die Prozessparameterbezeichnungen nicht aus [24] übernommen, sondern die anhand von Kapitel 4.2 gegebenen Bezeichnungen verwendet.

In einer zweiten Phase werden neben dem Werkstoff EN-GJS-265B im ungehärteten und thermisch gehärteten Zustand (Induktionshärteverfahren) auch die

Stahlmaterialien 1.2333 (ungehärtet sowie induktionsgehärtet) sowie 1.2379 (gehärtet auf 60HRC) untersucht. Im Gegensatz zu den Proben des hochlegierten Werkzeugstahls (1.2379), deren Ausgangsoberfläche gänzlich im gefrästen Zustand ohne Schmierstoffapplikation untersucht wird, liegen die Oberflächen der Kaltarbeitsstahl- (1.2333) und Graugussproben sowohl im gefrästen, geschliffenen als auch polierten Ausgangszustand vor und werden teilweise mit Schmierstoff versehen (vgl. [24] S.81-82).

In Bezug auf das Oberflächenglättungsvermögen der MHP-Technologie finden die Autoren den Haupteinflussfaktor im Anstellwinkel zur Oberfläche (Schlagwinkel  $\alpha$ ). Es wird dargestellt, dass sich durch eine angestellte Bearbeitung mit  $\alpha=30^\circ$  weitgehend geringere Oberflächenrauheitswerte im Vergleich zu einer orthogonalen Bearbeitung ( $\alpha=0^\circ$ ) einstellen. Zudem wird eine niedrigere Rauheit unter Vorgabe eines Winkels von  $\varphi=45^\circ$  zwischen den Fräs- und MHP-Bahnen erreicht. Als weitere Einflussfaktoren werden der Kugeldurchmesser und die Frequenz genannt. In Bezug auf diese Faktoren wird auf eine gegenseitige Beeinflussung hingewiesen. Demnach bewirkt eine steigende Frequenz bei gleichem Kugeldurchmesser eine niedrigere Rauheit, wobei sich dieser Effekt für größere Kugeldurchmesser weniger ausgeprägt zeigt (vgl. [24], S.85-87). Zudem wird auch an dieser Stelle auf eine deutliche Richtungsabhängigkeit der erreichten Rauheitswerte hingewiesen (siehe auch [20] S.52ff). Es wird dabei angegeben, dass eine angestellte Bearbeitung ( $\alpha=30^\circ$ ) in Kombination mit einem Winkel  $\varphi=45^\circ$  zu einer deutlich homogeneren Rauheitsverteilungen führt (vgl. [24] S.87).

Die Betrachtung der Härtezustände wird im Zuge der in [24] dargestellten Untersuchungen in der Regel an der Oberfläche auf Basis des Vickers-Verfahrens durchgeführt. Zur Ermittlung der Härtegradienten senkrecht zur Oberfläche werden zudem Mikrohärtemessungen nach dem „Knoop“-Verfahren angewendet (vgl. [24] S.32). Für das MHP-Verfahren wird an den Proben des Werkstoffs EN-GJS-265B eine Härtesteigerung von 16-25% festgestellt, deren Maximum im Vergleich zu festgewalzten Proben näher an der Oberfläche zu finden ist. Es konnte dabei lediglich anhand von zwei Proben ein Härtetiefenverlauf mit monoton abnehmender Härte ermittelt werden. Die übrigen Proben zeigen einen Verlauf, welcher bereits bei geringen Tiefen (300-700 $\mu\text{m}$ ) die Werkstoffgrundhärte erreicht, in tieferen Bereichen jedoch letztlich wieder höhere Härtewerte zeigt (vgl. [24] S.98). In Bezug auf die Bearbeitung von thermisch gehärteten Werkstoffen wird im Falle des Werkstoffs 1.2333 auf eine zusätzliche Härtesteigerung um 6% bis 25% hingewiesen. Die MHP-Bearbeitung von induktionsgehärteten EN-GJS-265B Proben führte jedoch der Studie zur Folge zu einer Oberflächenhärtereduktion (vgl. [24] S.99). Für den Werkstoff 1.2379 (gehärtet auf 60HRC) wird eine

Härtesteigerung an der Oberfläche bis zu 10% genannt, welche für die MHP-Technologie im Vergleich zum Festwalzen tendenziell leicht höher ausfällt (vgl. [24] S.103). Dabei wird auch in Bezug auf die Härte auf einen Einfluss des Schlagwinkels  $\alpha$  verwiesen. So wird angegeben, dass unabhängig vom Versuchswerkstoff eine orthogonale Bearbeitung ( $\alpha=0^\circ$ ) im Vergleich zu einer Bearbeitung unter Anstellung zu höheren Oberflächenhärtewerten führt (vgl. [24] S.99).

Im Zuge der Verschleißuntersuchungen wird in [24] die Oberflächenrauheit der untersuchten Werkzeuge zu Versuchsbeginn, nach 1000 Hieben sowie gegen Versuchsende (10.000 Hübe der Versuchseinrichtung) untersucht. Es wird dabei festgestellt, dass sich die Rauheitswerte der oberflächenbehandelten Werkzeuge im Vergleich zu einem polierten Referenzwerkzeug im geringeren Maße ändern. Es kommt hierbei zu einer Aufrauung aller betrachteten Oberflächen. Die Rauheit des polierten Referenzwerkzeugs, obgleich dieses vor Versuchsbeginn eine vergleichsweise glatte Oberfläche zeigte, liegt jedoch nach dem Versuch etwas über jener der oberflächenverfestigten Werkzeuge (vgl. [24] S.118). Anhand der Versuche kann dabei keine Steigerung des Verschleißschutzes gegen Abrasion nachgewiesen werden, jedoch wird eine Änderung des Verschleißverhaltens festgestellt. Hierbei wird eine gegenseitige Beeinflussung der unterschiedlichen Verschleißarten des abrasiven Verschleißes und des Zinkabriebs, welcher beim Tiefziehen von verzinkten Stahlblechen auftritt, beobachtet. Im Streifenziehversuchsverlauf kommt es dabei zu einem zeiligen Muster von Zinkanhaftungen, welches darauf zurückgeführt wird, dass die Gipfel der Fräsriefen im Zuge der Oberflächenbehandlung stärker umgeformt werden als deren Täler. Hierdurch soll es im Bereich der Gipfel durch erhöhte Kaltverfestigung zu einer höheren Härte und damit zu einem zeiligen Härtemuster kommen. Da die Stellen geringerer Härte (im Bereich der Fräsriefentäler) schneller abgetragen werden, dürften dadurch im Zuge des Ziehversuchs höhere Kontaktnormalspannungen an den härteren Stellen (ursprüngliche Fräsriefengipfel) resultieren. Über einen stärkeren Abrieb an diesen Bereichen wird somit letztlich eine erhöhte Zinkanhaftung erklärt (vgl. [24] S.127ff).

Auch in [25] und [26] werden durch Groche et al. Ergebnisse aus Zylinder-Ebenen-Streifenziehversuchen an Werkzeugen aus globularem Grauguss EN-GJS-265B dargestellt. Anhand der Untersuchung wird gezeigt, dass die mechanische Oberflächenbehandlung nur für Kleinserien tauglich ist, da ein am Versuchsanfang verzeichneter Verschleißschutz mit fortschreitendem Versuch zurückgeht. Gegen Versuchsende gleichen sich die Verschleißraten des bearbeiteten Werkzeugs jener der Referenz an (siehe auch [24], S.119f). Härtemessungen belegen dabei, dass das Referenz- und das MHP-bearbeitete Werkzeug nach dem

Versuch identische Oberflächenhärtewerte aufweisen (siehe auch [24], S.120f). In Bezug auf eine Parameteroptimierung der MHP-Technologie wird auf einen Widerspruch zwischen optimaler Glättung und der Steigerung der Oberflächenhärte verwiesen. So stellt sich eine hohe Eindringtiefe nur ein, wenn ohne Anstellung mittels kleinen Kugeldurchmessern geklopft wird. Bessere Oberflächenqualitäten können hingegen erzielt werden, wenn eine Anstellung des Klopfsystems vorgenommen und der Kugeldurchmesser erhöht wird. In diesem Zusammenhang wird mit  $s_{eff}$  der effektive Schlagabstand eingeführt, welcher auf Basis der Formel:

$$s_{eff} [\text{mm}] = \left( \frac{v_f}{f} - \frac{F \cdot l^3 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{3 \cdot E \cdot I} \right) \cdot \cos \beta \quad (11)$$

errechnet werden kann (siehe [25] S.535; [26] S.7). Hierbei bezeichnet  $v_f$  die Vorschubgeschwindigkeit und  $f$  stellt die Frequenz des Klopfsystems dar (Anmerkung:  $v_f$  und  $f$  entsprechen in der vorliegenden Arbeit  $v$  und  $F$ , siehe Kapitel 4.2). Neben dem Winkel zur Flächennormalen  $\alpha$  und dem Winkel zwischen den Fräs- und MHP-Bahnen (hier durch  $\beta$ , in der vorliegenden Arbeit und im Folgenden durch den Buchstaben  $\varphi$  bezeichnet; siehe Vorschubrichtungswinkel Kapitel 4.2) gehen zudem die Schlagkraft  $F$ , die Länge  $l$  sowie die Biegesteifigkeit  $E \cdot I$  des Klopfwerkzeugs in die Gleichung ein.

Damit wird die Abschätzung des Abdruckabstandes in Vorschubrichtung auf Basis der Frequenz und der Vorschubgeschwindigkeit (vgl. Gleichung (12), Kapitel 4.2) durch einen Kragträgerterm erweitert, der im Falle des Vorliegens einer angestellten Bearbeitung ( $\alpha \neq 0^\circ$ ) das Durchbiegen des Werkzeugs berücksichtigt. Es wird hier davon ausgegangen, dass die Einschlaggeometrie durch ein teilweises Abgleiten der Kugelspitze auf dem Werkstück elliptisch wird, wodurch sich der effektive Abstand zwischen zwei Einschlägen verringert. Zudem wird angeführt, dass sich der projizierte Abstand in Bezug auf das Werkstückkoordinatensystem durch einen Winkel zwischen den Fräs- und MHP-Bahnen  $\varphi \neq 0^\circ$  ( $\varphi \triangleq \beta$ , s.o.) verringert. Die Korrelation des effektiven Schlagabstandes mit gemessenen Mittenrauwerten wird anhand eines Diagramms für zwei Kugeldurchmesser dargestellt (siehe [25] S.535; [26] S.8).

In [27] und [28] stellt Groche et al. die konventionelle, fertigungstechnische Prozesskette des Werkzeug- und Formenbaus zwei weiteren Varianten gegenüber. Dabei wird im Zuge der ersten Variante der Schlichtprozess durch einen Feinfräsprozess ersetzt, als Folge dessen mit Bezugnahme auf Wied [20] keine weitere Nacharbeit (manuelles Polieren) zu erwarten ist. Der zweite Ansatz besteht, wie in Abbildung 9 dargestellt, in der teilweisen Substitution des Schlichtfräsprozesses durch Verfahren der maschinellen, mechanischen

Oberflächeneinglättung, welche hier durch das Festwalzen und das Festklopfen (MHP, Schlagverdichten) repräsentiert werden.

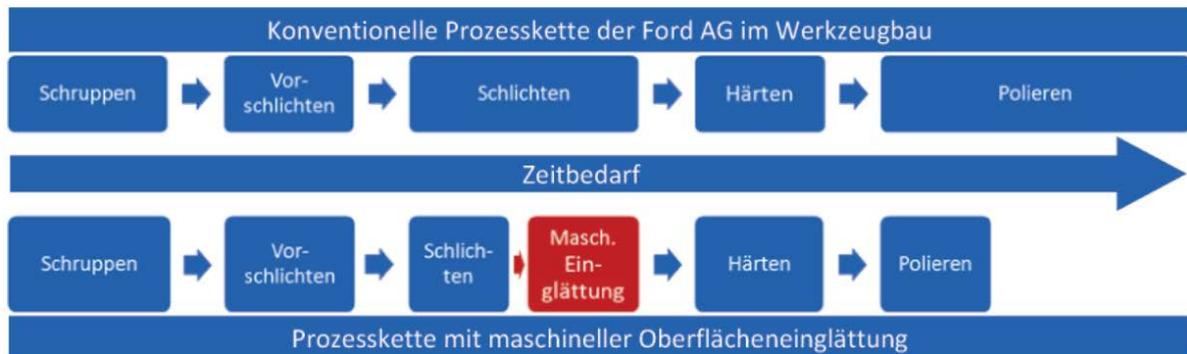


Abbildung 9: Reduzierung des Zeitbedarfs durch maschinelle Einglättung mittels Festwalzen beziehungsweise Festklopfen (MHP) [27]

Durch eine überschlägige Berechnung der zu erwartenden Bearbeitungskosten als Produkt der für die einzelnen Varianten errechneten Hauptzeiten (Quotient aus der Bearbeitungsfläche und dem Produkt aus der mittleren Vorschubgeschwindigkeit mit dem mittleren Zeilenabstand) mit den entsprechenden Maschinen- und Lohnstundensätzen nach Wied [20] erfolgt ein Vergleich der thematisierten Ansätze. Es wird dargestellt, dass maschinelle Oberflächenglättungsverfahren durch eine Verkürzung der Bearbeitungszeit um 37% zu einer Kostenreduktion von 22,5% führen können. Die Feinfräsbearbeitung führt hingegen zu Mehrkosten und wird daher unter produktionstechnischen Gesichtspunkten als nicht sinnvoll erachtet.

Auch in [29] liegt der Fokus auf dem Potential von Oberflächenverfestigungsverfahren im Werkzeug- und Formenbau. Es werden dabei durch Groche et. al. teilweise die Untersuchungen aus früheren Arbeiten ([24]-[26]) zusammenfassend dargestellt. Darüber hinaus wird anhand einer FEM-Simulation eine axial symmetrische Schubspannungsverteilung in Folge des MHP-Prozesses präsentiert. Letztlich wird darauf hingewiesen, dass durch die MHP-Bearbeitung einerseits der manuelle Polierprozess reduziert, andererseits auch bei bereits induktionsgehärteten Materialien eine zusätzliche Härtesteigerung erzielt werden kann. Zudem wird im Gegensatz zum Festwalzen im Falle der MHP-Behandlung an den untersuchten Proben keinerlei Rissbildung festgestellt (siehe auch [24], S.107ff).

In [30] werden für die Gusseisenwerkstoffe EN-GJS-HB265 und GJL-250 sowie für die Stähle 1.2379 und Dörrenberg-GP4M Handlungsrichtlinien für den Einsatz der Technologien des Festklopfens (MHP) und Festwalzens zur Oberflächenglättung im Werkzeugbau gegeben. Hierbei wird zunächst ein präventives Vorgehen gegen Lunker und Poren dargestellt, welche sich bei Gusseisenwerkstoffen durch Schrumpfung oder eingeschlossene Gasblasen im Zuge des Erstarrungsvorgangs

bilden. Insbesondere randschichtnahe Hohlräume führen nach einer MHP-Bearbeitung zu erkennbaren Vertiefungen an der Oberfläche. Eine deutlich homogenere Einglättung lässt sich, der Richtlinie entsprechend, durch ein Vorverdichten der Oberfläche (MHP-Bearbeitung vor dem letzten Frässchritt) erreichen. Dieses Vorgehen wird auch von Wied in [20] beschrieben, wobei hier an die, dem Vorverdichten folgende, Fräsbearbeitung eine finale Finish-MHP-Bearbeitung anschließt (vgl. [20] S.83ff).

In Hinblick auf die Wahl optimaler Glättungsparameter werden eine hohe Klopfpunktüberdeckung (im vorliegenden Fall durch eine Erhöhung der Frequenz erreicht) sowie eine Reduzierung des Bahnabstandes als zweckmäßig für die Bearbeitung von Werkzeugstählen dargestellt. Für Graugusswerkstoffe soll die Werkstoffbelastung durch Frequenz, Schlagwinkel und Kugeldurchmesser derart gewählt werden, dass es zwar zur Einebnung der Frässtruktur, jedoch zu keiner Werkstoffzerrüttung (Ausbrüchen von Grafitlamellen) kommt. Das Auftreten einer derartigen Schädigung wird anhand einer Oberflächentopographiemessung dargestellt. Auch eine Erhöhung des Schlagwinkels ( $\alpha > 30^\circ$ ) führt den Autoren zu Folge im Falle der Bearbeitung von globularem Grauguss zu einer zunehmenden Zerrüttung der Oberfläche. In Bezug auf den Werkzeugstahl wird als optimale Anstellung ein Schlagwinkel von  $\alpha = 30^\circ$  genannt. Dabei soll unabhängig vom betrachteten Material der Winkel  $\varphi$  (Vorschubrichtungswinkel zwischen MHP- und Fräsbahnen) für eine optimale Glättung bei etwa  $45^\circ$  gehalten werden. Zudem wird in [30] davon abgeraten, ein Werkstück wiederholt mittels MHP zu bearbeiten, da dies zu keiner Verbesserung der Einglättung beiträgt, jedoch zu einer Zerrüttung der Oberfläche führen kann.

#### **2.4.2 Zusammenfassende Betrachtung**

Im Zuge einer Erhebung des vorliegenden Stands der Technik lässt sich der Hauptschwerpunkt der wissenschaftlichen Forschung, neben der Betrachtung anderer positiver technologischer Effekte, im Bereich der teilweisen Substitution des manuellen Oberflächenpolierprozesses im Werkzeug- und Formenbau finden (siehe Abbildung 9). In diesem Zusammenhang sind auch die im Zuge der Untersuchungen näher betrachteten Werkstoffe zu sehen, welche zusammenfassend in Tabelle 2 dargestellt sind und mehrheitlich ihr Einsatzgebiet in eben diesem Bereich finden.

Die maschinelle Oberflächenglättung von Umformwerkzeugen stellt zum gegenwärtigen Zeitpunkt auch die Hauptanwendung der MHP-Technologie im industriellen Einsatz dar. So wird beispielsweise durch die Firma DAIMLER im Mercedes-Benz Werk Sindelfingen ein pneumatisches Aktuatorsystem in Kombination mit einem Industrieroboter genutzt, um Serien-Ziehwerkzeuge zu bearbeiten (vgl. [31]).

Tabelle 2: In den gegebenen Literaturstellen betrachtete Werkstoffe

Stelle	Untersuchungswerkstoffe
[19]	EN-GJS-HB265 (ehemals GGG70L); Dörrenberg-GP4M; Uddeholm-Fermo; -Sleipner; -Caldie; -Caldie Cast
[20]	<u>Aufprallversuche:</u> GGG70L; X153CrMoV12 (1.2379); 60CrMoV18-5 (1.2358); S235 JR (1.0038); ZnAl4Cu3 (Zemak); AlMg4,5Mn0,7 (5083) <u>Festklopversuche (pneumatisch):</u> 1.2358; ZnAl4Cu3 <u>Produktionsversuche an Werkzeugen:</u> GGG70L; Zemak
[21]	siehe Aufprallversuche in [20]
[22]	EN-GJS-HB265 (ehemals GGG70L)
[23]	Uddeholm-Impax Supreme; -THG 2000; -Sverker 21; GGG70L
[24]	GGG70L; 1.2333; 1.2379
[25], [26]	GGG70L
[27]-[29]	GGG70(L); 1.2379
[30]	GGG70L; GJL-250; 1.2379; Dörrenberg-GP4M

Zudem zeigt die Analyse des gegenwärtigen Stands der Technik, dass der Ausgangsabstand zwischen Werkstückoberfläche und Stößelspitze (im Folgenden als Schlagdistanz  $t$  bezeichnet) in den vorliegenden Arbeiten nur bedingt beziehungsweise nicht betrachtet wurde.

Dabei wird die Schlagdistanz in [21] (basierend auf der Tatsache, dass der Hauptfokus auf einem pneumatischen Klopfsystem liegt) aber auch in [22] sowie [24] bis [30] nicht als maßgeblicher Prozessparameter angeführt und es finden sich auch keine Angaben über die in den beschriebenen Untersuchungen vorgenommene Einstellung dieses Faktors. In [19] und [23] ist die in den Versuchen vorgegebene Distanzeinstellung zwar dokumentiert, jedoch wird der Parameter im Zuge der Untersuchungen nicht variiert und dessen Einfluss daher auch nicht näher diskutiert. Auch in [20] wird per se die Schlagdistanz und deren Einfluss nicht im Zuge der dargestellten Untersuchungen thematisiert. Es wird jedoch im Zuge der Beschreibung des elektromagnetischen Aktuator systems angegeben, dass ein Einfluss des Parameters auf die vorliegende Kontaktkraft besteht, welche proportional dem vorgegebenen Distanzwert steigt (vgl. [20] S.97).

Der hier und im vorangegangenen Abschnitt dieses Kapitels dargestellte Stand der Technik in Bezug auf die Technologie des Schlagverdichtens bildet die Grundlage für die Definition der im Folgenden dargestellten Zielsetzung und der damit verbundenen Vorgehensweise.

## **3 Zielsetzung und Vorgehensweise**

### **Zielsetzung**

Anhand der Ergebnisse aktueller Studien lässt sich die Eignung der Technologie des Schlagverdichtens (Machine Hammer Peenings) in Bezug auf Oberflächenglättung, die Steigerung der Oberflächen- und Randschichthärte sowie die Einbringung von Druckeigenspannungen abschätzen. Obgleich diese positiven Modifikationseffekte für eine Vielzahl an Anwendungen weitreichende Potentiale bieten könnten, wird die betrachtete Technologie zum gegenwärtigen Zeitpunkt hauptsächlich mit dem Ziel der Oberflächenglättung im Werkzeug- und Formenbau genutzt (vgl. Kapitel 2.4).

Ob dieser Tatsache soll durch die vorliegende Arbeit über die Erweiterung des Prozessverständnisses, die Betrachtung der erzielbaren Modifikationspotentiale an anwendungsrelevanten Materialien und die Analyse neuer Einsatzmöglichkeiten ein Beitrag zur Ausweitung des Applikationsfeldes der MHP-Technologie geleistet werden.

### **Vorgehensweise**

Der MHP-Prozess soll zunächst in seinen einzelnen Prozessschritten näher beleuchtet werden, um eine Erweiterung des grundlegenden Prozessverständnisses zu erreichen. Dabei wird angestrebt, durch die im Zuge der Untersuchungen erarbeiteten Erkenntnisse in Bezug auf den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Oberflächen- und Materialmodifikation die Grundlage für eine Optimierung von Bearbeitungsstrategien (optimierte Bahnführung) zu schaffen. Auf diese Weise soll für potentielle Anwender die Wirkungsweise des Prozesses dargestellt werden und es sollen Anhaltspunkte für eine optimierte Nutzung der Technologie gegeben werden können. Der hier skizzierte Themenschwerpunkte wird im Folgenden anhand von Kapitel 5 aufgegriffen.

Um eine Bewertung der vorliegenden technologischen Potentiale zu ermöglichen, sollen im Anschluss die erreichbaren Modifikationseffekte an unterschiedlichen Materialien betrachtet werden. Hierbei soll mit dem unlegierten Vergütungsstahl C45E (1.1191) mit weit verbreiteter Anwendung im allgemeinen Maschinenbau sowie dem rost- und säurebeständigen Stahlwerkstoff X3 CrNiMo 13-4 (1.4313) mit besonderer Relevanz im Hydromaschinenbau ein spezieller Fokus auf Werkstoffe gelegt werden, für welche eine derartige Bewertung zum gegenwertigen Zeitpunkt nicht gegeben werden kann (siehe Tabelle 2). Über eine Analyse der Prozessparametereinflüsse wird zudem die Identifikation sowie zweckmäßige Optimierung maßgeblicher Einflussgrößen angestrebt. Ein besonderer Schwerpunkt

soll dabei auf den Einfluss des Ausgangsabstandes von Werkzeugspitze zu Werkstückoberfläche gelegt werden, da dieser aus dem gegenwärtigen Stand der Technik nur bedingt beziehungsweise nicht verifiziert werden kann (siehe Kapitel 2.4). Abschließend soll anhand der Betrachtungen versucht werden, einen Vergleich der dargestellten Prozesspotentiale zu bereits etablierten Verfahren zu ermöglichen. Ein Zugang wird dabei in der Ermittlung der durch den MHP-Prozess erreichten Intensität nach Almen gesehen, welche für das in der industriellen Praxis wohl weitverbreitetste Oberflächenverfestigungsverfahren, dem Kugelstrahlen, eine maßgebliche Vergleichsgröße darstellt. Die dargestellte Betrachtung der technologischen Potentiale des MHP-Prozesses wird im Folgenden im Zuge von Kapitel 6 thematisiert.

Zudem wird die oben genannte Zielsetzung durch eine Analyse neuer Einsatzmöglichkeiten der vorliegenden Technologie verfolgt. Es sollen dabei Ansätze zur technischen Funktionalisierung von Oberflächen dargestellt und untersucht werden, die auf Basis des automatisierten MHP-Prozesses die Leistungsfähigkeit erzeugter Komponenten unter wirtschaftlich vertretbaren Gesichtspunkten steigern könnten. Möglichkeiten werden hierbei in der gezielten Strukturierung unter Einsatz funktionell formgestalteter Werkzeugspitzen sowie in der Nutzung der MHP-Technologie zur mechanischen Einbettung von Beschichtungsmaterialien gesehen. Die nähere Betrachtung dieser potentiellen Einsatzmethoden, welche entsprechend dem aktuellen Kenntnisstand zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht näher untersucht sind, wird in der gegenständlichen Arbeit im Zuge von Kapitel 7 erfolgen.

## **4 Methoden und Werkstoffe**

Anhand dieses Kapitels werden die im Zuge der Untersuchungen genutzten Maschinen und Anlagen sowie die für die messtechnische Versuchsauswertung verwendeten Messmethoden und -mittel dargestellt. Ein Hauptschwerpunkt liegt dabei auf der Definition und Erläuterung der im Zuge des MHP-Prozesses stellbaren Prozessparameter. Zudem wird eine kurze Beschreibung und Qualifizierung der untersuchten Probenwerkstoffe gegeben.

### **4.1 Experimenteller Aufbau**

#### **4.1.1 Schlagverdichtungsaktuator**

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde ein elektromagnetisches Aktuatorssystem der Firma accurapuls verwendet (siehe Abbildung 2), welches auch bereits im Zuge von Kapitel 2.1 vorgestellt wurde. Das System stellt die oszillierende Bewegung eines Stößelwerkzeugs zur Verfügung, deren Frequenz im Vorfeld der Bearbeitung in einem Frequenzbereich zwischen etwa 20Hz bis 500Hz stufenlos gewählt werden kann. Zudem besteht die Möglichkeit über die Vorgabe einer mit Intensität bezeichneten Größe, deren Wert in Prozent ebenfalls stufenlos an der Steuerung eingestellt wird, Einfluss auf die Schlagkraft zu nehmen. Diese Einstellung führt zu einer Beeinflussung der an der Tauchspule anliegenden Stromstärke, die sich je nach gewählter Intensitätsvorgabe zwischen 1A und 10A bewegt. Die Tauchspule des Systems wird während der Bearbeitung mittels Druckluft gekühlt, deren Zufuhr über eine herkömmliche Druckluftleitung erfolgt. Diese Leitung wird vor der Bearbeitung neben dem die Tauchspule speisenden Steuerkabel an den Aktuator angeschlossen.

#### **4.1.2 Werkzeugmaschinen**

Zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück wurden im Zuge der experimentellen Untersuchungen je nach Aufgabenstellung zwei unterschiedliche Werkzeugmaschinen verwendet.

Für die 5-Achsen-Bearbeitung unebener Oberflächen kam dabei ein C20U Bearbeitungszentrum der Firma Hermle zur Anwendung (siehe Abbildung 2). Das Kinematikkonzept der Maschine verfügt neben drei translatorischen Achsen mit Verfahrwegen von 600x450x450mm (X-, Y-, Z-Achse) über zwei weitere Drehachsen. Die vierte Achse ist dabei als Schwenktisch ausgeführt, welcher mit einem Schwenkbereich von  $\pm 115^\circ$  um die X-Achse (A-Achse) die fünfte Achse in Form eines 360° Drehtisches (C-Achse) trägt. Der MHP-Aktuator wurde auf der

Maschine mittels eines Adapters aufgenommen, der um die Maschinenspindel herum und damit von dieser entkoppelt angebracht wurde. Die vorliegende Aufspannung ermöglicht hierbei eine genaue Ausrichtung und Fixierung des Werkzeuges.

Im Falle der Notwendigkeit eines größeren Arbeitsraumes, wie dies beispielweise im Zuge der in Kapitel 7.1.6 dargestellten Untersuchungen der Fall war, wurde auf ein Vertikalspindel-Bearbeitungszentrum HAAS-VF3 zurückgegriffen. Durch die Achsverfahrwege von 1016x508x635mm (X-, Y-, Z-Achse) konnte damit die dreiachsige Bearbeitung größerer Versuchsproben ermöglicht werden. Im Falle der Verwendung dieser Maschine wurde der Aktuator mittels einer SK-40-Aufnahme direkt in der Maschinenspindel gespannt, wobei diese teilweise (im Falle der Untersuchungen zur Strukturierung von Oberflächen) über eigens konstruierte Vorrichtungen gegen ein Verdrehen fixiert wurde (siehe z.B.: Kapitel 7.1.6).

## 4.2 Prozessparameter

Die Technologie des Schlagverdichtens bietet über die Wahl unterschiedlicher, aktuator- sowie maschinenseitig stellbarer Prozessparameter (siehe Abbildung 10) die Möglichkeit, direkten Einfluss auf das Prozessergebnis zu nehmen.

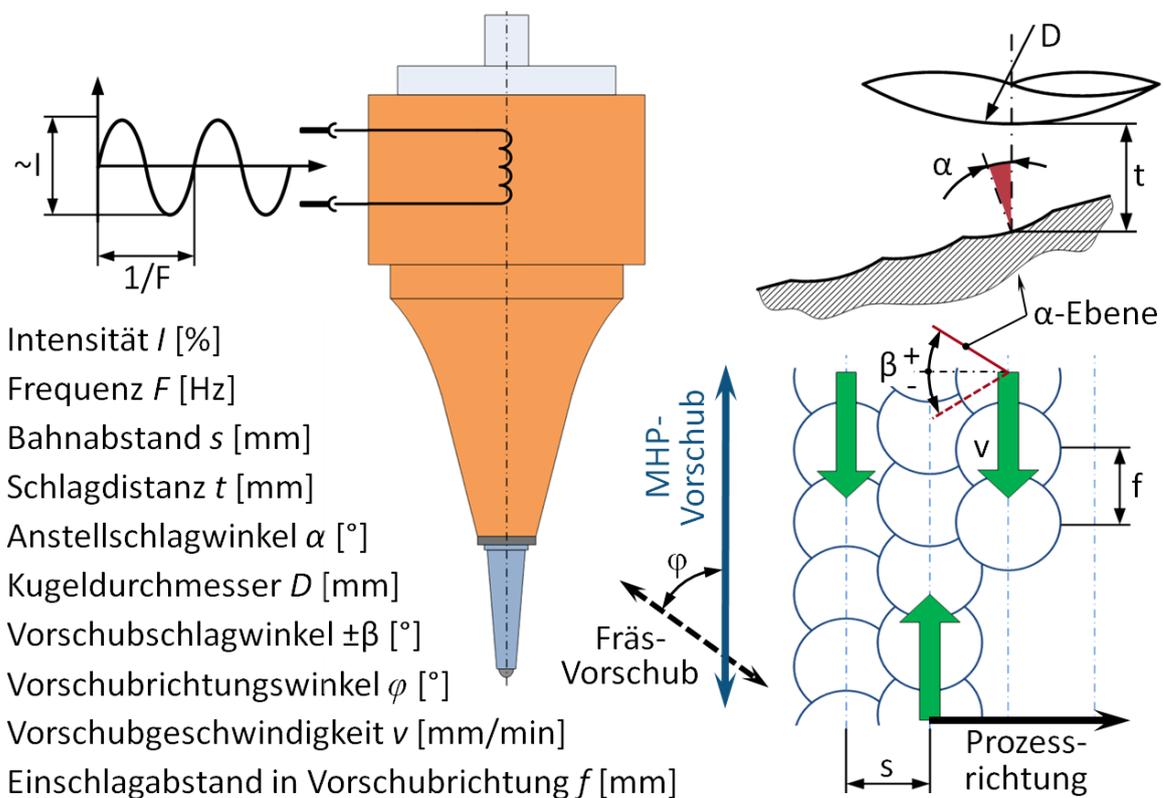


Abbildung 10: Illustration der wesentlichen MHP-Prozessparameter

Dabei kann zunächst, wie in Kapitel 4.1.1 dargestellt, die Arbeitsbewegung des Werkzeuges über die stufenlose Einstellung von Intensität (Intensity)  $I$  [%] und

Frequenz (Frequency)  $F$  [Hz] definiert werden. Nach Vorgabe eines Intensitätswertes ungleich Null, befindet sich das Stößelwerkzeug in einer oszillierenden Bewegung mit gegebener Frequenz. Die Amplitude dieser Bewegung wird dabei durch die eingestellte Frequenz beeinflusst, wobei eine Erhöhung der Frequenz zu einer Verringerung der Schwingungsamplitude führt.

Um den Bearbeitungsprozess zu beginnen, muss in einem ersten Schritt das oszillierende Werkzeug an die Werkstückoberfläche herangeführt werden. Als Folge dieser Annäherung tritt das Werkzeug bei Erreichen jenes Abstandes, der der Amplitude der freien Werkzeugschwingung entspricht und im Folgenden als Zündhöhe bezeichnet werden soll, zum ersten Mal in Kontakt mit der Oberfläche. Durch die Rückprallenergie, die im Zuge dieses ersten Stoßvorgangs für den Prozess zur Verfügung steht, wird die bewegte Masse stark in Richtung des Aktuator-Gehäuses beschleunigt. Dadurch kommt es in weiterer Folge zu einem Gegenschlag an der Aktuator-Rückwand, welcher wiederum das Schlagwerkzeug in Richtung des Werkstückes stößt. Diese wechselseitigen Stoßvorgänge des Auftreffens auf der Werkstückoberfläche und des Gegenschlages am Gehäuse stellen eine maßgebliche Energiequelle für den Oberflächenbearbeitungsprozess dar. Die zusätzliche Bewegungsenergie führt dazu, dass der Abstand zwischen Stößelspitze und Werkstück nach dem „Zünden“ (Erreichen der Zündhöhe) deutlich über die freie Schwingungsamplitude hinaus erhöht werden kann. Der letztlich im Zuge der Bearbeitung vorgegebene Abstand zwischen Werkzeugspitze und Werkstückoberfläche wird im Zuge dieser Arbeit als Schlagdistanz (Peening distance)  $t$  [mm] bezeichnet. Es ist hierbei anzumerken, dass dieser Parameter nicht beliebig erhöht werden kann. In Abhängigkeit des zu bearbeitenden Werkstoffs und der frequenzabhängigen Freischwingungsamplitude kann der Prozess ab einer gewissen Entfernung von Werkzeug zu Werkstück nicht mehr aufrecht erhalten werden. Bei Überschreiten dieses Wertes (für Stahlwerkstoffe bei einer gegebenen Frequenz von 200Hz etwa 1,3mm) verliert das Werkzeug den Kontakt zur Oberfläche, wodurch die Rückprallenergien für den Prozess verloren gehen und das Werkzeug ohne Oberflächenkontakt in freier oszillierender Bewegung über dem Werkstück schwingt. Dieser Effekt wird in der vorliegenden Arbeit auch als „Abreißen“ des Prozesses bezeichnet.

Nach dem oben beschriebenen Zündvorgang, welcher im Zuge der Programmerstellung mittels accurapuls CAM-Software durch die Verwendung von Kantenschutzstrategien gewährleistet wird (siehe dazu Kapitel 5.5), wird das Werkzeug durch die Werkzeugmaschine in der vorgegebenen Schlagdistanz über die Werkstückoberfläche geführt. Im Zuge einer Bearbeitungsbahn werden dadurch einzelne Schläge des Werkzeugs mit halbkugelförmiger Spitze des

Kugeldurchmessers (Sphere diameter)  $D$  [mm] auf der Werkstückoberfläche aneinandergereicht. In Vorschubrichtung ergibt sich dabei der Abstand zwischen den einzelnen Schlägen (Distance between two hits)  $f$  [mm] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit (Feed rate)  $v$  [mm/min] und der Schlagfrequenz zu:

$$f \text{ [mm]} = \frac{v \text{ [mm/min]} / 60 \text{ [s/min]}}{F \text{ [Hz]}} \quad (12)$$

Durch das Aneinanderreihen einzelner Bearbeitungsbahnen in einem durch das Maschinenprogramm vorgegebenen Bahnabstand (Line pitch)  $s$  [mm] kann in weiterer Folge eine flächige Bearbeitung durch den Prozess realisiert werden, deren Fortschrittsrichtung als Prozessrichtung (Process direction) bezeichnet wird. Die Ausrichtung der Vorschubgeschwindigkeit des MHP-Prozesses zur Vorschubrichtung der vorangegangenen Fräsbearbeitung wird hierbei durch den Vorschubrichtungswinkel (kurz Vorschubwinkel oder Feed direction angle)  $\varphi$  [°] gegeben.

Im Falle einer nicht orthogonal erfolgenden Schlagführung wird der Winkel von Stößelachse zur Oberflächennormalen des Werkstücks als Anstellschlagwinkel (Inclination impact angle)  $\alpha$  [°] bezeichnet. Um die Ausrichtung der diesem Winkel zugrundeliegenden Ebene („ $\alpha$ -Ebene“, siehe Abbildung 10) zur Vorschubrichtung des MHP-Prozesses zu beschreiben, wird zudem der Vorschubschlagwinkel (Feed impact angle)  $\beta$  [°] eingeführt. Der Parameter ist dabei mit einem Größenordnungsbereich von  $0^\circ$  bis  $\pm 180^\circ$  definiert und wird ausgehend von der normal auf die Vorschubrichtung stehenden Ebene derart bemessen, dass ein Winkel von  $\beta = 0^\circ$  einen gänzlich in Richtung des Prozesses ausgerichteten Schlag bezeichnet. Diese Ausrichtung, in Folge derer die Werkzeugachse in Richtung der vorangegangenen Bearbeitungsbahnen geneigt ist, liegt in gewissen Teilen auch für Winkelwerte von  $|\beta| < 90^\circ$  vor. Ab einem Winkel von  $|\beta| > 90^\circ$  stellt sich hingegen eine teilweise, für  $\beta = \pm 180^\circ$  eine gänzliche, Schlagausrichtung gegen die Prozessrichtung ein. Über das Vorzeichen des Winkels wird letztlich nach ziehender (Pulled-) und stoßender (Pushed treatment) Bearbeitung unterschieden. Dabei nimmt  $\beta$  im Falle der stoßenden Bearbeitung (Schlagausrichtung zu gewissen Teilen in Richtung des Vorschubes) positives Vorzeichen an, wobei hier eine aus dem nicht orthogonalen Schlag resultierende Geschwindigkeitskomponente in Richtung des Maschinenvorschubs weist. Bei ziehender Bearbeitung ist hingegen eine aus der Anstellung des Werkzeugs resultierende Auftreffgeschwindigkeitskomponente gegen den Maschinenvorschub gerichtet. Da sich die Geschwindigkeiten dabei unter einer gewissen Winkelkombination aufheben können, sei der Vorschubschlagwinkel hier negativ definiert (siehe Illustration in Abbildung 10).

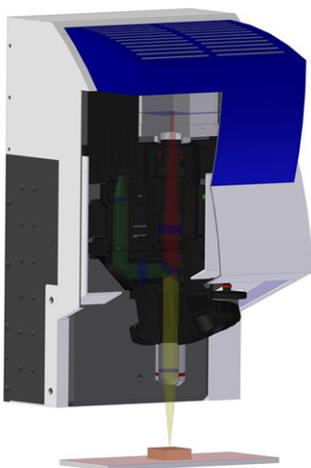
## 4.3 Messmethoden und Messmittel

### 4.3.1 Oberflächentopographieuntersuchungen

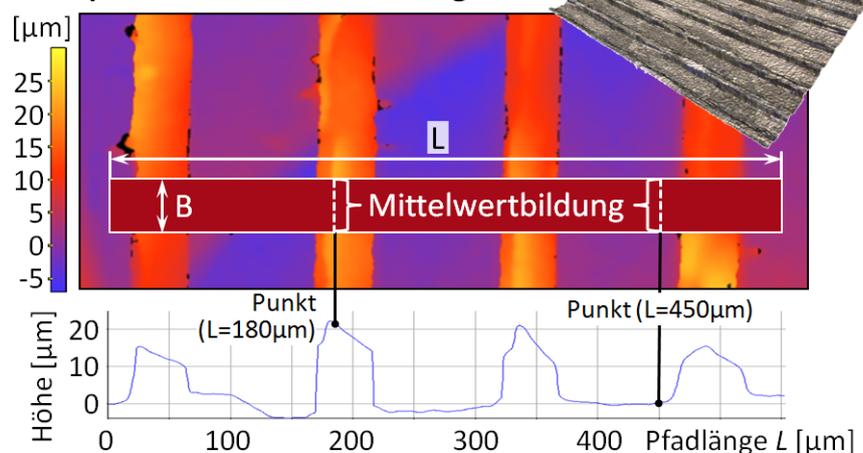
Zur Analyse der Topographien MHP-behandelter Oberflächen kam ein 3D-Oberflächenmesssystem InfiniteFocus der Firma Alicona zur Anwendung. Dieses auf dem Messprinzip der Fokus-Variation basierende System nutzt die geringe Schärfentiefe der Optik, um die Tiefeninformation einer Oberfläche zu extrahieren. Dabei wird unter fortlaufender Variation des Abstandes zwischen Optik und Messobjekt die Änderung der Schärfe abhängig von der Topographie der Oberfläche relativ zum Abstand der Optik gemessen und eine dichte 3D-Repräsentation der Oberfläche erzeugt (siehe Abbildung 11). Dieser Messdatensatz kann in weiterer Folge mittels geeigneten Messmodulen vermessen werden (vgl. [32] S.1f).

Zum größten Teil kommt hierbei das Messmodul Profilformmessung zum Einsatz, welches es erlaubt, Profilschnitte anhand der gemessenen Oberflächentopographie zu extrahieren. Zu diesem Zweck wird, wie in Abbildung 11 dargestellt, zunächst ein Profilpfad einer gewissen Breite (beschrieben durch eine Anzahl von Datenpunkten) und Länge in einer zweidimensionalen Abbildung des Messdatensatzes definiert. Für jeden einzelnen Längenspunkt des Pfades wird nun (bei den im Zuge dieser Arbeit verwendeten Einstellungen) die Höhe des Punktes als arithmetischer Mittelwert der Höheninformation der Datenpunkte entlang der vorgegebenen Pfadbreite gebildet. Das so fortlaufend über die gesamte Pfadlänge erstellte Höhenprofil (Querschnittsprofil) kann dann im Zuge der Auswertung näher betrachtet und vermessen werden (vgl. [32] S.85ff).

#### Prinzip der Fokusvariation



#### Messdatensatz in Real und Falschfarben mit Profilpfad der Breite $B$ und Länge $L$ :



#### Anhand des obigen Pfades extrahiertes Querschnittsprofil

Abbildung 11: Messprinzip der Fokusvariation (links, [32]) und Illustration der Extrahierung von Schnittprofilen mittels Profilformmessung (rechts)

### **4.3.2 Ermittlung der Oberflächenrauheitswerte**

Die im Zuge dieser Arbeit präsentierten Oberflächenrauheitswerte wurden mit einem auf dem Tastschnittverfahren basierenden Rauheitsmessgerät MarSurf PS1 (Mahr) erhoben. Die angegebenen Messergebnisse stellen, sofern nicht näher erläutert, jeweils den arithmetischen Mittelwert von sechs Einzelmessungen dar. Die Streuung dieser Einzelmesswerte wird durch deren Standardabweichung gegeben.

### **4.3.3 Messtechnische Erfassung von Oberflächenhärtewerten**

Zur Ermittlung des Oberflächenhärtezustandes wurde zum einen ein TIV (Through-Indenter-Viewing)-Härteprüfgerät der Firma Krautkrämer verwendet, wobei eine Messsonde mit 10N Prüfkraft (Modell P101) zur Anwendung kam. Die Härteprüfung im Zuge des TIV-Verfahrens basiert auf einem als Eindringkörper fungierenden Vickersdiamanten, auf welchem die Prüfkraft manuell über eine Feder aufgebracht wird. Über eine in die Prüfsonde integrierte CCD-Kamera wird bei Erreichen der Prüfkraft durch den Eindringkörper hindurch eine Aufnahme des erzeugten Eindrucks erstellt. Die Härte des Messobjekts wird damit unter Last gemessen und gemäß der Definition der Vickershärte aus den Diagonalenlängen des Eindrucks abgeleitet (vgl. [33] S.1-7f).

Darüber hinaus wurde für die Bestimmung der in Kapitel 6.1 angeführten Härtewerte ein auf dem Institut für Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnologie (TU-Wien) zur Verfügung stehendes Härtemessgerät (Microdur II / Krautkramer Branson) herangezogen, welches auf dem UCI (Ultrasonic-Contact-Impedance)-Verfahren basiert. Die genaue Spezifikation sowie das zugrunde liegende Messverfahren dieses Messgeräts werden im Zuge der Versuchsbeschreibung des genannten Kapitels dargestellt und erläutert (siehe Kapitel 6.1.1).

## **4.4 Untersuchungswerkstoffe**

Im Folgenden werden jene Werkstoffe dargestellt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit intensivere Betrachtung finden. Es wurde dabei, wie bereits anhand von Kapitel 3 ausgeführt, insbesondere ein Schwerpunkt auf industriell relevante Werkstoffe gelegt, für welche die Auswirkungen einer mechanischen MHP-Oberflächenbehandlung zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht im Detail abgeschätzt werden können.

### **4.4.1 Unlegierter Vergütungsstahl C45E (1.1191)**

Der unlegierte Vergütungsstahl, dessen chemische Zusammensetzung in Tabelle 3 angegeben ist, wird mit der Kurzbezeichnung C45E unter der Werkstoffnummer 1.1191 geführt. Der Stahl findet für mittlere Beanspruchungen ein breites

Anwendungsfeld im Kraftwagen-, Motoren-, Maschinen- und Apparatebau (vgl. [34] S.25).

*Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung C45E (1.1191)\**

<b>1.1191</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>
%	0,44	0,26	0,6	0,008	0,029	0,07	0,03	0,08

\* ... entnommen aus [34] S. 25.

#### 4.4.2 Hochlegierter Kaltarbeitsstahl X155CrVMo 12-1 (1.2379)

Mit der Werkstoffnummer 1.2379 wird der ledeburitische Kaltarbeitsstahl X155CrVMo 12-1 bezeichnet, dessen chemische Zusammensetzung anhand von Tabelle 4 gegeben ist. Der Werkstoff zeichnet sich aufgrund des erhöhten Vanadium (V)-Gehalts durch eine hohe Verschleißfestigkeit aus. Hierdurch findet der Stahl vielseitigen Einsatz für Bauteile und Komponenten, die im Zuge ihrer Nutzung eine hohe mechanische Belastung erfahren. Beispiele der Anwendungsfelder liegen hierbei unter anderem bei Tiefzieh- und Fließpresswerkzeugen, Abkantbacken und Schneidmessern sowie Umform- und Biegewerkzeugen.

*Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung X155CrVMo 12-1 (1.2379)\**

<b>1.2379</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>W</b>	<b>V</b>	<b>S</b>
%	1,55	0,30	0,30	12,0	0,18	0,70	0,18	0,80	0,013

\* ... Lieferantangaben: Fa.: C. & H. WÖLS GmbH, A-2542 Kottlingbrunn.

#### 4.4.3 Rost- und säurebeständiger Stahl X3 CrNiMo 13-4 (1.4313)

Bei dem Chrom-Nickel-Stahl X3CrNiMo 13-4 (1.4313) handelt es sich durch den vergleichsweise geringen Nickel-Gehalt um einen ferritisch/martensitischen Stahl. Der Werkstoff mit der chemischen Zusammensetzung nach Tabelle 5 findet seine hauptsächliche Anwendung als Werkstoff für Wasserkraftwerksturbinen, Hochdruckpumpen- und Kompressorenbauteile und wird darüber hinaus auch im Schiffsbau und in der Erdöl- und petrochemischen Industrie eingesetzt (vgl. [35]).

*Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung X3 CrNiMo 13-4 (1.4313)\**

<b>1.4313</b>	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>N</b>
%	max. 0,05	12,00- 14,00	3,50- 4,50	0,30- 0,70	min. 0,02

\* ... entnommen aus [35].

#### 4.4.4 Aluminiumlegierung AlMgSi 0,5 (AA6060; 3.3206)

Die Aluminiumlegierung AlMgSi 0,5 (3.3206), welche auch als AA6060 bezeichnet wird, findet ob ihrer hervorragenden Korrosionseigenschaften und der geringen Dichte vielseitige Anwendung. Auch aufgrund der guten Schweiß-, Kaltumform- und Eloxierseigenschaften der Legierung kommt der Werkstoff insbesondere in der Automobilindustrie und im Schienenverkehrsbau zum Einsatz. Die Legierung, deren Legierungsbestandteile Tabelle 6 entnommen werden können, weist zudem eine hohe Beständigkeit gegen Witterung und Meerwasser sowie ein ausgezeichnetes Warmumformverhalten auf (vgl. [36] S.18).

Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung AlMgSi 0,5 (3.3206)\*

<b>3.3206</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>
%	max. 97,8	max. 0,05	max. 0,1	0,1- 0,3	0,35- 0,6	max. 0,1	0,3- 0,6
	<b>Ti</b>	<b>Zn</b>	<b>andere einzeln</b>		<b>andere gesamt</b>		
%	max. 0,1	max. 0,15	max. 0,05		max. 0,15		

\* ... entnommen aus [36] S.18.

Die hier gegebenen Werkstoffe wurden im Zuge der im Folgenden dargestellten Untersuchungen teilweise in einem thermisch gehärteten Ausgangszustand betrachtet. Die hierbei vorliegenden Oberflächenhärtewerte werden in einem solchen Fall in der Versuchsbeschreibung des jeweiligen Kapitels angeführt.

## 5 Wirkungsweise des Modifikationsprozesses

Die im Zuge dieses Kapitels dargestellten Untersuchungen verfolgen das Ziel, die Oberflächen und Materialmodifikation infolge einer MHP-Behandlung näher zu betrachten. Diese basiert letztlich auf der systematischen Umformung des Werkstoffs, wobei ausgehend von einzelnen, aneinandergereihten Einschlägen der meist kugelförmigen Werkzeugspitze eine bahnweise Bearbeitung der Oberfläche erfolgt. Abbildung 12 illustriert diese Prozessschritte und stellt die hierbei jeweils maßgeblichen Einflussgrößen (Parameter) dar.

<b>Oberflächenmodifikation:</b>		
Einzeleinschlag	Bearbeitungsbahn	Oberflächenbearbeitung
<b>Prozessparameter:</b>		
Schlagdistanz $t$ Kugeldurchmesser $D$	Frequenz $F$ Vorschub $v$ } $f$	Bahnabstand $s$
<b>Systemparameter:</b>		
Material		

Abbildung 12: Prozess der MHP-Oberflächenbehandlung und deren Haupteinflussparameter

Im Folgenden wird nun in einem ersten Schritt die Auswirkung der Prozessparameter Schlagdistanz und Kugeldurchmesser auf die geometrische Form von einzelnen Kugeleinschlägen untersucht. Zudem wird anhand von isoliert betrachteten Bearbeitungsbahnen unter anderem der Einfluss des Abstandes zwischen den Einzeleinschlägen  $f$  analysiert. Letztlich findet durch die Untersuchung aneinandergereihter Bahnen die Materialumformung im Zuge der zeilenweisen MHP-Oberflächenbehandlung Betrachtung.

Neben der messtechnischen Erfassung der prozessparameterabhängigen Materialverteilung, welche für unterschiedliche Werkstoffe durchgeführt wird, soll zudem die Auswirkung des Schlagprozesses auf das Materialgefüge untersucht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse werden letztlich zur Entwicklung von optimierten Bearbeitungsstrategien genutzt.

## 5.1 Parametereinfluss auf die plastische Deformation

### 5.1.1 Auswirkung der Schlagdistanz

Die dargestellte Untersuchung verfolgt das Ziel, das Umformpotential des MHP-Prozesses in Abhängigkeit einer variierten Schlagdistanz  $t$  zu untersuchen. Es sollen hierbei Abdrücke einzelner Einschläge des Schlagwerkzeugs betrachtet werden, welche es durch ihre geometrische Form erlauben, die Auswirkung der Parametervariation auf einfachem Wege messtechnisch zu erfassen und zu beurteilen. Derartige Einzeleinschlagabdrücke wurden im Zuge der Untersuchung durch die Wahl einer entsprechend hohen Vorschubgeschwindigkeit ( $v=30.000\text{mm/min}$ ) auf der Oberfläche des hier betrachteten Untersuchungswerkstoffes C45E (1.1191) erzeugt. Es wurde dabei bei Vorgabe des maximalen Intensitätswertes  $I=100\%$  ein Werkzeug mit halbkugelförmiger Spitze des Durchmessers  $D=6\text{mm}$  verwendet. Die Schlagdistanz  $t$  wurde für die Erstellung einzelner Bahnen ausgehend von  $t=0,2\text{mm}$  jeweils um  $0,1\text{mm}$  erhöht, bis letztlich der Prozess bei Vorgabe eines Wertes von  $t=1,4\text{mm}$  nach einem kurzen Verfahrenweg der Maschine „*abris*“ (Begriffsdefinition: „*Abreißen*“ des Prozesses, siehe Kapitel 4.2).

Durch dieses Vorgehen konnte sichergestellt werden, dass die im Folgenden untersuchten Eindrücke lediglich durch einen einzelnen Einschlag des MHP-Werkzeugs auf der Oberfläche resultieren. Obgleich dies auch durch eine Reduzierung der Schlagfrequenz bei verhältnismäßig geringeren Vorschubgeschwindigkeitswerten erreicht werden könnte, wurde auf eine derartige Reduktion verzichtet und für diesen Parameter der im Rahmen dieser Arbeit in erster Linie angewendete Wert von  $F=200\text{Hz}$  gewählt. Auf diese Weise soll ein Rückschluss durch die an dieser Stelle erarbeiteten Ergebnisse auf die in den übrigen Versuchen untersuchte Oberflächenmodifikation ermöglicht werden. Es muss aber angemerkt werden, dass aufgrund einer derart hohen Vorschubgeschwindigkeit die Wirkkräfte in der Wechselwirkungszone beispielsweise durch zusätzliche Reibkräfte beeinflusst sein könnten.

Abbildung 13a zeigt die mittels einer Schlagdistanz von  $t=1,3\text{mm}$  erstellten, linienförmig auf der Oberfläche angeordneten Einschläge anhand einer Oberflächentopographiemessung des InfiniteFocus-Messsystems. Wie auch anhand des unten dargestellten 3D-Datensatzes ersichtlich ist, handelt es sich um kugelsegmentartige, plastische Verformungen. Eine elliptische Ausprägung der Einschläge, wie sie infolge der hohen Vorschubgeschwindigkeit erwartet werden könnte, konnte im Zuge der Untersuchung nicht beobachtet werden. Zudem wird anhand der Abbildung die Vorgehensweise im Zuge der messtechnischen Versuchsauswertung illustriert.

a) Linie von Einzeleinschlägen ( $v=30.000\text{mm/min}$ ;  $t=1,3\text{mm}$ ; 10-fach Objektiv)

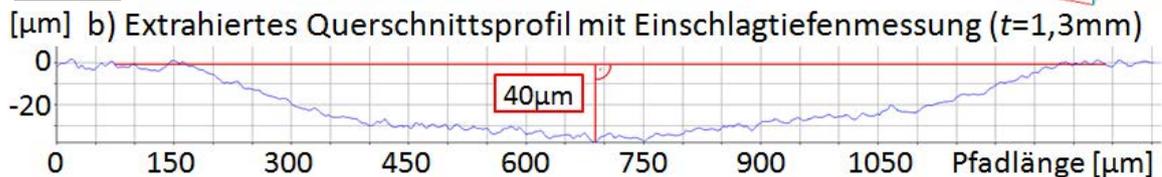
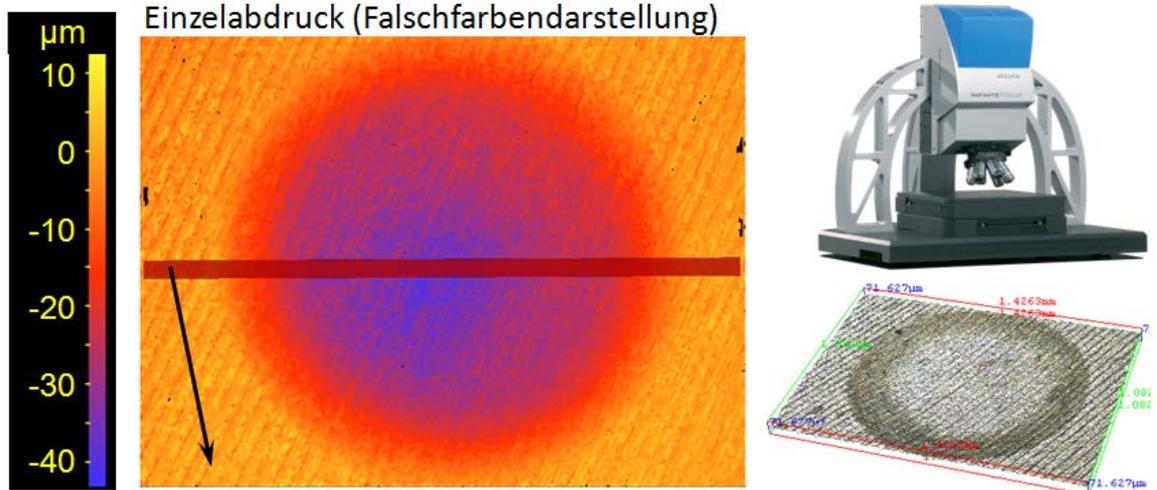


Abbildung 13: Messtechnische Auswertung der Einzeleinschlagabdrücke:  
 a) Durchmesserbestimmung anhand von 2D-Bildmessung  
 b) Einschlagtiefenmessung am Querschnittsprofil (vgl. [37])

Dabei wurden anhand einer 2D-Bildmessung die Durchmesser der kreisrunden Einschläge sowie durch Extrahieren von Schnittprofilen deren Tiefe in der Einschlagmitte gemessen.

Eine Betrachtung der erhobenen Messwerte, welche anhand von Abbildung 14 dargestellt sind, zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Einschlaggeometrie von der vorgegebenen Schlagdistanz. Sowohl der Einschlagdurchmesser als auch dessen Tiefe, welche sich in naheliegender Weise gegenseitig bedingen, steigen in annähernd linearer Weise mit einer Erhöhung der Distanz  $t$  an.

Dies verdeutlicht anhand der resultierenden plastischen Deformation den maßgeblichen Einfluss dieses Faktors auf das Umformpotential des MHP-Prozesses. Dieser kann dabei dadurch nachvollzogen werden, dass die Schlagdistanz als Arbeitshub die für den Prozess nutzbare Beschleunigungslänge darstellt. Eine Erhöhung der Schlagdistanz führt daher zu einer höheren Auftreffgeschwindigkeit, welche durch den höheren resultierenden Impuls letztlich auch zu einer höheren Einschlagkraft führt. Die messbare Vergrößerung des plastisch deformierten Einschlagbereichs stellt letztlich das Resultat dieses Zusammenhangs dar.

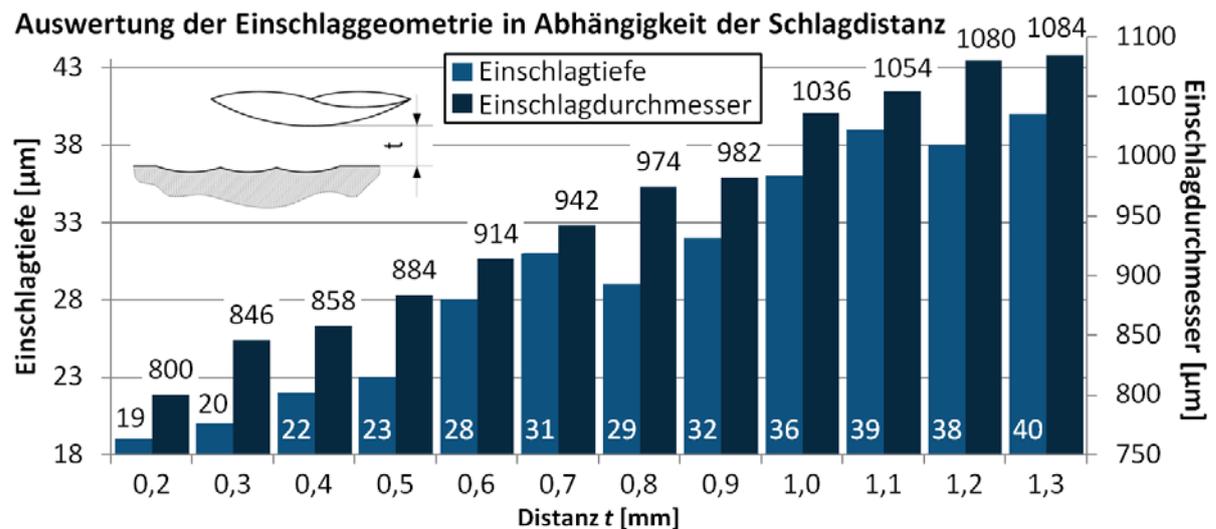


Abbildung 14: Ergebnisse der Einschlagtiefenmessung (linke Skala) sowie der Bestimmung des Einschlagdurchmessers (rechte Skala)

Der hier anhand der plastischen Deformation ermittelte Schlagdistanzeinfluss kann übereinstimmend mit den in [20] angeführten Bemerkungen (siehe Kapitel 2.4; vgl. [20] S.97) gegeben werden und wurde auch anhand von messtechnischen Untersuchungen der Schlagkraft nachgewiesen. Wie in [13] dargestellt, wurde dabei die Schlagkraft nahe der Wirkstelle durch Zuhilfenahme eines Stößels mit applizierten Dehnungsmessstreifen ermittelt. Auf diese Weise konnte eine deutliche Erhöhung der Schlagkraft infolge einer Steigerung der Schlagdistanz messtechnisch nachgewiesen werden. Dieses Resultat wurde zu einem späteren Zeitpunkt auch durch Trauth et. al. in [48] anhand von Kraftmessungen an einem Probenwerkstück, welches zur Aufnahme der Vertikalkräfte auf einer Messplattform (Kraftmessdose) gespannt wurde, nachvollzogen.

### 5.1.2 Untersuchungen an unterschiedlichen Werkstoffen

Neben der Schlagkraft stellen die Geometrie des Eindringkörpers sowie die Werkstoffeigenschaften (Festigkeit, Härte) des zu verformenden Materials maßgebliche Einflussgrößen für die auf der Oberfläche verbleibende, plastische Deformation dar.

Aus diesem Grund wurden wiederum durch die Wahl einer entsprechend hohen Vorschubgeschwindigkeit mittels Werkzeugen des Kugeldurchmessers  $D=6\text{mm}$ ,  $D=8\text{mm}$  und  $D=10\text{mm}$  Einzeleinschlagabdrücke auf unterschiedlichen Materialien erstellt und bewertet. Hierdurch soll neben dem Einfluss der Schlagdistanz, welche auf den Werten  $t=0,2\text{mm}$ ,  $t=0,6\text{mm}$  und  $t=1,0\text{mm}$  untersucht wird, der Einfluss des Versuchswerkstoffes sowie der Werkzeuggeometrie auf das Umformpotential des MHP-Prozesses näher beleuchtet werden.

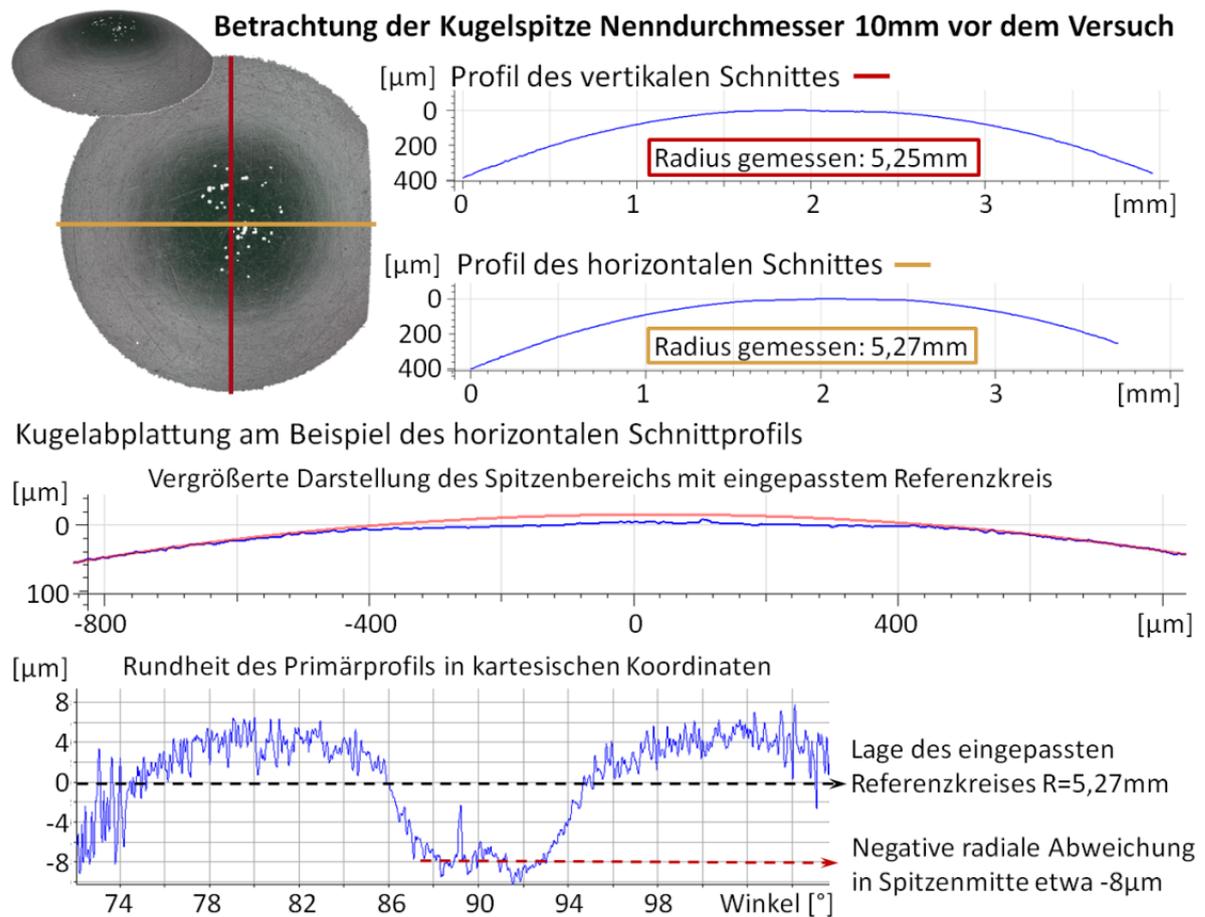
Die betrachteten Versuchswerkstoffe sollten dabei in Bezug auf deren Härte eine möglichst große Bandbreite repräsentieren. Aus diesem Grund wurden die Werkstoffe C45E (1.1191) sowie X155CrVMo 12-1 (1.2379) sowohl im normalisierten als auch im thermisch gehärteten Ausgangszustand betrachtet. Zudem wurde neben einem weiteren Stahlwerkstoff X3 CrNiMo 13-4 (1.4313) auch der Aluminiumlegierungswerkstoff AlMgSi 0,5 (3.3206) in die Untersuchung mit einbezogen.

Tabelle 7 zeigt eine Zusammenstellung der im Zuge der Untersuchung betrachteten Werkstoffe sowie deren Vorbearbeitung und Oberflächenhärte, die unter Zuhilfenahme des TIV-Härtemessgerätes (Prüfkraft 10N) ermittelt wurde. Die gegebenen Härtewerte stellen dabei Mittelwert und Standardabweichung aus jeweils sechs Einzelmessungen dar. Neben dieser Erhebung des Härtezustandes der Untersuchungswerkstoffe wurde im Vorfeld der Versuche zudem eine genaue messtechnische Bewertung der Kugelspitzenformen der verwendeten Werkzeuge durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die Spitzen der Werkzeuge mit dem InfiniteFocus-Messsystem erfasst und deren Rundheit anhand von Profilschnitten in unterschiedlichen Richtungen bestimmt.

Wie anhand von Abbildung 15 dargestellt, konnte dabei für das Werkzeug mit Nenndurchmesser  $D=10\text{mm}$  eine für MHP-Werkzeuge typische Verschleißerscheinung, die Abplattung der Werkzeugspitze, festgestellt werden. Im Zuge einer Rundheitsmessung des Primärschnittprofils zeigt sich hierbei eine negative radiale Abweichung zu einem nach den kleinsten Abweichungsquadraten in das Profil eingepassten Referenzkreis. Für die vorliegende Werkzeugspitze kann diese Abweichung, wie im unteren Teil der Abbildung 15 dargestellt, in Spitzenmitte mit etwa  $-8\mu\text{m}$  angegeben werden.

*Tabelle 7: Untersuchte Werkstoffe und deren Ausgangszustand*

<b>Probenwerkstoff</b>	<b>Oberflächenhärte [HV]</b>	<b>Ausgangszustand der Oberfläche</b>
AlMgSi 0,5 (3.3206)	77 ± 8	Feingefräst
X3 CrNiMo 13-4 (1.4313)	251 ± 22	Geschliffen
C45E (1.1191)	198 ± 24	Geschliffen
C45E gehärtet	451 ± 60	Geschliffen
X155CrVMo 12-1 (1.2379)	217 ± 28	Geschliffen
1.2379 Vakuum gehärtet	604 ± 34	Geschliffen



**Abbildung 15: Messtechnische Untersuchung der Schlagwerkzeugspitze Kugelnennendurchmesser  $D=10\text{mm}$**

Eine ähnliche geometrische Abweichung konnte auch für den Stößel des Nenndurchmessers  $D=6\text{mm}$  erkannt werden. Dabei liegt auch für dieses Werkzeug eine Abplattung der Kugel an deren Spitze vor, die sich im Zuge der Rundheitsbetrachtung in einer negativen radialen Abweichung von etwa  $-6\mu\text{m}$  äußert. Im Gegensatz dazu zeigt die Betrachtung des Werkzeugs mit Nenndurchmesser  $D=8\text{mm}$  eine positive radiale Abweichung zum eingepassten Referenzkreis (siehe Abbildung 16). Eine derartige Abweichung lässt auf eine, im geringen Ansatz „kegelförmige“ Spitzengeometrie schließen. Des Weiteren sind anhand des gemessenen Datensatzes an diesem Stößel, wie im linken unteren Teil von Abbildung 16 ersichtlich, konzentrische Schleifriefen zu erkennen, die auf den Herstellungsprozess (NC-Schleifen) zurückgeführt werden können.

Ogleich durch die messtechnische Untersuchung für alle Werkzeuge Abweichungen der vorliegenden Spitzengeometrie zu einer idealen Kugelformen festgestellt werden konnten, wurde der Versuch in Hinblick darauf fortgesetzt, dass im Zuge einer realen Anwendung der MHP-Technologie im Regelfall ebenfalls keine ideal sphärischen Werkzeuge vorliegen dürften.

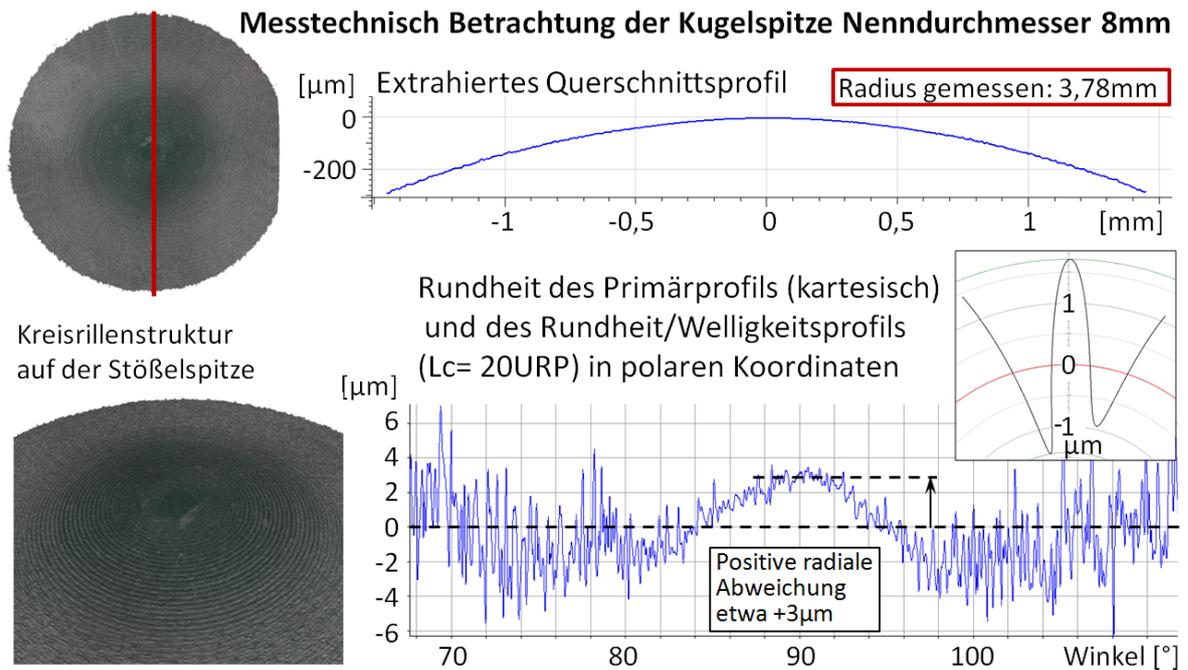


Abbildung 16: Untersuchung der Kugelspitze des Werkzeugs  $D=8\text{mm}$

Die nun bekannten Abweichungen von der idealen Werkzeugform sowie deren Auswirkungen sollen jedoch im Folgenden berücksichtigt und betrachtet werden. Abbildung 17 zeigt, dass die vorliegende Geometrie (Textur) des Werkzeuges in direkter Weise auf den verbleibenden Einschlagabdruck übertragen wird. So kann die Riefenstruktur des Werkzeugs mit Kugeldurchmesser  $D=8\text{mm}$  deutlich anhand der durch dieses Werkzeug erzeugten Abdrücke identifiziert werden. Diese genaue Übertragung der Werkzeuggeometrie auf das Werkstück stellt letztlich die Grundlage des im Zuge von Kapitel 7.1 thematisierten Strukturierungsansatzes mittels funktionell gestalteten Stößelspitzen dar und kann daher zweckmäßig genutzt werden.

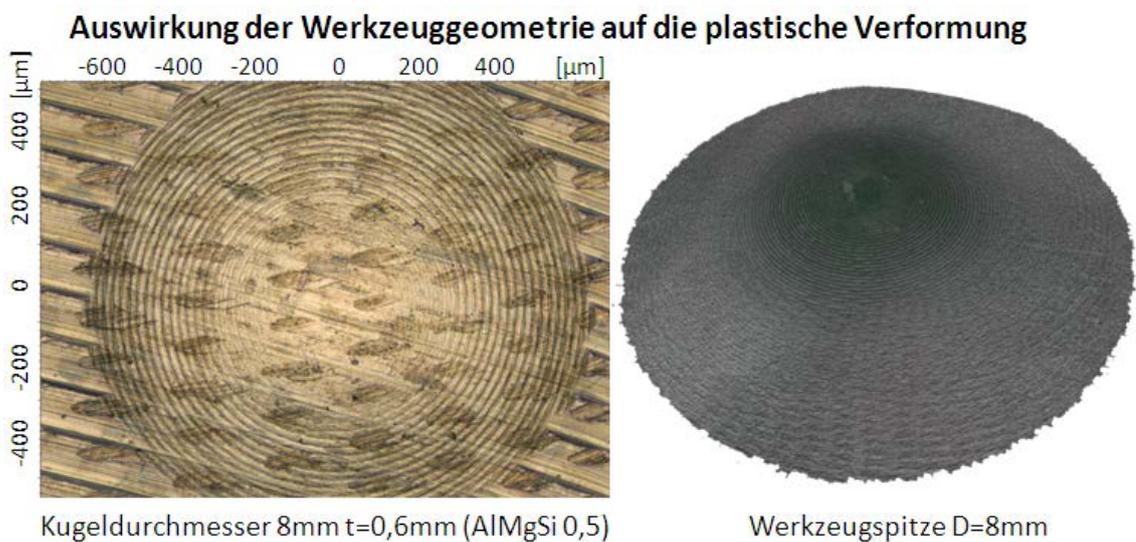


Abbildung 17: Übertragung der Werkzeugtextur auf die Probenoberfläche

Für die weitere Auswertung der an dieser Stelle dargestellten Untersuchung müssen allerdings die auf die Werkzeuggeometrie zurückzuführenden Abweichungen berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere ob der Tatsache, dass im Folgenden für die Bewertung des plastischen Eindrucks dessen Tiefe gemessen werden soll. Diese Messgröße konnte im Gegensatz zum Durchmesser der Abdrücke auch für sehr geringe plastische Deformationen auf den thermisch gehärteten Materialien bestimmt werden. Sie ist aber, wie nachvollzogen werden kann, deutlich durch eine etwaige Abplattung beziehungsweise Spitzenüberhöhung („Kegelform“) des Werkzeuges beeinflusst.

Abbildung 18 illustriert die Vorgehensweise bei der Ermittlung der im Folgenden diskutierten Tiefenwerte. Die resultierende Tiefe des jeweiligen Versuchs wurde, wie ersichtlich, als Mittelwert aus drei Tiefenmessungen an gesonderten Profilschnitten einzelner Abdrücke einer jeweiligen Einzelabdruckbahn bestimmt. Die an den untersuchten Materialien für die jeweiligen Schlagdistanzen und Kugeldurchmesser erhobenen Messergebnisse sind in Tabelle B I bis Tabelle B III des Anhangs zusammengefasst. Bei einem Vergleich dieser Werte zeigt sich letztlich auch die Auswirkung der im Vorfeld der Versuche nachgewiesenen Werkzeugformabweichungen.

#### Auswertung der Einschlagabdrucktiefe am Beispiel des ungehärteten Werkstoffs 1.2379

Messdatensatz **Kugeldurchmesser  $D=6\text{mm}$  / Schlagdistanz  $t=1,0\text{mm}$**

(10-fache Vergrößerung)

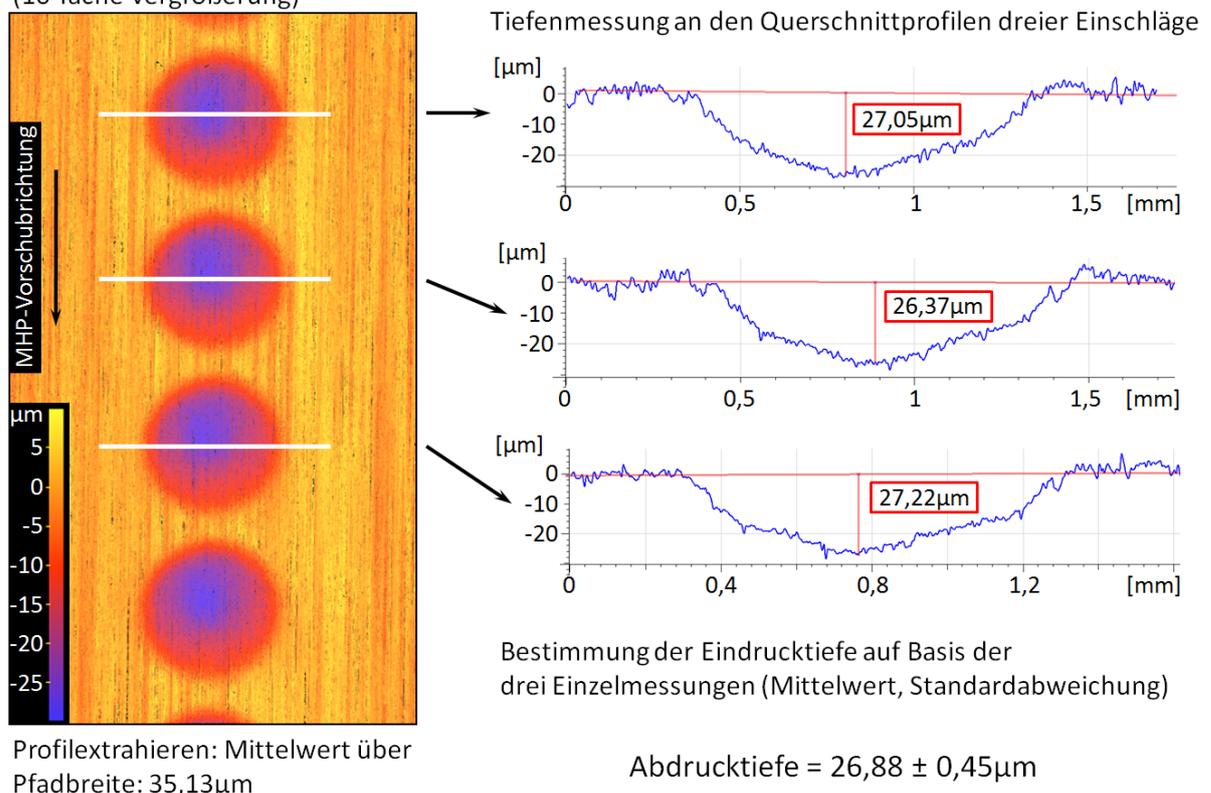


Abbildung 18: Auswertung der Einschlagabdrucktiefe

So wurden für die mit dem Werkzeug  $D=8\text{mm}$  erstellten Eindrücke im Allgemeinen die größten Tiefenwerte gemessen, welche selbst jene des Werkzeugs  $D=6\text{mm}$  übersteigen. Es muss dabei davon ausgegangen werden, dass dieser Umstand auf die „kegelförmige“ Geometrie des Werkzeugs  $D=8\text{mm}$  und die genaue Übertragung dieser auf die Werkstückoberfläche zurückzuführen ist, welche die Tiefe des verbleibenden Eindruckes erhöht.

Da die beiden übrigen Werkzeuge eine Abplattung der Kugelform aufweisen, mit welcher eine Reduktion der zu messenden Abdrucktiefe einhergehen dürfte, können die für diese Werkzeuge erhobenen Messwerte nur bedingt mit jenen des Werkzeugs  $D=8\text{mm}$  verglichen werden. Aus diesem Grund sollen im Folgenden die Ergebnisse des Werkzeugs  $D=8\text{mm}$  ausschließlich der Diskussion des Schlagdistanzeinflusses an den unterschiedlichen Materialien dienen. Der Einfluss des Kugeldurchmessers wird danach anhand der für die Werkzeuge  $D=6\text{mm}$  und  $D=10\text{mm}$  erhobenen Daten dargestellt.

Abbildung 19 zeigt die gemessenen Tiefen der mittels Kugeldurchmesser  $D=8\text{mm}$  erstellten Eindrücke. Die vor dem Versuch für die betrachteten Werkstoffe gemessene Oberflächenhärte ist im rechten unteren Teil der Abbildung dargestellt. Anhand der Messwerte kann zunächst der Einfluss der Schlagdistanz gezeigt werden. Unabhängig vom bearbeiteten Werkstoff ist dabei eine Erhöhung der Eindrucktiefe infolge einer Steigerung des Distanzwertes festzustellen.

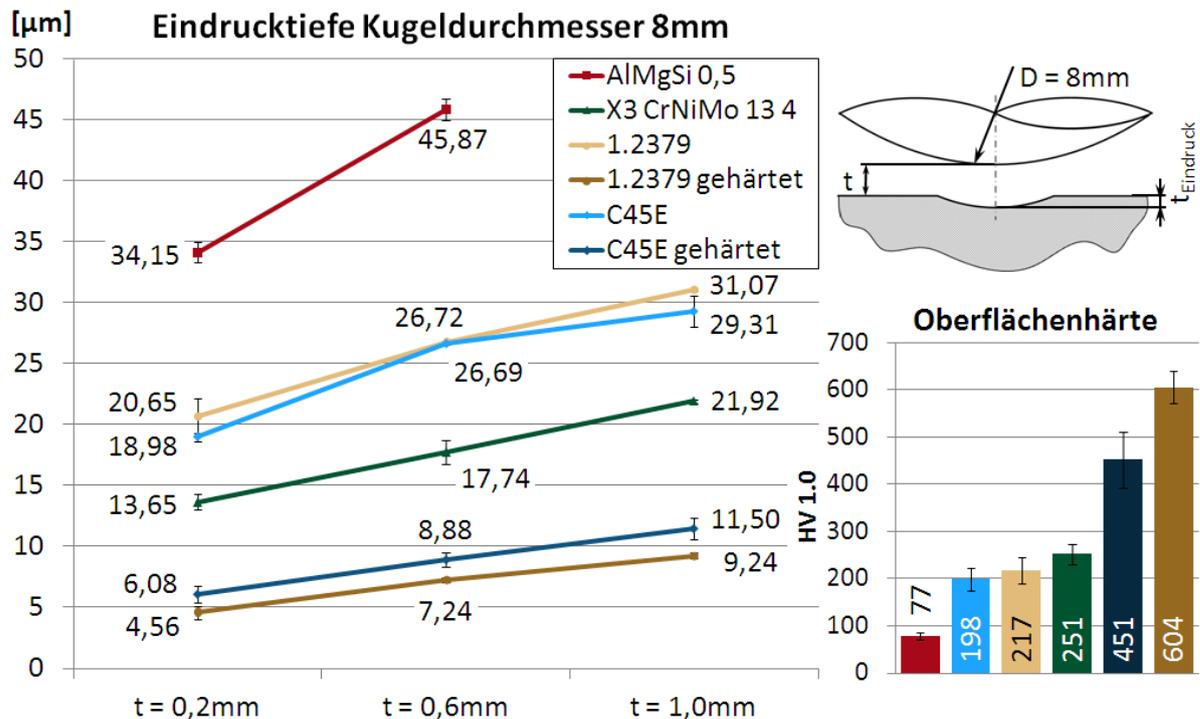


Abbildung 19: Gegenüberstellung der Einschlagabdrucktiefen erstellt mittels Kugeldurchmesser  $D=8\text{mm}$

Zudem zeigt sich die negative Korrelation von Materialausgangshärte und bleibender plastischer Deformation. In naheliegender Weise führt die Bearbeitung weicherer Ausgangsmaterialien zu tieferen plastischen Eindrücken auf dem Werkstoff. Die tiefsten Eindrücke konnten daher auf dem betrachteten Aluminiumwerkstoff gemessen werden, für welchen unter Vorgabe eines Schlagdistanzwerts von  $t=1,0\text{mm}$ , durch „Abreißen“ des Prozesses keine vollständige Einzeleinschlagbahn erstellt werden konnte.

Der signifikante Einfluss der Materialhärte führt auch dazu, dass in der Regel für härtere Werkstoffe ein hohes Glättungspotential durch den MHP-Prozess festgestellt werden kann. Dabei ist die Energie des Prozesses in den meisten Anwendungsfällen ausreichend um die, die Ausgangsoberfläche bestimmenden Topographiemerkmale (z.B.: Fräsriefen) umzuformen. Die Topographie der bearbeiteten Oberflächen wird daher zumeist durch die überlagerten Einzelabdrücke der MHP-Bearbeitung bestimmt (vgl. Kapitel 6.2). Im Falle von härteren Werkstoffen führt eine geringere verbleibende Abdrucktiefe damit letztlich auch zu geringen Rautiefen.

In ähnlicher Weise kann auch der aus dem Stand der Technik ableitbare positive Einfluss einer Erhöhung des Werkzeugkugeldurchmessers auf das Glättungsergebnis bereits anhand der Betrachtung von Einzeleinschlägen dargestellt werden. Abbildung 20 zeigt hierzu die Eindrücktiefen der Werkzeuge  $D=6\text{mm}$  und  $D=10\text{mm}$  an untersuchten Stahlwerkstoffen jeweils zweier Ausgangshärten. In sämtlichen Versuchen wird, wie anhand der Gegenüberstellung ersichtlich, durch die Verwendung des Werkzeugs mit größerem Kugeldurchmesser ein Eindruck geringerer Tiefe erzeugt. Dabei konnten für den härtesten Werkstoff die Eindrücke des Werkzeugs mit größtem Kugeldurchmesser nicht mehr repräsentativ messtechnisch erfasst werden.

Zusammenfassend zeigen damit alle hier untersuchten Parameter Einfluss auf die plastische Deformation im Zuge eines einzelnen Einschlags des MHP-Werkzeuges. Ein größerer Kugeldurchmesser, eine reduzierte Schlagdistanz sowie das Vorliegen eines härteren Probenwerkstoffes führen dabei zu geringeren Einzelabdrucktiefen. Zudem kommt es im Zuge des Einschlags zu einer exakten Übertragung der Kugelgeometrie, wobei die Eindrücktiefe deutlich durch etwaige Formabweichungen des Werkzeuges beeinflusst ist.

Da die oben genannten Parameterausprägungen als im Allgemeinen optimale Glättungseinstellungen erkannt werden können, dürften die dargestellten Einzeleindrücktiefen zudem einen gewissen Schluss auf die nach einer MHP-Bearbeitung resultierenden Oberflächenrauheitswerte erlauben.

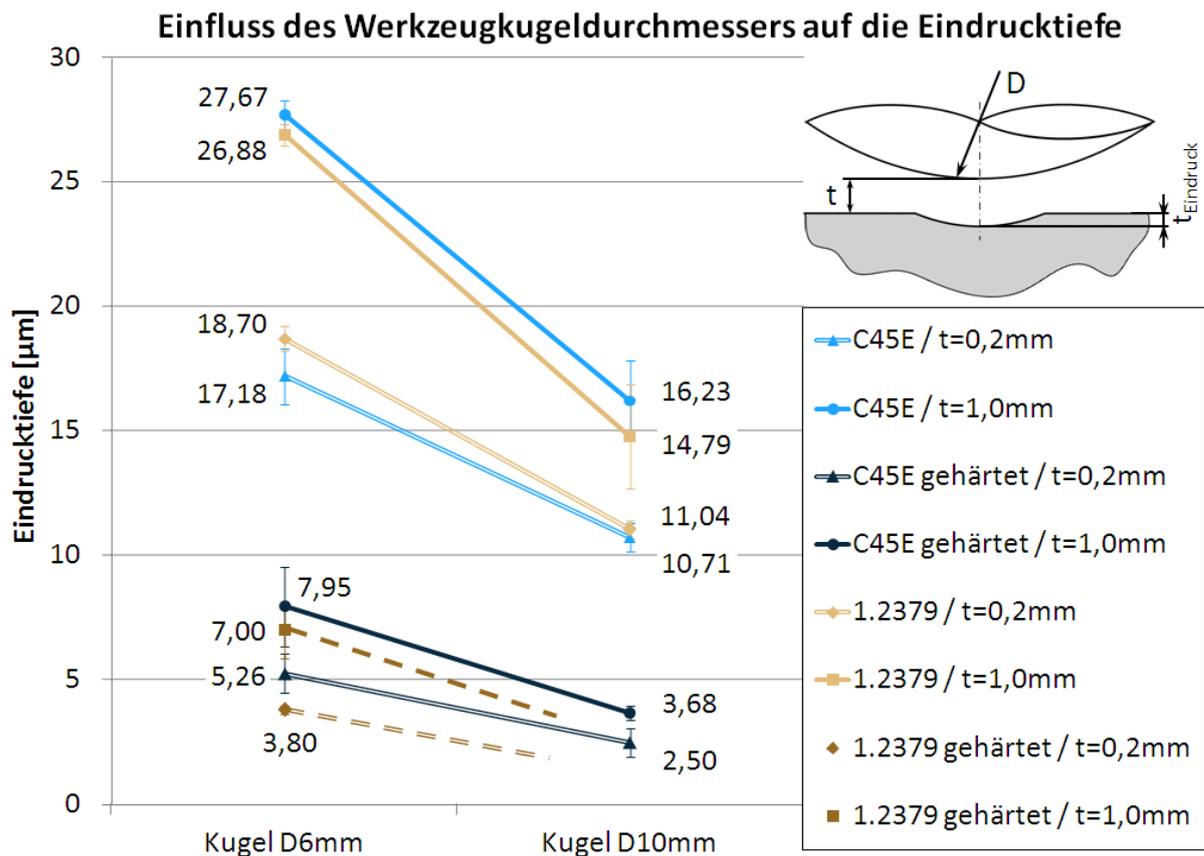


Abbildung 20: Einzeleindringtiefen in Abhängigkeit des verwendeten Werkzeugdurchmessers

Aus diesem Grund kann an dieser Stelle neben einem Einfluss der untersuchten Prozessparameter sowie des zu behandelten Werkstoffes auch der Einfluss der effektiven Werkzeugform auf die Oberflächenrauheit nach einer MHP-Bearbeitung nahe gelegt werden (vgl. Kapitel 6.2.2).

## 5.2 Superposition von Einschlägen infolge einer Bearbeitungsbahn

Anhand der folgenden Untersuchungen soll die Aneinanderreihung und Überlagerung einzelner Schläge des MHP-Werkzeugs im Zuge einer Bearbeitungsbahn betrachtet werden. Der Versuch wurde im direkten Anschluss an die im vorangegangenen Kapitelabschnitt dargestellte Untersuchung mit den beschriebenen Werkzeugen sowie auf den dargestellten Proben durchgeführt. Daher kann sowohl in Bezug auf die Kugelgeometrie der verwendeten Werkzeuge als auch in Bezug auf die Ausgangshärte und Vorbearbeitung der betrachteten Versuchsmaterialien auf diesen Abschnitt verwiesen werden.

Auf den betrachteten Werkstoffen (AlMgSi 0,5; C45E; X155CrVMo 12-1 gehärtet und ungehärtet) wurden jeweils unter der Vorgabe der Vorschubgeschwindigkeiten von  $v=6000\text{mm/min}$  und  $v=9600\text{mm/min}$  mittels einer einheitlichen Schlagfrequenz von  $F=200\text{Hz}$  einzelne Bearbeitungsbahnen erstellt. Dabei kamen im Zuge der

Untersuchungen für die Werkstoffe AlMgSi 0,5 und C45E bei einer vorgegebenen Schlagdistanz von  $t=0,6\text{mm}$  Werkzeuge des Kugeldurchmessers  $D=6\text{mm}$ ,  $D=8\text{mm}$  und  $D=10\text{mm}$  zum Einsatz. Für den härteren Kaltarbeitsstahl X155CrVMo 12-1 wurde hingegen lediglich das Werkzeug des Durchmessers  $D=8\text{mm}$  in Kombination mit einem Schlagdistanzwert von  $t=1\text{mm}$  eingesetzt.

Die Geometrie der erzeugten Bahnen wurde in weiterer Folge unter Zuhilfenahme des 3D-Oberflächenmesssystems InfiniteFocus (Alicona) mittels eines Objektivs zehnfacher Vergrößerung messtechnisch erfasst und ausgewertet. Im Zuge dieser Auswertung wurde, wie durch Abbildung 21 illustriert, anhand von Profilschnitten in Längsrichtung der erzeugten Bahnen (Profilbreite= $35\mu\text{m}$ ) der Abstand der einzelnen Einschlagabdrücke zueinander (durch die Messung der Spitzendistanz an drei Stellen; Mittelwert und Standardabweichung dieser Messwerte bilden das Messergebnis) sowie die Spitzenhöhe der Aufwerfungen zwischen den einzelnen Werkzeugabdrücken (ebenfalls anhand von drei, das Messergebnis bildenden Einzelmessungen) erhoben.

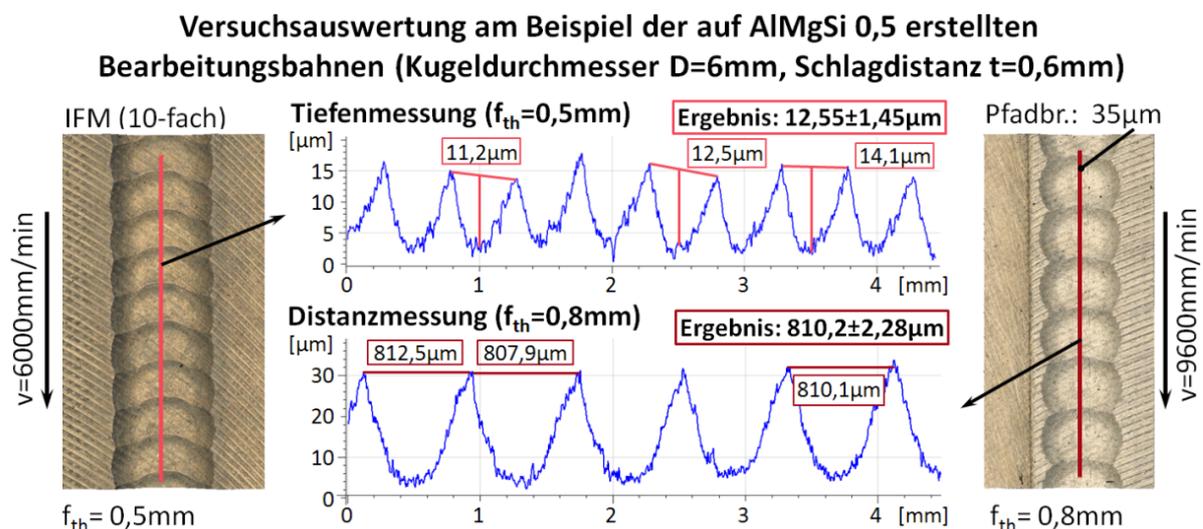


Abbildung 21: Auswertung der erzeugten Einzelbahnen am Beispiel des Werkstoffs AlMgSi 0,5 (3.3206)

Auf diese Weise sollte die Genauigkeit der Schlagführung im Zuge des MHP-Prozesses analysiert werden, wobei insbesondere die anhand von Gleichung (12) gegebene theoretische Abschätzung des Abstands der Einzeleinschläge (Distanzwert  $f$ ) überprüft werden sollte.

Zudem wird über die Messung der Höhe der im Profilschnitt längs einer Bearbeitungsbahn zwischen den einzelnen Einschlagabdrücken resultierenden, spitzenförmigen Materialanhäufungen eine Abschätzung der resultierenden

Oberflächenrauheit gegeben. Der erhobene Messwert kann dabei als Rautiefe des ungefilterten Primärprofils längs der erzeugten Bahn interpretiert werden.

Die gemessenen Werte dieser Rautiefe sollen im Folgenden sowohl einander, zwecks einer Abschätzung des Material- und Werkzeuggeometrieinflusses, als auch einer theoretischen Rautiefe  $R_{th}$  gegenübergestellt werden. Diese wurde für den jeweiligen Abstand der Einzeleinschläge  $f$  (bestimmt nach Gleichung (12)) und den verwendeten Werkzeugkugeldurchmesser  $D$  anhand der folgenden Gleichung bestimmt.

$$R_{th} = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2 - f^2}{4}} \quad (13)$$

Die Berechnung ergibt sich dabei aus einfachen geometrischen Zusammenhängen (siehe Abbildung 22) unter der idealisierten Annahme, dass sich das Schnittprofil längs einer Bearbeitungsbahn aus den einzelnen Abdrücken des MHP-Werkzeuges mit kreisförmigem Querschnitt (definiert durch dessen Nenndurchmesser  $D$ ), angeordnet im vorschub- und frequenzbedingten Einzeleinschlagabstand  $f$  bildet. Die angeführte Gleichung ist aus der Literatur bekannt und dient beispielsweise der überschlägigen Rautiefenberechnung im Zuge von Dreh- ( $D$  bzw.  $r$  entspricht hier der Eckenrundung der Schneide,  $f$  dem Vorschub pro Umdrehung) beziehungsweise Fräsprozessen mit Werkzeugen kugelförmiger Spitzegeometrie (vgl. z.B.: [49] S.36).

Wie anhand der Betrachtung der erhobenen Messdaten, dargestellt in Tabelle B IV bis Tabelle B VI des Anhangs, gezeigt werden kann, wird über Gleichung (12) für die betrachtete orthogonale Schlagführung eine genaue und materialunabhängige Vorhersage des Abstandes zwischen den einzelnen Schlägen einer Bearbeitungsbahn (Distanzwert  $f$ ) ermöglicht.

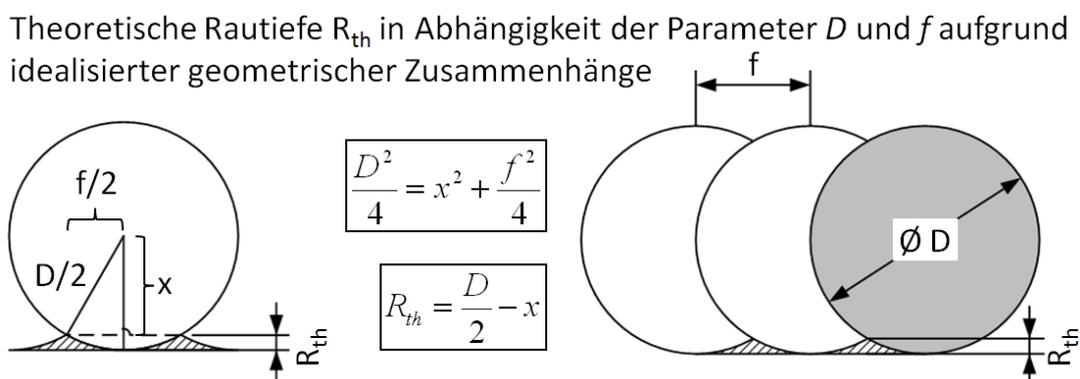


Abbildung 22: Theoretische Rautiefe des Profilschnittes durch eine Bearbeitungsbahn

Die Messergebnisse liegen dabei in annähernd allen Fällen exakt auf den durch die Gleichung errechenbaren Ausprägungen von  $500\mu\text{m}$  ( $v=6000\text{mm/min}$ ;  $F=200\text{Hz}$ ) beziehungsweise  $800\mu\text{m}$  ( $v=9600\text{mm/min}$ ;  $F=200\text{Hz}$ ) oder es werden diese Werte über den Streubereich der Messung abgedeckt. Die einzige Ausnahme bilden die lediglich geringfügig höheren Abstandswerte, welche im Zuge des mit Kugel  $D=6\text{mm}$  und Vorschub  $v=6000\text{mm/min}$  auf dem Werkstoff  $\text{AlMgSi } 0,5$  (3.3206) durchgeführten Versuchs ermittelt werden konnten (siehe Abbildung 21). Auf diese Weise kann anhand der hier dargestellten Untersuchung für unterschiedliche Materialien und Werkzeugdimensionen die, im Zuge von Kapitel 2.2 vorgestellte Klassifizierung der betrachteten Technologie als deterministisches Oberflächenbehandlungsverfahren unterstrichen werden.

Im Gegensatz dazu kann durch Gleichung (13) keine material- und werkzeuggeometrieunabhängige Abschätzung der vorliegenden Rautiefe gegeben werden. Wie anhand von Abbildung 23 für die Werkstoffe C45E und  $\text{AlMgSi } 0,5$  sowie die Kugeldurchmesser  $D=6\text{mm}$  und  $D=10\text{mm}$  dargestellt, zeigen beide Faktoren einen deutlichen Einfluss auf die erhobenen Messwerte. Dabei wird, wie bereits durch die anhand von Kapitel 5.1.2 dargestellten Ergebnisse nahegelegt werden konnte, eine geringere Profiltrautiefe durch eine Erhöhung des Werkzeugdurchmessers sowie infolge der Bearbeitung härterer Materialien erreicht.

#### Bearbeitungsbahnen erstellt mittels $t=0,6\text{mm}$ auf unterschiedlichen Materialien

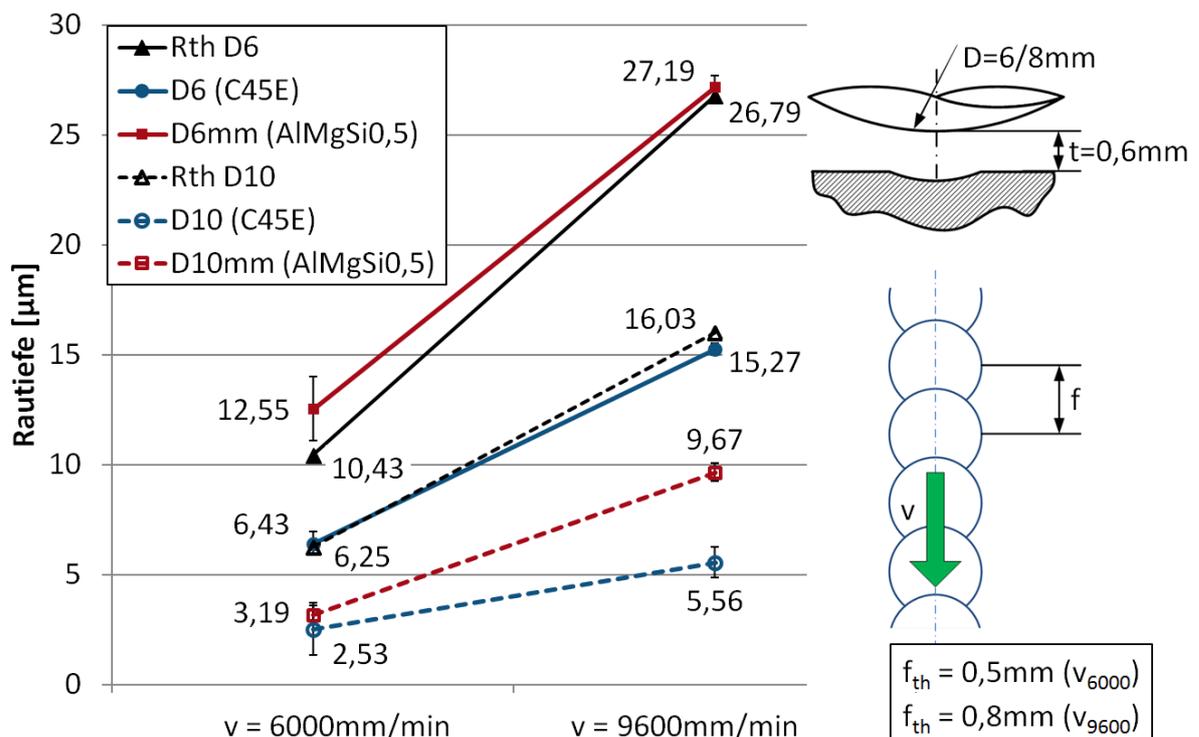


Abbildung 23: Gegenüberstellung der gemessenen Rautiefen für unterschiedliche Werkstoffe und Kugeldurchmesser

Zudem führt eine Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit wie erwartet zu einer deutlichen Reduzierung der vorliegenden Tiefenwerte, wobei die einzelnen Messergebnisse der unterschiedlichen Materialien und Kugeldurchmesser eine geringere Abweichung voneinander zeigen.

Obgleich dieser Zusammenhang auch durch die oben dargestellte theoretische Rautiefe abgebildet wird, stimmen die hierdurch errechneten Werte lediglich annähernd mit den, für das Werkzeug  $D=6\text{mm}$  auf dem verhältnismäßig weichen Aluminiumlegierungswerkstoff vorliegenden Messwerten überein. In allen anderen Versuchen liegen die erhobenen Werte, insbesondere für den härteren Stahlwerkstoff, deutlich unterhalb der auf Basis von Gleichung (13) ermittelten Bezugswerte.

Damit wird deutlich, dass in naheliegender Weise eine Abschätzung der Oberflächenrauheit infolge des bahnweisen Bearbeitungsprozesses immer nur in Bezug auf den bearbeiteten Werkstoff erfolgen kann. Zudem ist auch die Geometrieabweichung der verwendeten Werkzeuge zu berücksichtigen, welche durch die vorliegende Abplattung der Spitze für die Kugeln  $D=6\text{mm}$  und  $D=8\text{mm}$  (siehe Kapitel 5.1.2) zu einer Reduzierung der Rautiefenwerte führt.

Unter demselben Gesichtspunkt muss letztlich auch die in Abbildung 24 gezeigte gute Übereinstimmung der für die Kugel  $D=8\text{mm}$  auf dem verhältnismäßig harten Werkstoff 1.2379 erhobenen Messwerte mit den nach Gleichung (13) errechneten theoretischen Rautiefenwerten gesehen werden. Die Spitze dieses Werkzeugs zeigte im Zuge der vorangegangenen Betrachtung eine „kegelförmige“ Abweichung von der idealen Kugelform, welche sich in deutlich höheren Rautiefenwerten äußern dürfte. Dieser Zusammenhang wird insbesondere dadurch unterstrichen, dass die thematisierte Formabweichung im Zuge von Kapitel 5.1.2 bereits zu deutlich höheren Einzeleinschlagtiefenwerten dieses Werkzeuges geführt hat.

Es ist dabei jedoch anzumerken, dass im Zuge eines Vergleichs der in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellten Ergebnisse auch die für die Versuche mittels Werkzeug  $D=8\text{mm}$  (Abbildung 24) höher gewählte Schlagdistanz von  $t=1\text{mm}$  zu berücksichtigen ist, welche ebenfalls zu einer Erhöhung der Rautiefenwerte beiträgt.

Zusammenfassend kann anhand der gezeigten Betrachtung die Notwendigkeit einer Erweiterung der oben gegebenen Abschätzung theoretischer Rautiefenwerte abgeleitet werden.

**Bearbeitungsbahnen erstellt mittels Kugel D=8mm unter Schlagdistanz t=1mm**

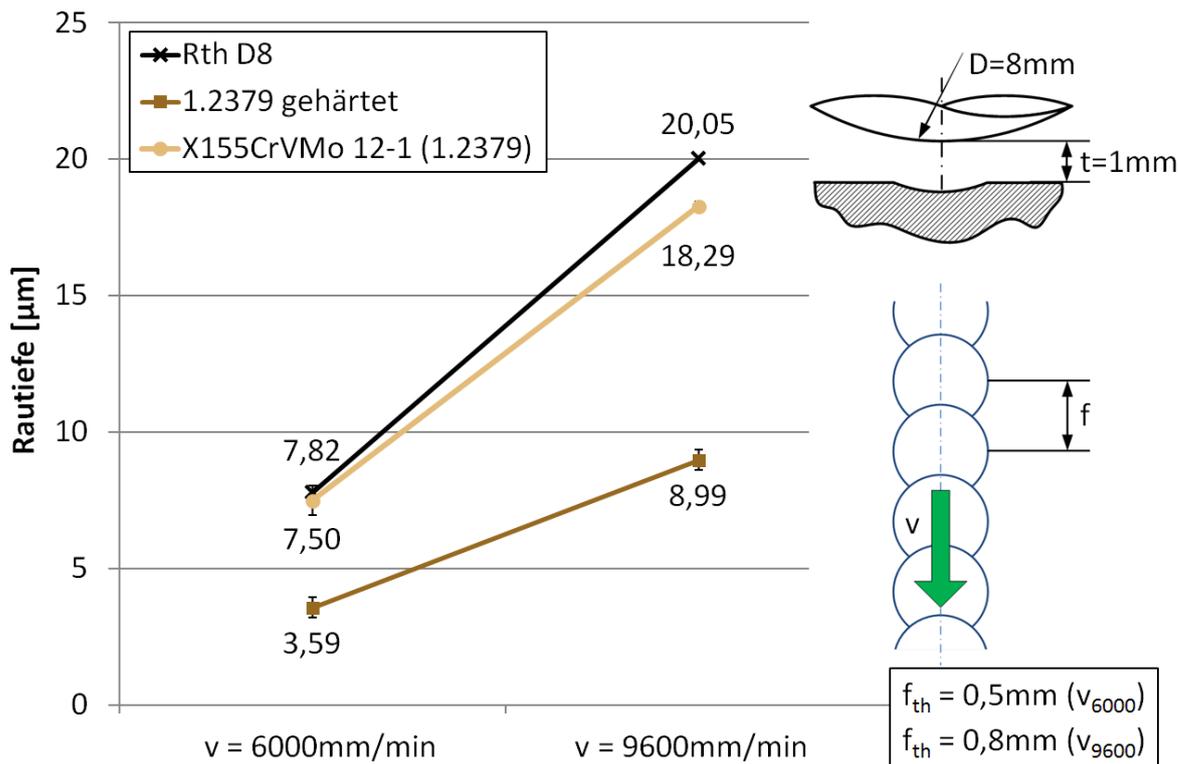


Abbildung 24: Gegenüberstellung der gemessenen und theoretischen Rautiefe für den Werkstoff 1.2379 (D=8mm, t=1mm)

Im Folgenden soll daher ein erster Ansatz einer derartigen Erweiterung gegeben werden, welcher insbesondere die Formabweichung der vorliegenden Werkzeuge berücksichtigen soll. Zu diesem Zweck werden mit  $C_{Arad}$  und  $C_{AD}$  zwei Kennwerte zur Beschreibung der vorliegenden Werkzeugform eingeführt.  $C_{Arad}$  soll dabei als Radialabweichungsfaktor bezeichnet werden und stellt die radiale Rundheitsabweichung des Werkzeugspitzenprofils dar, welche zu einem nach den kleinsten Fehlerquadraten eingepassten Referenzkreis gemessen wird. Die im Zuge von Kapitel 5.1.2 für die vorliegenden Werkzeuge ermittelten  $C_{Arad}$ -Werte (siehe Abbildung 15, Abbildung 16) sind anhand von Tabelle 8 dargestellt. Das Vorzeichen der radialen Abweichung ist dabei derart gewählt, dass eine typischerweise an MHP-Werkzeugen vorliegende Spitzenabplattung durch ein positives Vorzeichen des Korrekturwertes gekennzeichnet ist.

Tabelle 8: Formabweichungsfaktoren der verwendeten Werkzeuge

	Abweichungs-faktor	Stößel D=6mm	Stößel D=8mm	Stößel D=10mm
	$C_{Arad}$		6μm	-3μm
$C_{AD}$		730μm	580μm	880μm

$C_{Arad}$  ... radiale Rundheitsabweichung in Spitzenmitte  
 $C_{AD}$  ... Durchmesser der Abweichungsregion gemessen am Realprofil

Eine Überhöhung der Spitze, welche im Allgemeinen eher selten zu erwarten ist, wird durch ein negatives Vorzeichen repräsentiert (siehe Illustration in Tabelle 8).

Der zweite in der Tabelle dargestellte Abweichungsfaktor  $C_{AD}$  wurde für die vorliegenden Werkzeuge ebenfalls anhand von InfiniteFocus-Messungen ermittelt. Dabei wurde in ein an der Werkzeugspitze extrahiertes Schnittprofil ein Referenzkreis eingepasst. Durch eine Formabweichung der Werkzeugspitze ergibt sich dabei ein Bereich, in welchem das Schnittprofil vom Referenzkreis abweicht. Der Abweichungsdurchmesser  $C_{AD}$  wurde nun als horizontaler Abstand jener beiden Schnittpunkte bestimmt, die Beginn und Ende dieses Bereichs bezeichnen (siehe Illustration, Tabelle 8).

Die beiden so erhaltenen, die Werkzeugformabweichung definierenden Korrekturwerte werden im Zuge von Gleichung (14) genutzt, um den Einfluss der realen Werkzeugform auf die resultierende Rautiefe zu berücksichtigen. Dabei mindert eine vorliegende Abplattung der Kugel durch ihr positives Vorzeichen den errechneten Rautiefenwert. Eine Überhöhung der Spitze steigert diesen. Zudem wird über die Relation des Abstandes zwischen den einzelnen Schlägen (Distanzwert  $f$ ) zum Abweichungsdurchmesser  $C_{AD}$  der Einfluss der Schlagüberdeckung berücksichtigt. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass infolge einer zunehmenden Überdeckung der Einzeleinschläge der Einfluss der Formabweichung des Werkzeugs gemindert wird.

Um eine Möglichkeit zu schaffen, den Einfluss des vorliegenden Werkstoffs sowie der angewendeten Schlagdistanz berücksichtigen zu können, wurde zudem mit  $C_U$  ein mit Umformfaktor bezeichneter Korrekturwert beigefügt. Der Wert soll dabei das Umformvermögen des Prozesses abbilden, welches infolge einer Erhöhung der Schlagdistanz gesteigert und in Abhängigkeit einer höheren Materialausgangshärte gemindert wird. Obgleich auf Basis der vorliegenden Daten nur eine gewisse Abschätzung eines derartigen Korrekturfaktors vorgenommen werden kann, ist davon auszugehen, dass der Prozessparameter Schlagdistanz  $t$  in annähernd linearer Weise in die Berechnung des vorgeschlagenen Korrekturwertes eingehen muss (vgl. vorangegangene Abschnitte dieses Kapitels). Die Härte des vorliegenden Werkstoffs dürfte hingegen in exponentieller Form den hier eingeführten Korrekturfaktor mindern.

$$R_{th\_MHP} = \left[ \frac{D}{2} - \left( C_{Arad} * \frac{f}{C_{AD}} \right) - \sqrt{\frac{D^2 - f^2}{4}} \right] * C_U \quad (14)$$

Für die Berechnung der im Folgenden dargestellten theoretischen Rautiefenwerte wurde der Umformfaktor für die einheitlich vorliegende Schlagdistanz von  $t=0,6\text{mm}$  mit  $C_{U\_C45E\_t06}=0,75$  für den Stahlwerkstoff C45E (1.1191) sowie mit  $C_{U\_Al\_t06}=1,1$  für den Aluminiumlegierungswerkstoff AlMgSi 0,5 bestimmt.

Abbildung 25 zeigt die mit diesen Umformfaktoren sowie den in Tabelle 8 für die einzelnen Werkzeuge gegebenen Abweichungsfaktoren nach Gleichung (14) errechneten theoretischen Rautiefen  $R_{th\_MHP}$ . Anhand der Darstellung wird zudem der Vergleich zu den im Zuge der obigen Untersuchung gemessenen Werten gegeben.

Durch die Korrektur des Einflusses der Werkzeuggeometrie konnten dabei die für das Werkzeug  $D=8\text{mm}$  auf dem Werkstoff C45E aufgetretenen hohen Rautiefenwerte durch die Berechnung abgebildet werden. Es ergeben sich jedoch für den Aluminiumwerkstoff und das Werkzeug  $D=6\text{mm}$  zu geringe Vorhersagewerte.

Die hier gegebene Formelerweiterung berücksichtigt damit in diesem Fall den Einfluss einer Werkzeugformabweichung, welcher sich grundsätzlich anhand von Einzeleinschlägen auch für den Aluminiumwerkstoff nachweisen lässt (siehe Kapitel 5.1.2), zu stark. Der hier dargestellte Ansatz kann daher lediglich als erste grobe Annäherung an die Beschreibung der gezeigten Effekte gesehen werden.

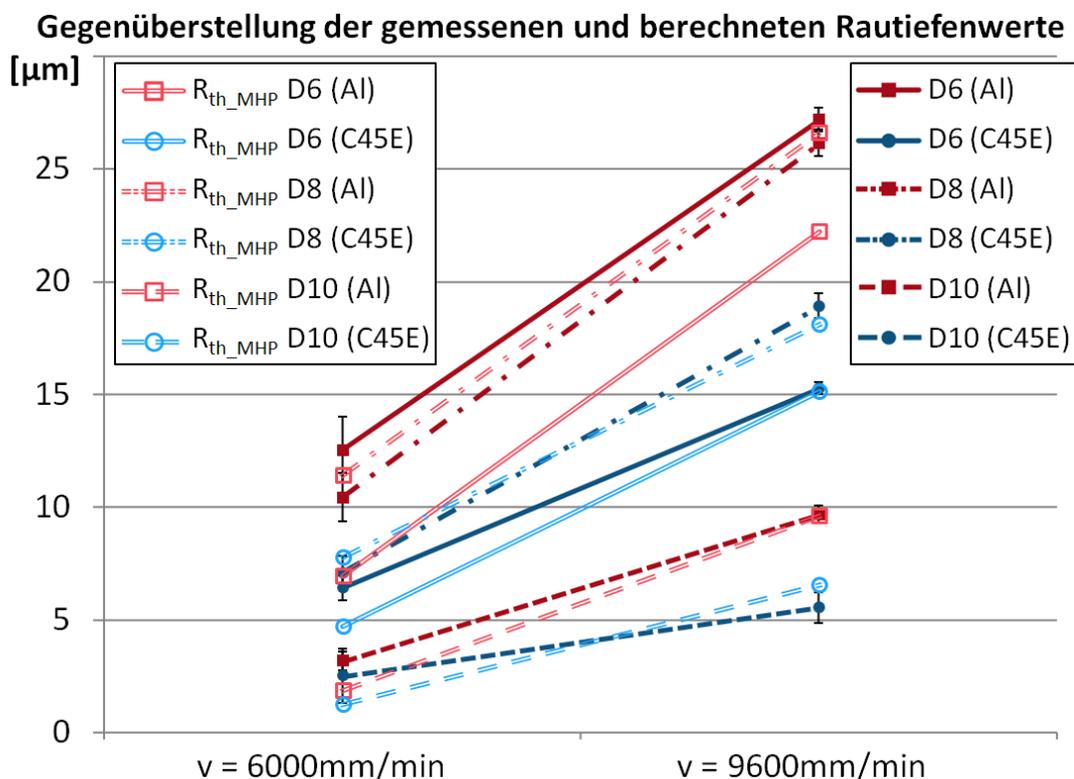


Abbildung 25: Gegenüberstellung der nach (14) errechneten sowie der gemessenen Rautiefenwerte (Schlagdistanz  $t=0,6\text{mm}$ )

### 5.3 Materialverteilung bei Flächenbearbeitung

Im Zuge des Schlagverdichtungsprozesses wird, wie bereits erläutert, die Oberfläche eines Bauteils durch einzelne, gezielte Schläge eines im Allgemeinen mit kugelförmiger Spitze ausgeführten Werkzeugs bearbeitet. Das Schlagwerkzeug wird auf Bearbeitungsbahnen über die Oberfläche geführt, wodurch die einzelnen Einschläge linienförmig hintereinander angeordnet werden (siehe vorangegangenes Kapitel). Um eine flächendeckende Bearbeitung der Bauteiloberfläche zu gewährleisten, werden diese Bearbeitungsbahnen fortlaufend in einem vorzugebenden Bahnversatz aneinandergereiht. Dabei kommt es zu einer gezielten, fortlaufenden Umformung der Oberfläche, welche anhand der im Folgenden dargestellten Untersuchung nähere Betrachtung finden soll.

Es wurden hierfür auf dem Werkstoff C45E (1.1191) mittels eines Werkzeugs des Kugeldurchmessers  $D=8\text{mm}$  unter Vorgabe einer Frequenz von  $F=200\text{Hz}$  sowie eines Intensitätswertes  $I=100\%$  Bahngruppen mit jeweils vier Bearbeitungsbahnen unterschiedlicher Länge (erste Bahn  $L_1=70\text{mm}$ ; zweite Bahn  $L_2=\frac{3}{4}L_1$ ; dritte Bahn  $L_3=\frac{1}{2}L_1$ ; vierte Bahn  $L_4=\frac{1}{4}L_1$ ) erstellt. Dabei kamen für insgesamt sechs Gruppen variierte Schlagdistanzwerte zur Anwendung. Ausgehend von einer Schlagdistanz von  $t=0,2\text{mm}$  für die erste Gruppe, wurde für die Folgegruppen die Schlagdistanz jeweils um den Wert  $0,2\text{mm}$  bis zu einer Maximalausprägung von  $t=1,2\text{mm}$  gesteigert.

Für eine Analyse des Einschlagabstandes wurde die beschriebene Bearbeitung insgesamt drei Mal ausgeführt. Der Bahnversatz zwischen den einzelnen Bahnen einer Bahngruppe wurde dabei jeweils einheitlich auf die Werte  $s=0,1\text{mm}$ ,  $s=0,3\text{mm}$  beziehungsweise  $s=0,5\text{mm}$  gesetzt. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde hierbei derart angepasst, dass sich in Bezug auf den Einschlagabstand im Zuge einer Bearbeitungsbahn  $f$  identische Werte einstellten. Damit kann in Bezug auf die drei Versuchsfelder (bestehend aus sechs Bearbeitungsbahngruppen unterschiedlicher Schlagdistanz) von einem einheitlichen Matrixabstand  $s=f$  gesprochen werden, welcher auf den oben für den Bahnversatz  $s$  genannten Werten variiert wurde.

Abbildung 26a zeigt illustrativ die sechs Bahngruppen (jeweils vier Bahnen unterschiedlicher Länge) des mittels Matrixabstand  $s=f=0,1\text{mm}$  erstellten Versuchsfeldes und erläutert die Versuchsauswertung. Hierbei wurde die Oberflächentopographie an den gegebenen Messpositionen mittels des InfiniteFocus-Messsystem erfasst. Die erhobenen Messungen konnten durch die unterschiedliche Länge der einzelnen Bearbeitungsbahnen für das Extrahieren von Schnittprofilen normal zu den Einzelbahnen (Pos. 1) sowie zu zwei (Pos. 2), drei (Pos. 3) und letztlich, wie anhand von Abbildung 26b dargestellt, vier überlagerten

Bearbeitungsbahnen eines Versuchsfeldes genutzt werden. Dabei wurde für die Messung der Profildaten für die Versuchsfelder der Matrixweiten  $s=f=0,1\text{mm}$  und  $s=f=0,3\text{mm}$  einheitlich eine Profilpfadbreite von 200 Datenpunkten (entspricht  $200,4\mu\text{m}$ ) gewählt. Für die Auswertung des Versuchsfeldes der Matrixweite  $s=f=0,5\text{mm}$  wurde, ob des erhöhten Einschlagabstandes  $f$ , eine Breite von 850 Punkten ( $1,276\text{mm}$ ) vorgegeben (siehe dazu Kapitel 4.3.1).

Durch diese Einstellungen konnte eine für die einzelnen Versuchsfelder repräsentative Mittelwertbildung gewährleistet werden. Es ist allerdings festzuhalten, dass im Zuge der Interpretation der Daten und hier insbesondere im Fall eines Vergleichs der einzelnen Versuchsfelderergebnisse zueinander die variierte Pfadbreite in die Betrachtung mit einbezogen werden muss, da diese durchaus Auswirkungen auf die Höhenberechnung der Pfadpunkte zeigt (siehe Kapitel 4.3.1).

Um die sukzessive Materialverteilung im Querschnittsprofil ausgehend von einer Einzelbahn über die nachfolgenden Bearbeitungsbahnen untersuchen zu können, wurden die erstellten Profilschnitte mittels einer Profiltabelle exportiert und anhand eigens für die vorliegende Auswertung erstellter Programme weiter bearbeitet und vermessen.

Dabei wurden auf Basis des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel Visual Basic-Programme erstellt, welche die genaue Ausrichtung der einzelnen Datensätze zueinander sowie die Errechnung der sich hierbei ergebenden Differenzflächen erlaubten. Die Erstellung eigener Programme wurde dabei als notwendig erachtet, da eine Überlagerung einzelner Messprofile durch die vorliegende Messsoftware nicht ermöglicht wird. Im Zuge einer Analyse der bahnweisen Materialumformung sollte aber die Materialverteilung nach der jeweiligen Bearbeitungsbahn in Relation zu vorangegangenen Bearbeitungsschritten gesetzt werden. Zudem sollte durch die Berechnung der jeweiligen Differenzflächen eine qualifizierte Aussage über die in Abhängigkeit der gegebenen Prozessparametereinstellungen vorliegende Materialverteilung gegeben werden.

Abbildung 26c zeigt beispielhaft die Überlagerung der Profilschnitte durch zwei und drei Bearbeitungsbahnen (Schlagdistanz  $t=1\text{mm}$ ) in einem Bahnabstand von  $s=0,3\text{mm}$ . Wie die Betrachtung zeigt, wird das im Zuge der dritten Bahn verdrängte Material zum einen in Richtung des Bearbeitungsprozesses verschoben, zum anderen wird ein gewisser Materialanteil gegen die Prozessrichtung (Richtung der vorangegangenen Bearbeitungsbahn) verdrängt.

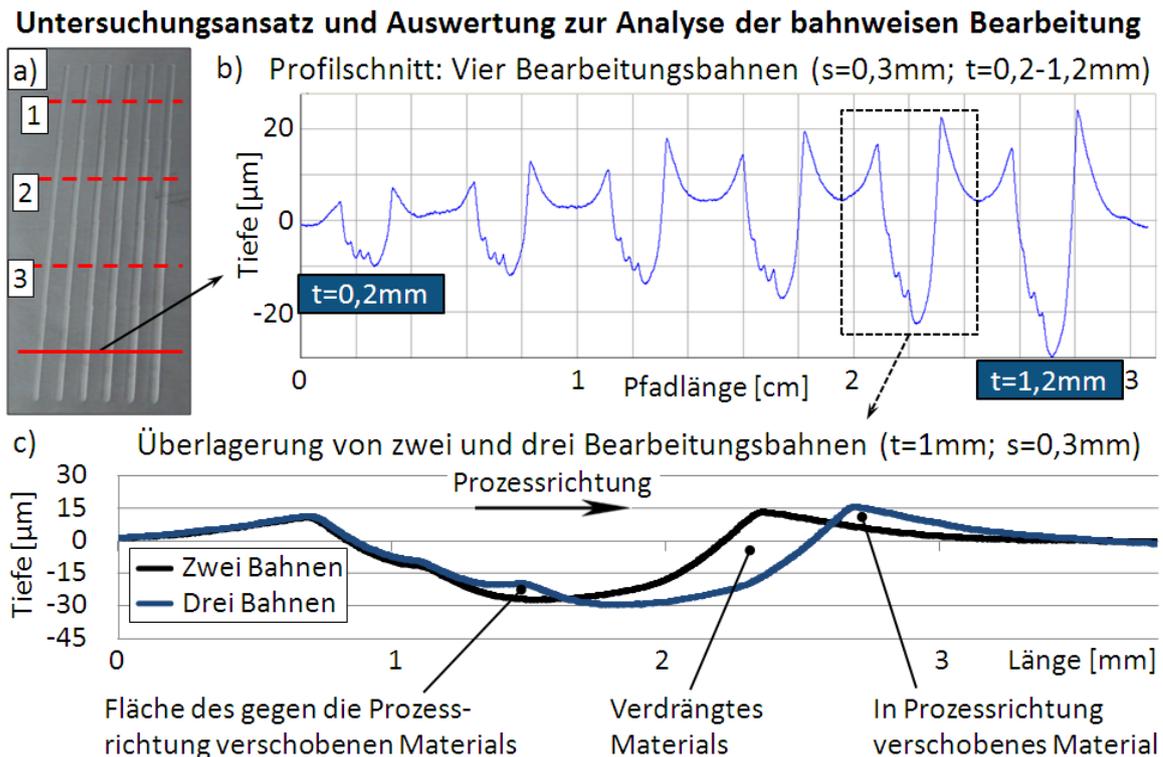


Abbildung 26: Untersuchung der bahweisen Flächenbearbeitung: a) Probe mit überlagerten Einzelbahnen und Messpositionen für die Profilerstellung b) Profilschnitt durch vier Bearbeitungsbahnen erstellt mit  $t=0,2-1,2\text{mm}$  c) Überlagerung zweier Profilschnitte zwecks Bestimmung der Materialanteilsflächen (vgl. [13])

Diese drei charakteristischen Materialanteile beziehungsweise die den jeweiligen Anteilen zuzuordnenden Differenzflächen wurden auch im Zuge der Auswertung der einzelnen Versuchsfelder anhand der Überlagerung von Einzelbahn zu Ebene, einer zu zwei, zwei zu drei und drei zu vier Bahnen (im Fall von  $s=f=0,5\text{mm}$  lediglich für Einzelbahn zu Ebene und einer zu zwei Bahnen) bestimmt. Die hierbei erhobenen Messdaten sind in Tabelle B VII bis Tabelle B IX des Anhangs B zusammengefasst.

Für eine Diskussion der wesentlichen Versuchsergebnisse sind anhand von Abbildung 27 die für die jeweiligen Materialanteilsflächen berechneten arithmetischen Mittelwerte der Ergebnisse der einzelnen Überlagerungen (Ebenen zu erster, erste zu zweiter, zweite zu dritter, dritte zu vierter Bearbeitungsbahn) in Form von Balkendiagrammen dargestellt. Die Darstellung beschränkt sich dabei auf die Matrixabstände  $s=f=0,1\text{mm}$  und  $s=f=0,3\text{mm}$ , deren Schnittprofile anhand von Pfaden gleicher Breite ermittelt wurden.

Wie die dargestellte Auswertung zeigt, unterstreichen die ermittelten Messwerte erneut die in Bezug auf den Schlagdistanzeinfluss vorliegenden Erkenntnisse. So ist ersichtlich, dass eine Erhöhung dieses Prozessparameters zu einer deutlichen Vergrößerung der betrachteten Differenzflächen führt. Diese Erhöhung kann letztlich auf eine zunehmende plastische Deformation der Oberfläche zurückgeführt werden.

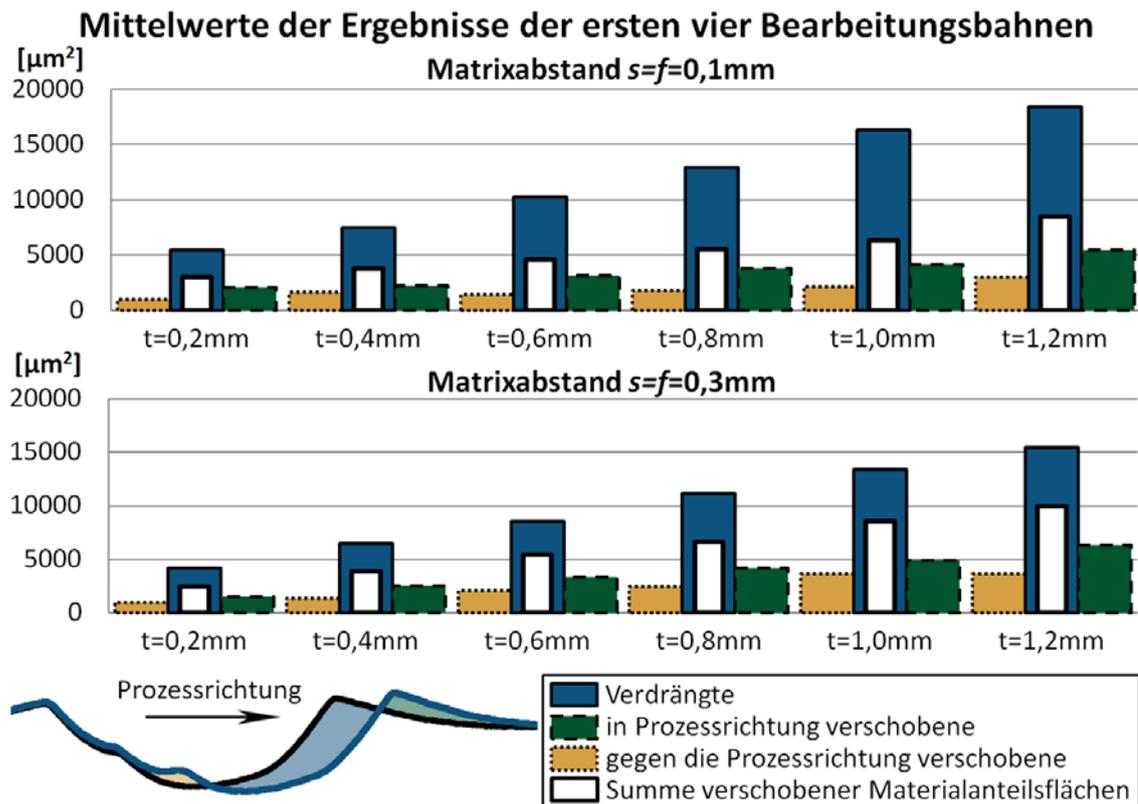


Abbildung 27: Materialanteilsflächen in Abhängigkeit der Schlagdistanz  $t$  für die Versuchsfelder  $s=f=0,1\text{mm}$  und  $s=f=0,3\text{mm}$

Hierbei steigt die Fläche des, dem verdrängten Material zuzuordnenden Bereichs in deutlich höherem Maß als jene Flächen, die den verschobenen Materialanteilen entsprechen. Insbesondere im Falle der Betrachtung der mit Matrixweite  $s=f=0,1\text{mm}$  durchgeführten Versuche, erhöht sich dadurch die Differenz zwischen den verschobenen und der verdrängten Materialfläche, welche im Zuge aller Versuche als signifikant festgestellt wurde. Wie anhand von Abbildung 27 gezeigt, überwiegt dabei jeweils die Fläche des verdrängten Materials deutlich die Summe der beiden verschobenen Materialanteilsflächen (weiße Balken).

Es ist jedoch in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass die Ausrichtung der jeweiligen Schnittprofile zueinander einen wesentlichen Einfluss auf das Messergebnis nimmt. Im Zuge der vorliegenden Auswertung wurde versucht, die einzelnen Schnittprofile mit möglichst hoher Übereinstimmung zueinander zu überlagern. Auf diese Weise konnte in Bezug auf die Längensinformation (Abszisse) eine sehr gute Ausrichtung der Datensätze gewährleistet werden, wodurch eine Differenzbildung der einzelnen Bahnen gerechtfertigt erschien. In Bezug auf die Höhenachse (Ordinate) ist es aber durchaus möglich, dass die an unterschiedlichen Positionen der Probenoberfläche gemessenen und extrahierten Querschnittprofile zueinander verschoben werden müssten, um eine optimale und für die Differenzbildung repräsentative Einpassung zu erreichen.

So ist anhand von Abbildung 26c leicht einzusehen, dass durch ein Verschieben des Profils dreier Bahnen in positiver Ordinatenerichtung die Fläche des verdrängten Materials verringert werden würde. Die Flächen der verschobenen Materialanteile würden sich hierdurch vergrößern. Damit kann bei kritischer Betrachtung in Bezug auf die ermittelte Differenz zwischen verdrängten und verschobenen Materialflächen ein der Auswertungsmethode geschuldeter, systematischer Messfehler nicht ausgeschlossen werden.

Im Gegensatz dazu erscheint allerdings der Vergleich der jeweiligen Anteilsflächen der verschobenen Materialbereiche zueinander durchaus möglich, da sich diese im Zuge einer höhenmäßigen Verschiebung der jeweiligen Datensätze zueinander in annähernd gleichem Ausmaß positiv korreliert ändern würden. Wie dieser Vergleich zeigt, stellt sich für die anhand von Abbildung 26 dargestellten Matrixweiten einheitlich ein höherer Materialanteil (Anteilsfläche) verschoben in Richtung des Bearbeitungsprozesses ein. Die Fläche des zur vorangegangenen Bearbeitungsbahn (gegen die Prozessrichtung) orientierten Materials fällt im Vergleich deutlich geringer aus.

Wie gezeigt werden kann, verschiebt sich dieses Verhältnis jedoch infolge einer Erhöhung der Matrixweite (bzw. des Bahnabstandes). Tabelle 9 zeigt in diesem Zusammenhang eine Aufstellung der Relation der verschobenen Materialanteilsflächen in Abhängigkeit dieses Faktors. Die gegebenen Werte wurden aus den Differenzflächen zweier Bahnen zur jeweiligen Einzelbahn ermittelt, wobei der Berechnung jeweils der arithmetische Mittelwert aus allen variierten Schlagdistanzen zugrunde gelegt wurde. Sie stellen letztlich das prozentuelle Größenverhältnis der Fläche verschoben gegen die Prozessrichtung, zu jener verschoben in Prozessrichtung dar. Für den Fall, dass die Fläche des gegen die Prozessrichtung verschobenen Materials jene des in Prozessrichtung verschobenen Materialanteils übersteigt, ergibt sich dabei ein Wert größer 100%.

Eine derartige Verteilung der Materialflächen kann dabei für den Fall einer Matrixweite  $s=f=0,5\text{mm}$  erkannt werden. Für die geringeren Abstandswerte überwiegt hingegen der in Prozessrichtung verschobene Materialanteil.

*Tabelle 9: Prozentuelles Verhältnis der Materialanteilsflächen verschoben gegen und in Prozessrichtung*

<b>Verhältniswert</b>	$s=f=0,1\text{mm}$	$s=f=0,3\text{mm}$	$s=f=0,5\text{mm}$
Mittelwert über alle Versuche mit variierten Schlagdistanzen	50,3%	80,7%	146,3%

Wie ersichtlich, erhöht sich jedoch auch hier infolge einer Steigerung der Matrixweite der Anteil des gegen die Prozessrichtung verschobenen Materials.

Obgleich in diesem Zusammenhang noch einmal auf die variierte Breite des für die Auswertung des Matrixabstandes  $s=f=0,5\text{mm}$  vorgegebenen Profilpfades verwiesen werden muss, wodurch ein direkter Vergleich zu den für die restlichen Felder ermittelten Werte nicht in eindeutiger Weise zulässig ist, kann der gegebene Zusammenhang auch anhand von geometrischen Überlegungen nachvollzogen werden.

Wie in Abbildung 28 schematisch dargestellt, kann die Verteilungsänderung der verschobenen Materialanteilsflächen mit der vor dem Werkzeugeinschlag in Abhängigkeit des jeweiligen Bahnversatzes vorliegenden Materialausrichtung unterhalb des Stößelwerkzeugs in Verbindung gebracht werden. In Bezug auf die Werkzeugsymmetrielinie vergrößert sich dabei im Falle einer Steigerung des Bahnabstandes der gegen die Prozessrichtung gerichtete Materialanteil. Es darf davon ausgegangen werden, dass sich im Zuge des Schlages dieser Anteil eher gegen die Richtung des Prozesses verschieben dürfte. Wird der Bahnversatz hingegen verringert, liegt vor dem Schlag in Bezug auf die Werkzeugsymmetrielinie eine mehrheitliche Orientierung des Materials in Prozessrichtung vor. Der nach dem Schlag gegen die Prozessrichtung verschobene Materialflächenanteil verringert sich.

Auf diese Weise kann der Bahnversatz im direkten Zusammenhang mit der prozessrichtungsbezogenen Materialverteilung gesehen werden. Durch eine Variation des Prozessparameters besteht damit die Möglichkeit die nach den einzelnen Bahnen vorliegende Verteilung zu beeinflussen.

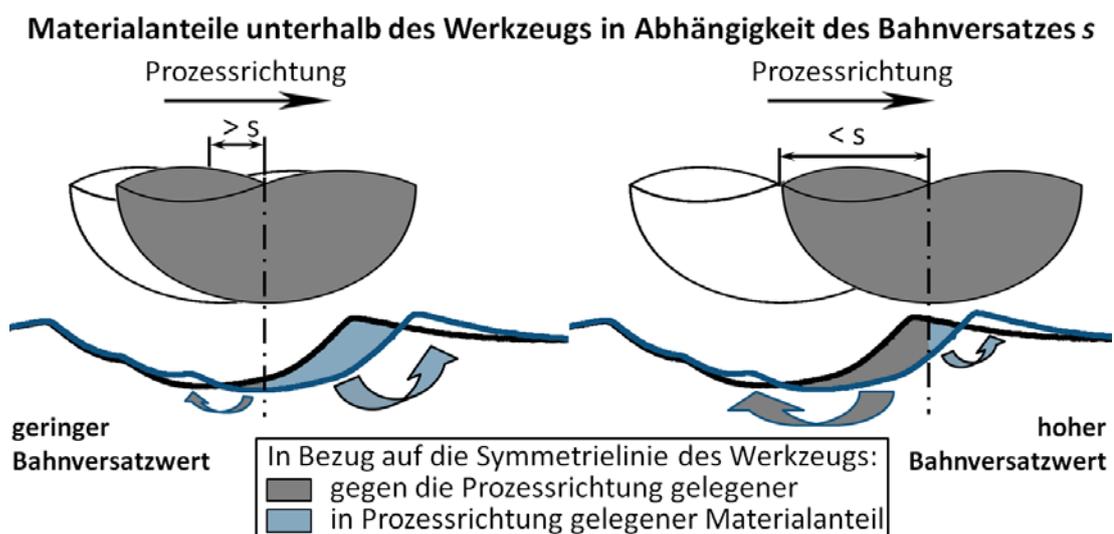
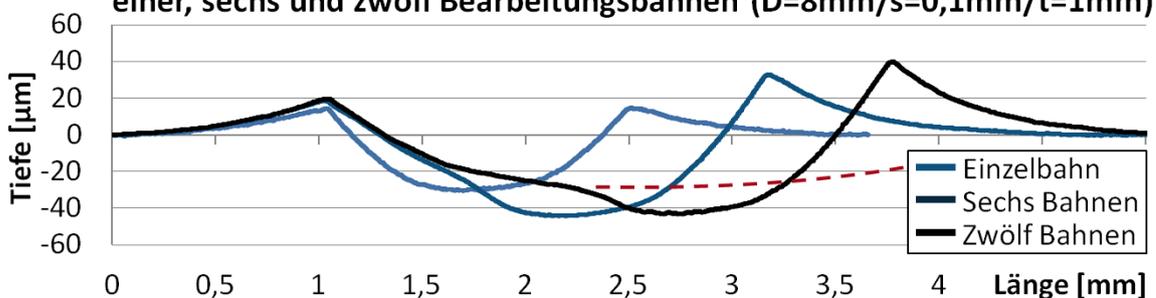


Abbildung 28: Bahnversatzabhängige Materialausrichtung unterhalb der Werkzeugspitze anhand des Querschnittsprofils in Prozessrichtung

Damit kann letztlich auch die infolge des bahweisen MHP-Prozesses erfolgende sukzessive Umformung der Materialoberfläche über die Vorgabe eines zweckmäßig gewählten Prozessparameters beeinflusst werden. Die nach der Bearbeitung in Prozessrichtung resultierende Oberflächentopographie ergibt sich dabei durch die Überlagerung der gegen diese Richtung verschobenen Materialanteile. Im Zuge einer erweiterten Betrachtung von Profilschnitten durch mehrere Bearbeitungsbahnen ist zudem ein gewisser Einlaufbereich am Beginn der Flächenbearbeitung zu erkennen. Hierbei bildet sich ein charakteristischer Übergangsbereich zwischen unbearbeiteter und bearbeiteter Oberfläche aus. Die Entstehung dieses Bereichs wird anhand von Abbildung 29a durch die Überlagerung einer, sechs sowie zwölf Bearbeitungsbahnen ( $s=f=0,1\text{ mm}$ ;  $t=1\text{ mm}$ ) dargestellt.

Der Vergleich der einzelnen Profilschnitte zeigt, dass vorangegangene Bearbeitungsbahnen im Zuge des Prozessfortschritts durch die Rückführung von Materialanteilen gegen die Prozessrichtung teilweise wieder mit Material aufgefüllt werden. Die gegen die Prozessrichtung verschobenen Materialanteile ermöglichen es jedoch im Zuge der ersten Bearbeitungsbahnen nicht, das Höhenniveau zwischen dem resultierenden, bearbeiteten Profil und der unbearbeiteten Oberfläche auszugleichen.

a) **Darstellung der Prozesseinlaufphase durch Überlagerung von einer, sechs und zwölf Bearbeitungsbahnen ( $D=8\text{ mm}/s=0,1\text{ mm}/t=1\text{ mm}$ )**



b) **Typische Übergangsbereiche einer MHP-bearbeiteten Fläche ( $C45E/D=8\text{ mm}/s=0,1\text{ mm}$ ; IFM-Messung 5-facher Vergrößerung)**

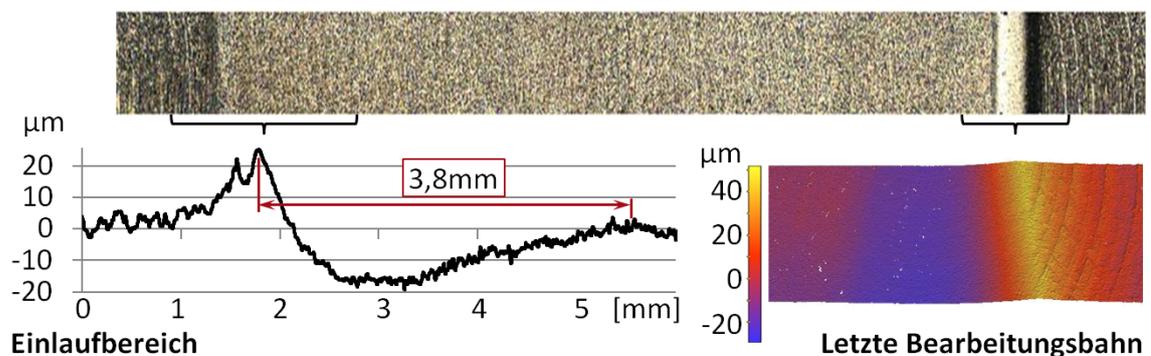


Abbildung 29: Übergänge von MHP-bearbeiteter zu unbearbeiteter Fläche:  
a) Ausbildung des Prozesseinlaufbereichs anhand der Überlagerung der ersten Bearbeitungsbahnen b) Übergangsbereiche eines bearbeiteten Feldes

Wie die Betrachtung einer mit ähnlichen Parametern im Zuge der in Kapitel 6.2.1 dargestellten Untersuchung bearbeiteten Oberfläche zeigt, gilt dies allerdings lediglich für den Beginn der Bearbeitung und den direkten Übergangsbereich von unbearbeiteter zu bearbeiteter Oberfläche (siehe linker Teil der Abbildung 29b). Im weiteren Verlauf des Prozesses gleichen sich die Höhenniveaus fortlaufend an, wobei die Höhe der bearbeiteten Materialfläche letztlich in etwa mit jener des unbearbeiteten Materials gleichgesetzt werden kann.

Dieser anhand von Abbildung 29a durch eine rote unterbrochene Linie dargestellte, zu erwartende Profilverlauf könnte zum einen dadurch erklärt werden, dass die im Zuge der ersten Bearbeitungsbahn aufgeworfene „*Materialkante*“ zunächst eine ausreichende Verschiebung von Material gegen die Prozessrichtung behindert. Zum anderen kann im Zuge der ersten Bahnen eine zunehmende Erhöhung der in Prozessrichtung verschobenen „*Materialkante*“ beobachtet werden (siehe Abbildung 29a). Wie die Betrachtung bearbeiteter Felder zeigt, bildet sich hier letztlich eine Maximalhöhe dieser Kante aus, welche auch für einen länger andauernden Prozessverlauf auf einem konstanten Wert verbleibt. Das Erreichen dieses Maximalwertes dürfte letztlich auch die Materialverschiebung gegen die Prozessrichtung begünstigen, da der in Prozessrichtung verschobene Materialanteil nicht weiter gesteigert werden kann.

Auf diese Weise stellt sich erst in einem gewissen Abstand zum Feldbeginn (Anfang der ersten Bearbeitungsbahn), welcher für die in der Abbildung gegebenen Parametereinstellungen mit etwa 3,8mm abgeschätzt werden kann, eine ungehinderte und konstante Verteilung der im Zuge jeder Bearbeitungsbahn verschobenen Materialanteile ein. Ein gleichmäßiger ebener Verlauf des Höhenprofils eines in Prozessrichtung gelegten Querschnitts durch die bearbeitete Oberfläche kann beobachtet werden (siehe Abbildung 29b, links).

Wie der rechte Teil von Abbildung 29b zeigt, ergibt sich für den späteren Übergang der MHP-bearbeiteten zu unbearbeiteten Fläche die Charakteristik einer deutlich ausgeprägten letzten Bearbeitungsbahn, welche durch das Fehlen weiterer Bahnen nicht durch zurückgeführte Materialanteile aufgefüllt werden konnte. Zudem wird das bearbeitete Feld durch die in Prozessrichtung fortlaufend verschobene „*Materialkante*“ begrenzt, die im Schnittprofil als Materialaufwerfung verbleibt. Eine weiterführende Betrachtung des hier beschriebenen Übergangsbereichs erfolgt in Kapitel 5.5.

## 5.4 Untersuchung der Beeinflussung des Werkstoffgefüges

Die anhand der vorangegangenen Untersuchungen beobachtete und gemessene Verschiebung von Material soll im Folgenden durch die Analyse des Werkstoffgefüges während eines Einschlages des MHP-Werkzeugs näher betrachtet werden.

Im Zuge der Untersuchung wurde hierzu ein High-Speed-Kamera-Mikroskop der Firma Keyence, Modell VW-9000 in Verbindung mit einem Weitbereichs-Zoom-Objektiv VH-Z100R (Keyence) eingesetzt, durch welches grundsätzlich ein 100-facher bis 1000-facher Vergrößerungsbereich abdeckt werden kann. Um die Auswirkung des Einschlags auf das Werkstückgefüge verfolgen zu können, wurde ein MHP-Werkzeug des Kugeldurchmessers  $D=8\text{mm}$  mittels Drahterosion modifiziert. Hierbei wurde eine Hälfte der kugeligen Werkzeugspitze entfernt. Wie im linken, unteren Teil der Abbildung 30 dargestellt, konnte die so präparierte Spitze im Zuge der Versuche direkt an die Kante einer Versuchsprobe herangeführt werden. Auf diese Weise wurde eine Aufnahme der Probenseitenfläche und der auf diese einwirkende Werkzeugspitze ermöglicht (siehe rechter, oberer Teil der Abbildung).

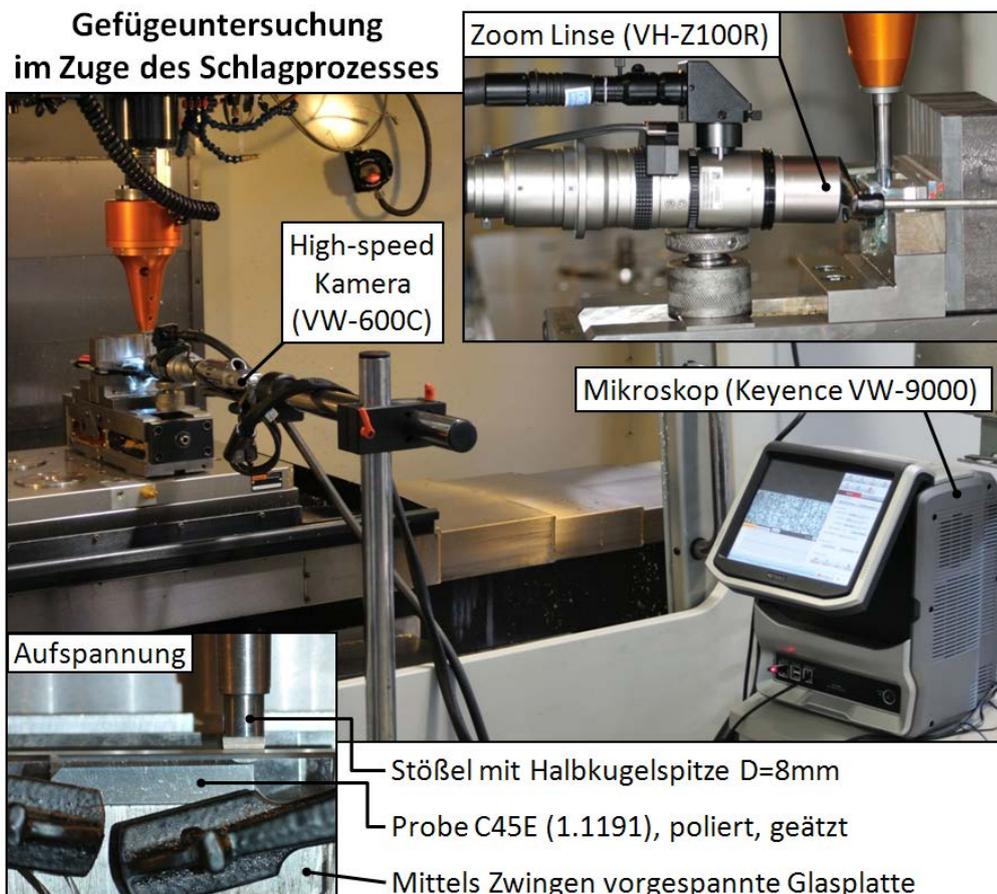


Abbildung 30: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Gefügemodifikation im Zuge des Schlagprozesses

Die polierten Seitenflächen der untersuchten Proben des Werkstoffs C45E (1.1191) mit ferritisch-perlitischem Gefüge wurden vor dem jeweiligen Versuch chemisch geätzt, wobei die einzelnen Gefügebestandteile unterschiedlich stark angegriffen werden. In den präsentierten Aufnahmen des Werkstoffgefüges zeigen sich hierdurch helle ferritische sowie dunkle perlitische Bereiche, deren Modifikation beziehungsweise Formänderung im Zuge des Einschlages betrachtet werden soll. Da, wie anhand der obigen Abbildung illustriert, die Untersuchung direkt an der Werkstückkante erfolgte, wurde im Zuge der Erstellung einiger Aufnahmen versucht, das Ausweichen des Materials durch das Vorspannen mit Glas- beziehungsweise Acrylglasplatten möglichst zu unterbinden. Die Aufnahmen wurden nach der Positionierung des Stößels über dem Werkstück und der Ausrichtung und Einstellung der Kamera gestartet, um im Anschluss den Intensitätswert des MHP-Aktuators abrupt von  $I=0\%$  auf  $I=100\%$  zu stellen. Durch eine vorgegebene Bildrate von 4000 Bildern pro Sekunde konnten dadurch ausgehend vom ersten Einschlag, einzelne Schläge des Werkzeugs sowie deren Auswirkung auf das Gefüge der Versuchsprobe betrachtet und analysiert werden.

Abbildung 31 zeigt zunächst Bilder des aus Schlagdistanz  $t=0,4\text{mm}$  erfolgenden Werkzeugeinschlages auf die unversehrte Oberfläche, welche einer unter Vorspannung einer Acrylglasplatte entstanden Aufnahme 150-facher Vergrößerung entnommen wurden.

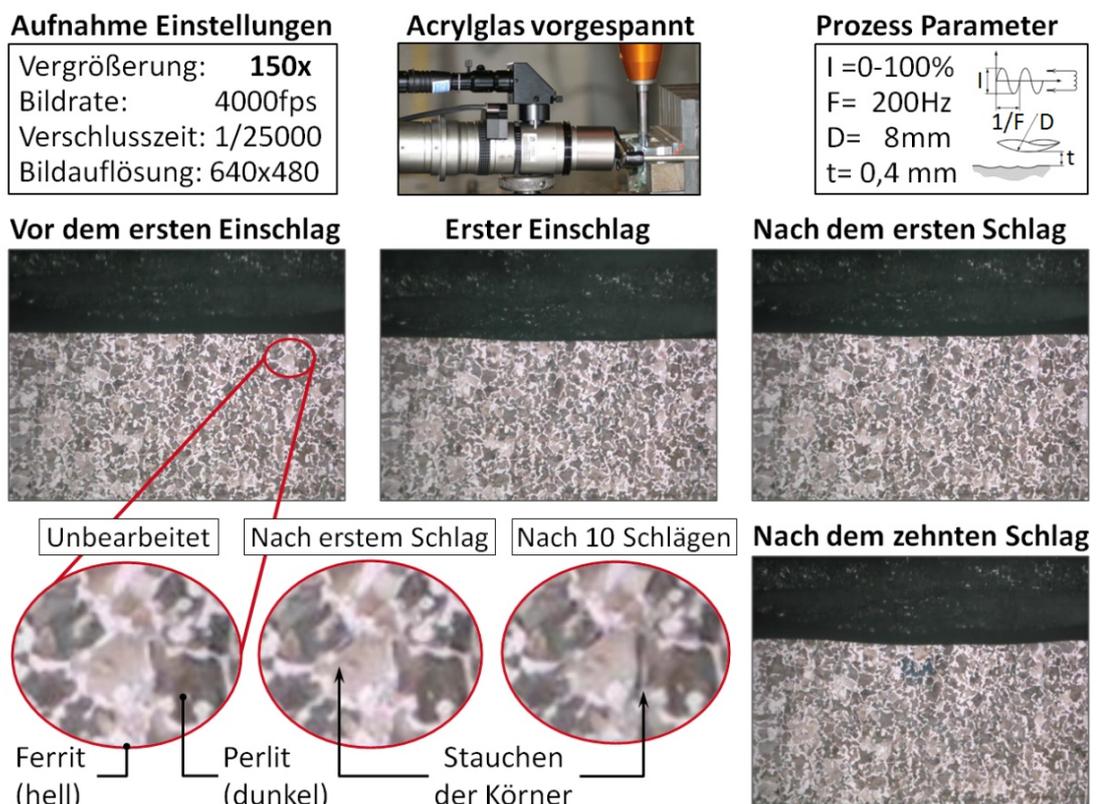


Abbildung 31: Darstellung der Kornstauchung anhand von Gefügaufnahmen

Wie anhand der vergrößerten Ausschnitte gezeigt werden kann, führt das Auftreffen des Werkzeugs zu einer Verschiebung der Perlitkörner (dunkle Bereiche). Diese Gefügebereiche stellen ein Phasengemisch aus Ferrit ( $\alpha$ -Eisen) und Zementit (Eisenkarbid,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) dar, wobei der Zementit den Ferrit in Form von harten, spröden Lamellen durchsetzt (vgl. [50] S.84ff). Dabei kann für diese Körner im Vergleich zu Bereichen einphasigen Ferrits (hell) auf eine deutlich höhere Härte und Festigkeit verwiesen werden, welche unter anderem aus einer Lastaufteilung zwischen  $\alpha$ -Eisen und Zementitlamellen resultiert. Die Lamellen bleiben dabei ob ihrer hohen Fließgrenze von etwa 3000MPa selbst unter großer Belastung elastisch und können einen großen Teil der Last aufnehmen (vgl. [51] S.20f). Dies führt dazu, dass wie anhand der Aufnahmen gezeigt, die Perlitkörner im Zuge der Verschiebung (Stauchung) ihre jeweilige Form nur bedingt beziehungsweise nicht ändern. Vielmehr werden die nach der chemischen Ätzung weißlich erscheinenden Ferritbereiche geringer Härte und größerer Verformungsfähigkeit deformiert beziehungsweise verdrängt. Für den vorliegenden Versuchsaufbau stellt sich dabei allerdings, selbst mit einer vorgespannten Platte auch eine Bewegung normal zur Bildebene ein. Das Material bewegt sich dabei vorwiegend aus der Bildebene heraus in Richtung des Vorspannmediums beziehungsweise der Optik. Ein direktes Umlegen des gezeigten Verschiebungsverlaufs auf die Bedingungen in einem soliden Festkörper ist daher nur eingeschränkt möglich.

**Aufnahme Einstellungen**

Vergrößerung: **300x**  
 Bildrate: 4000fps  
 Verschlusszeit: 1/16000  
 Bildauflösung: 640x480

**Vorgespannte Glasplatte**



**Prozess Parameter**

I = 0-100%  
 F = 200Hz  
 D = 8mm  
 t = 0,1 mm

**Vor dem ersten Einschlag**



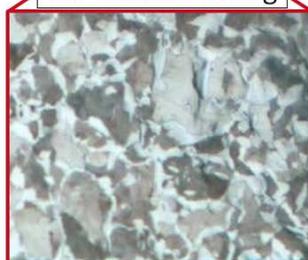
**Erster Einschlag**



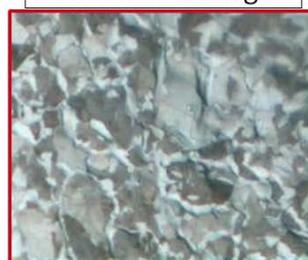
**Nach dem ersten Schlag**



**Vor erstem Schlag**



**Nach zehn Schlägen**



**Nach dem zehnten Schlag**



Einschlag auf der Kante eines vorangegangenen Eindrucks (Abstand  $f \sim 0,3\text{mm}$ )

**Abbildung 32: Bildung des Deformationsbereichs anhand von Gefügeaufnahmen**

Abbildung 32 stellt das Auftreffen der Werkzeugspitze auf die „*Materialkante*“ eines, durch einen vorangegangenen Versuch gebildeten Einschlagabdrucks (Abstand zwischen den Einschlägen  $f \sim 0,3\text{mm}$ ) dar. Die gezeigte Aufnahme wurde in 300-facher Vergrößerung anhand einer Probe mit vorgespannter Glasplatte erstellt.

Wie durch die vergrößerten Bereiche dargestellt, bildet sich infolge der Einwirkung des Werkzeugs der Hauptdeformationsbereich unterhalb der Werkzeugoberfläche aus. In der, der Aufnahme nach zehn Schlägen entnommenen Vergrößerung verläuft dessen Grenze in etwa diagonal vom linken-oberen zum rechten-unteren Bildbereich. Es sei im Zusammenhang mit den hier gezeigten Bildern darauf hingewiesen, dass infolge der Ausbildung dieses Bereichs sowie auch bei den anderen im Zuge der dargestellten Versuche beobachteten Materialdeformationen (z.B.: Abbildung 31, vergrößerte Darstellung nach zehn Schlägen) keinerlei Rissbildung an der Probenfläche beziehungsweise unterhalb dieser beobachtet werden konnte.

Die Aussage, dass eine MHP-Behandlung des Werkstoffs zu keiner Bildung von Rissen an der bearbeiteten Materialoberfläche führt, kann dabei im Einklang mit dem Stand der Technik erfolgen (siehe z.B.: [29]). Zudem konnte die Behauptung auch im Zuge des, die Grundlage dieser Arbeit bildenden Projekts anhand diverser metallurgischer Gefügeuntersuchungen bestätigt werden. Dabei wurde, wie beispielsweise anhand des Werkstoffs X3CrNiMo 13-4 (1.4313) in [52] publiziert, das Gefüge MHP-bearbeiteter Proben anhand von Probenschnitten untersucht. Die Betrachtung kommt zu dem Schluss, dass trotz plastischer Deformation infolge der MHP-Bearbeitung keine Rissbildung beziehungsweise auch keine deutliche Korndeformationen des vorliegenden Werkstoffgefüges beobachtet werden kann. Damit stellt die inkrementelle, sukzessive Umformung des Werkstoffs infolge der MHP-Bearbeitung der Oberfläche, welche anhand von Abbildung 33 durch die Überlagerung von drei Schlagpositionen im jeweiligen Abstand von etwa 0,3mm nachgestellt ist, eine vergleichsweise schonende Behandlung dar. Diese Aussage bezieht sich auf vergleichbare Oberflächenbehandlungen, welche, wie beispielsweise in [29] anhand des Festwalzens dargestellt, durchaus zur Entstehung von Rissen führen können.

Grundlegend ist im Zuge einer abschließenden Betrachtung des vorliegenden Versuchs noch einmal festzuhalten, dass die dargestellte Untersuchung des Werkstoffgefüges durch den experimentellen Aufbau nur einen bedingten Vergleich mit dem realen MHP-Prozess erlaubt. Durch die Betrachtung des auf der Probenseitenkante erfolgenden Einschlags stellt sich letztlich immer ein Ausweichen des Materials zur Seite ein.

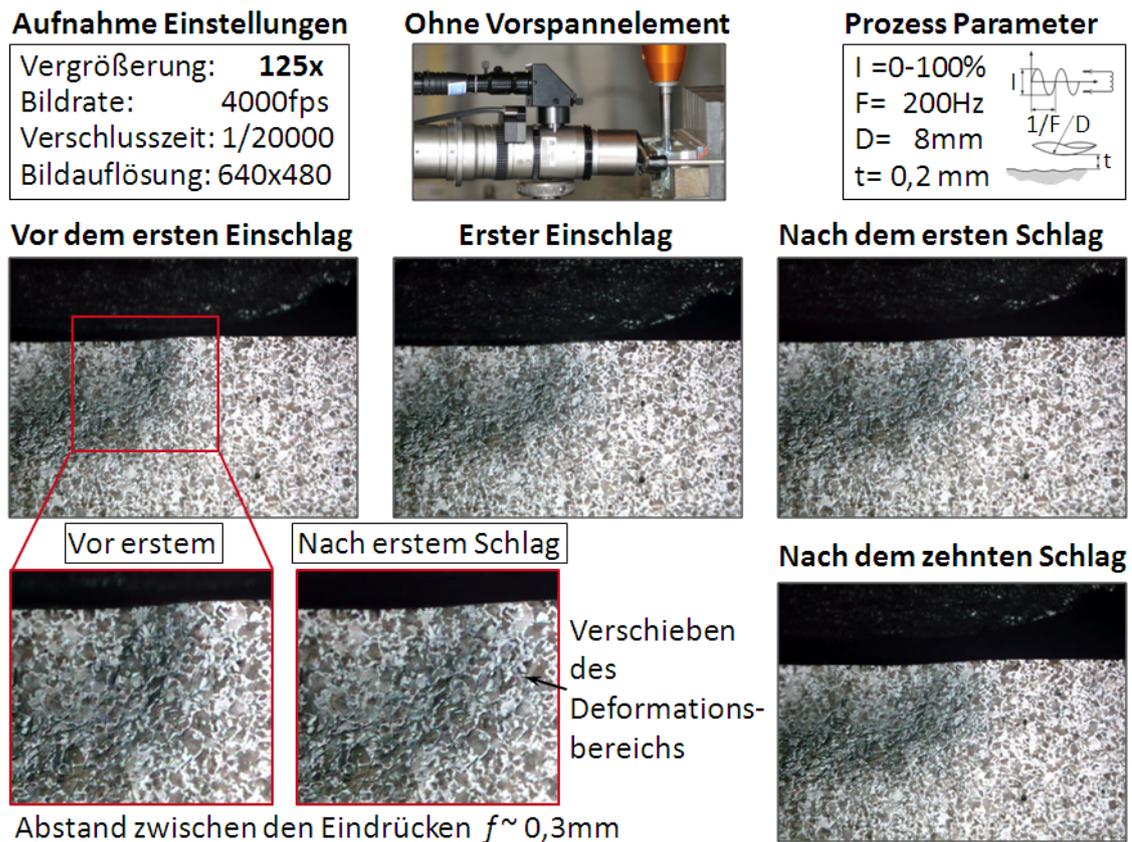


Abbildung 33: Überlagerung der Deformationsbereiche einzelner Einschläge

Dadurch können die dargestellten Ergebnisse, selbst bei Vorhandensein eines vorgespannten Mediums (Glasplatte), nur bedingt auf reale Verhältnisse im Zuge eines Einschlags des MHP-Werkzeugs auf die Oberfläche eines massiven Festkörpers umgelegt werden.

Dennoch lassen sich die Untersuchungsergebnisse anschaulich mit der Theorie der Hertz'schen Pressung (siehe Kapitel 2.3.3) in Verbindung bringen. Wie Abbildung 33 zeigt, erfolgt die Ausbildung des beobachteten Deformationsbereichs hierbei in etwa in jener Zone unterhalb der Materialoberfläche, in welcher mit dem Auftreten maximaler Scherspannungen gerechnet werden darf. Eine deutlich vorliegende, plastische Deformation dieser Materialregionen kann also erwartet werden. Es sei hierbei angemerkt, dass ein direktes Abschätzen der Tiefenwirkung anhand von im Zuge vorangegangener Aufnahmen erzeugten Deformationen nicht möglich ist, da diese aus einer Vielzahl an Schlägen des Werkzeugs auf derselben Probenposition resultieren.

Letztlich können anhand dieses Zusammenhangs auch die im Zuge von Kapitel 6.3 dargestellten klassischen Tiefenverläufe der durch den MHP-Prozess induzierten Druckeigenspannungen nachvollzogen werden (siehe Abbildung 64 bzw. Abbildung 69). Das hier jeweils unterhalb der Materialoberfläche liegende Maximum an

Druckspannungen dürfte sich dabei in jenen Regionen ergeben, welche im Zuge der Materialmodifikation das Maximum an plastischer Deformation erfahren. Dieser Zusammenhang mit dem Verweis auf ähnliche Spannungsverläufe wird beispielsweise auch durch Schulze in [9] für die Technologie des Kugelstahlenes (shot peening) diskutiert (vgl. [9] S.35).

## 5.5 Optimierung der Bearbeitungsstrategie

Wie im Zuge der vorangegangenen Kapitelabschnitte dargestellt, basiert die MHP-Oberflächenbehandlung auf einer systematischen Materialumformung. Ausgehend von einzelnen Schlägen die im Zuge einer Bearbeitungsbahn aneinandergereiht werden, wird durch den Prozess letztlich eine bahnhweise Flächenbearbeitung realisiert. In der Übergangszone von bearbeiteten zu unbearbeiteten Oberflächenbereichen kommt es dabei zur Bildung von Materialaufwerfungen (siehe Abbildung 29). Am deutlichsten ist dieser Effekt bei der letzten Bearbeitungsbahn einer bearbeiteten Fläche zu erkennen. Neben der massiv ausgeprägten letzten Bahn kommt es hier durch das in Prozessrichtung getriebene Material zur Aufstauung eines deutlichen Materialkamms (siehe Abbildung 34a).

Im Zuge diverser Anwendungsfälle ist es jedoch erforderlich, einen möglichst gleichmäßigen Auslauf des Prozesses zu gewährleisten. Dies gilt insbesondere bei funktionell bedingten, scharfkantigen Strukturen eines Werkstücks wie beispielsweise bei Schneidkanten von Stanzwerkzeugen oder der Hauptschneide einer Peltonturbinenschaufel. Um die Funktionalität derartiger Bauteilbereiche uneingeschränkt auch nach einer MHP-Behandlung gewährleisten zu können, muss hier durch eine geeignete Prozessführung die vorliegende Bauteilgeometrie bestmöglich erhalten bleiben.

Die CAM-Software der Firma accurapuls stellt zu diesem Zweck mit der Funktion „scharfe Kanten“ Möglichkeiten zur Verfügung, die Bahngenerierung an den Grenzen eines Bearbeitungsbereichs zu beeinflussen. Wie in Abbildung 34b dargestellt, kann dabei zunächst ein „Kantenschutz“-Bereich definiert werden. Dieser beschneidet das eigentliche Bearbeitungsfeld, wodurch die letzte Bearbeitungsbahn von einer zu schützenden Geometrie wegversetzt wird. Zudem ist es möglich, die Schlagdistanz ab einem zu definierenden „kritischen Abstand“ sukzessive um eine „max. Zustellung“ zu reduzieren. Infolge dieser Reduktion wird, wie in Kapitel 5.1.1 ausgeführt, die Schlagenergie im Übergangsbereich gemindert, wodurch sich letztlich die plastische Verformung reduziert.

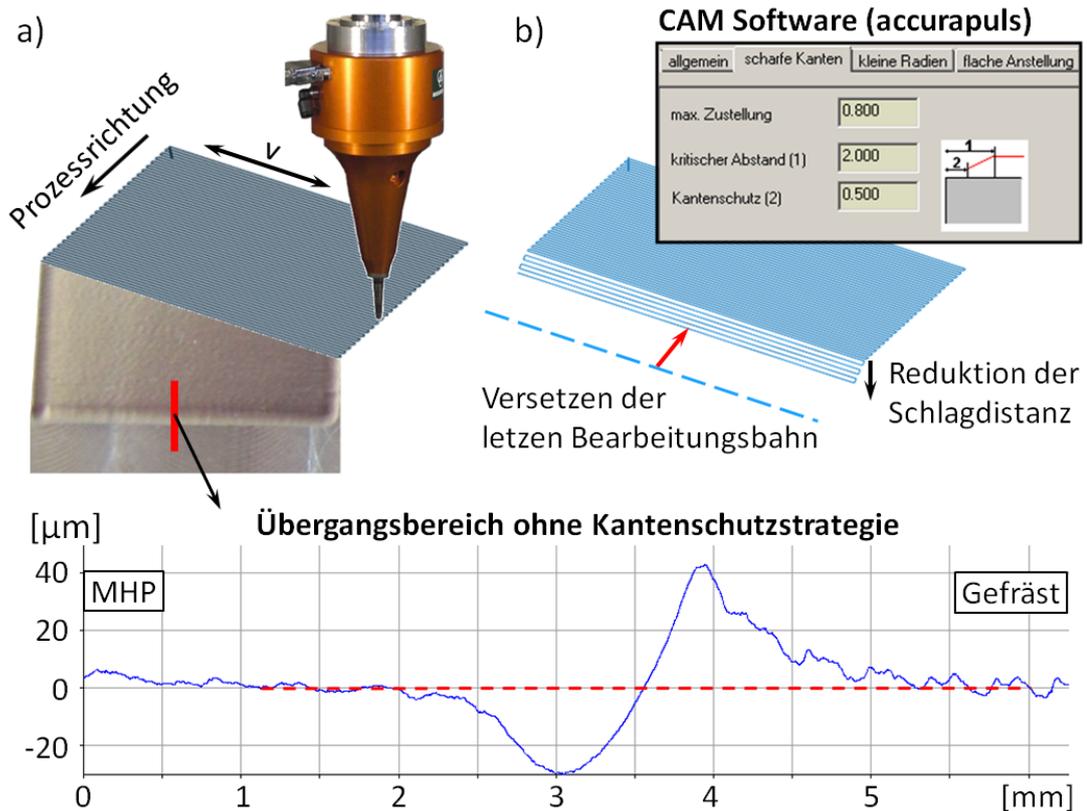


Abbildung 34: Kantenschutzstrategien: a) Übergangsbereich von MHP-bearbeiteter zu unbearbeiteter Fläche b) Einstellungsoptionen der Kantenschutzfunktion

Anhand der im Folgenden dargestellten Untersuchungen sollen die in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels gewonnenen Erkenntnisse über den Oberflächenmodifikationsverlauf genutzt werden, um gegebenenfalls die bestehenden Kantenschutzoptionen durch erweiterte Strategien der Bearbeitungsbahngenerierung in den Übergangsbereichen zu optimieren. Für die Untersuchung der Auswirkung einzelner Bahnführungsstrategien wurden Felder einer Länge von 20mm und einer Breite von 10mm mit den in Tabelle 10 gegebenen Prozessparametern auf dem Werkstoff C45E (1.1191) bearbeitet. Die Vorschubrichtung wurde dabei parallel zur Längsseite des Versuchsfeldes gelegt. Im direkten Anschluss an diese Bearbeitung wurden ohne Unterbrechung des Prozesses weitere Bearbeitungsbahnen gesetzt, durch welche über eine geeignete Materialführung ein möglichst gleichmäßiger Übergang zwischen der MHP-bearbeiteten und der unbearbeiteten (plangefrästen) Materialoberfläche erreicht werden sollte.

Im Zuge von ersten Versuchen sollte dabei geklärt werden, ob durch eine Variation (Erhöhung) des Bahnabstandes und damit über eine höhere Materialverschiebung gegen die Prozessrichtung (siehe Kapitel 5.3) ein Auffüllen der im Allgemeinen deutlich ausgeprägt verbleibenden letzten Bearbeitungsbahn erreicht werden kann.

Tabelle 10: Parameter für die Erstellung des Ausgangsfeldes

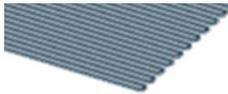
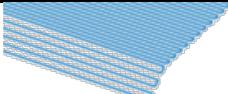
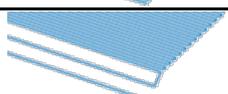
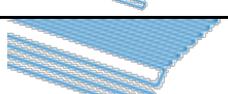
-	<b>D</b> [mm]	<b>F</b> [Hz]	<b>I</b> [%]	<b>v</b> [mm/min]	<b>s</b> [mm]	<b>t</b> [mm]
Parameterwert	8	200	100	2400	0,2	1

Erläuterung der Prozessparameter siehe Kapitel 4.2.

Zu diesem Zweck wurden neben zwei Referenzfeldern, eines gänzlich ohne Kantenschutzstrategie und eines mittels den durch die CAM-Software (accurapuls) gegebenen Schutzeinstellungen (sukzessiven Reduzierung der Schlagdistanz  $t$ , ohne Bahnabstandsvariation) erstellt, die in Tabelle 11 dargestellten Strategien untersucht. Wie die Tabelle zeigt, wurde bei allen Feldern die Schlagdistanz ausgehend vom für die Bearbeitung des Ausgangsfeldes vorgegebenen Wert von  $t=1\text{mm}$  auf  $t=0,2\text{mm}$  am Ende des Kantenschutzbereichs verringert. Die Reduktion erfolgte dabei gleichmäßig über die jeweils zwecks Kantenschutz angefügten Bahnen. Zudem wurden für die einzelnen Bahnen unterschiedliche Bahnabstände vorgegeben, deren Auswirkungen im Folgenden bewertet wurden.

Im Zuge dieser Bewertung wurde der jeweilige Übergangsbereich von MHP-bearbeiteter zu unbearbeiteter Fläche mittels dem 3D-Oberflächenmesssystem InfiniteFocus (Alicona) gemessen. Anhand der erstellten Datensätze wurden, wie in Abbildung 35 dargestellt, Schnittprofile quer zu den letzten, variierten Bearbeitungsbahnen extrahiert.

Tabelle 11: Untersuchte Strategien zur Abklärung des Bahnabstandeinflusses

<b>Strategie</b> [-]	<b>Bahnabstand s</b> [mm]	<b>Distanz t</b> [mm]	<b>Illustration der jeweiligen Strategie</b>
Ohne	-	-	
CAM	0,2/0,2/0,2/ 0,2/0,2	Red. auf 0,2	
01	0,3/0,3/ 0,3/0,1	Red. auf 0,2	
02	0,5/0,5	Red. auf 0,2	
03	0,5/0,3/0,2	Red. auf 0,2	
04	0,4/0,2/ 0,2/0,2	Red. auf 0,2	

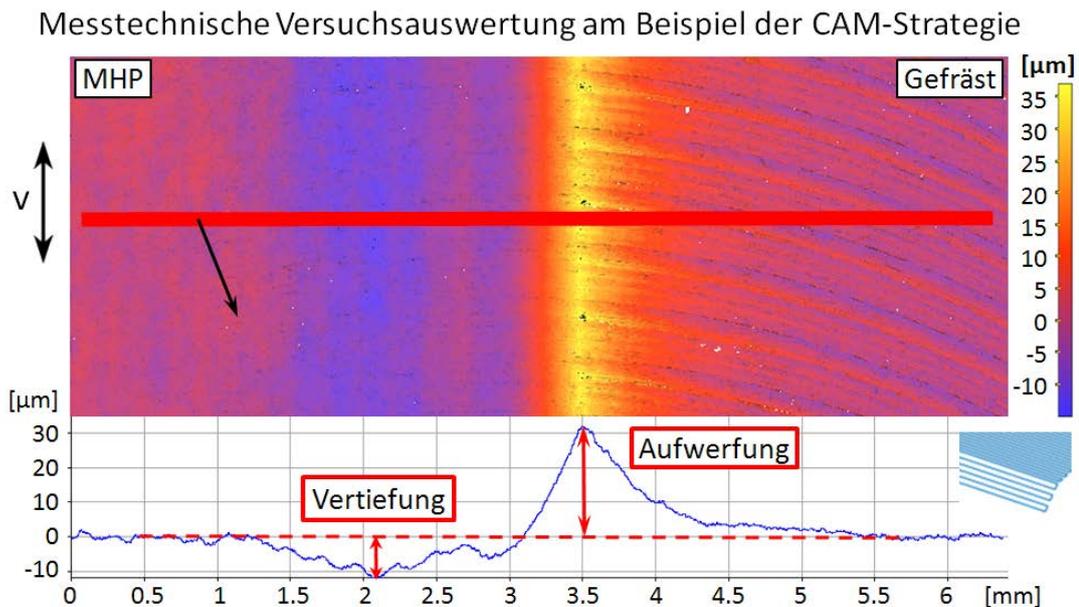


Abbildung 35: Messwerte zur Bewertung der Schutzstrategien

Für die Datensatzerstellung wurde dabei jeweils ein Objektiv 10-facher Vergrößerung genutzt und vergleichbare Einstellungen der lateralen und vertikalen Auflösung vorgegeben. Auch die Breite des, für die Extraktion der jeweiligen Querschnittsprofile vorzugebenden, Profilpfades wurde für alle Messungen konstant mit 200 Datenpunkten gewählt. Alle Datensätze wurden zudem vor der Extraktion einheitlich über eine Ebene ausgerichtet. Auf diese Weise sollte eine direkte Vergleichbarkeit der Übergangszonen zueinander gewährleistet werden. Um die Auswirkung der jeweiligen Strategie bewerten zu können, wurde zudem anhand der erstellten Querschnittsprofile jeweils die größte Materialerhebung (Aufwerfung) sowie die Tiefe der am deutlichsten ausgeprägten Bearbeitungsbahn (Vertiefung) vermessen (siehe Abbildung 35).

Die für die einzelnen Probenfelder erhobenen Messwerte sind zusammenfassend in Tabelle 12 dargestellt. Maximal- und Minimalwerte sind in dieser Tabelle farblich hinterlegt, wobei der jeweilige Maximalwert rot und der jeweilige Minimalwert grün gekennzeichnet sind.

Wie gezeigt werden kann, führten alle untersuchten Kantenschutzstrategien im Vergleich zur ohne Kantenschutzeinstellungen erstellten Referenzübergangsfläche sowohl zu einer Reduktion der Aufwerfungshöhe als auch zu einer Reduzierung der maximalen Tiefe der ausgeprägtesten Bahn. Betrachtet man die Gesamthöhendifferenz resultierend als Ergebnis der Addition aus gemessener Aufwerfung und dem Vertiefungswert, so wurde durch eine Erhöhung des Bahnabstandes vom Ausgangswert  $s=0,2\text{mm}$  auf  $s=0,5\text{mm}$  für die letzten beiden Bahnen (Strategie 02) der geringste Wert erzielt.

Tabelle 12: Anhand der Versuchsfelder der Untersuchung des Bahnversatzeinflusses erhobene Messwerte

Strategie [-]	Bahnabstand s [mm]	Aufwerfung [ $\mu\text{m}$ ]	Vertiefung [ $\mu\text{m}$ ]	Differenz [ $\mu\text{m}$ ]
Ohne	-	43,28	29,16	72,44
CAM	0,2/0,2/0,2/0,2/0,2	31,48	11,65	43,13
01	0,3/0,3/0,3/0,1	29,37	14,12	43,49
02	0,5/0,5	16,44	23,82	40,26
03	0,5/0,3/0,2	26,20	22,31	48,51
04	0,4/0,2/0,2/0,2	28,52	16,37	44,89

Dabei wird der im Zuge des Prozesses gebildete Materialkamm durch die beiden letzten Bahnen deutlich reduziert. Die letzte, vor Beginn des Kantenschutzbereichs gesetzte Feldbahn verbleibt jedoch deutlich ausgeprägt und führt zu einem vergleichsweise hohen Vertiefungswert.

Im Vergleich dazu kann eine Beibehaltung des Bahnversatzwertes in Kombination mit einer Reduzierung der Schlagdistanz, so wie sie durch die vorliegende Version der CAM-Software der Firma accurapuls vorgenommen werden kann, die Ausprägung einer Vertiefung mindern. Es kommt jedoch auch hier im Übergangsbereich von Feldbearbeitung zu Kantenschutzzone zu einem tieferliegenden Bereich.

Zwecks Veranschaulichung der diskutierten Strategieresultate wird in Abbildung 36 eine Gegenüberstellung der extrahierten Querschnittsprofile der mit den thematisierten Strategien erstellten sowie des ohne Kantenschutzstrategie resultierenden Übergangsbereichs gegeben.

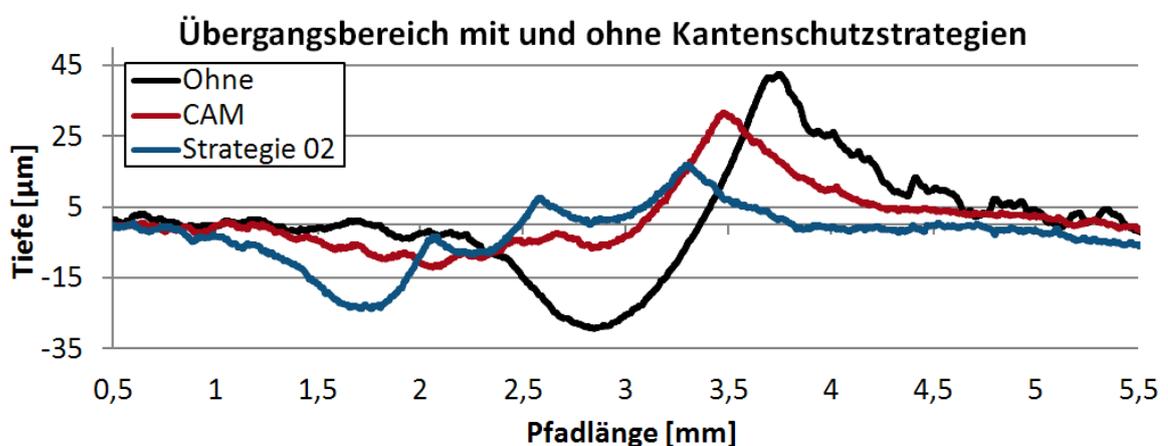
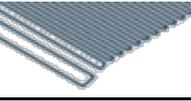
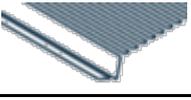


Abbildung 36: Vergleich der Übergangsbereiche ohne und mit Kantenschutz (Strategien 02 und CAM)

Tabelle 13: Strategien des Kantenschutzes durch Variation von Bahnabstand und Schlagdistanz  $t$ 

Strategie [-]	Bahnabstand $s$ [mm]	Distanz $t$ [mm]	Illustration der jeweiligen Strategie
05	1/-0,2/-0,2/ -0,2/-0,2	0,6	
06	0,2/0,3/0,5	Red. auf 0,6	
07	0,2/0,3/0,5	0,2/0,4/0,6	
08	0,2/0,4/0,4	0,2/0,5/0,5	

Im Zuge von weiterführenden Untersuchungen wurde neben einer Variation des Bahnabstandes über eine Variation der Schlagdistanz  $t$  versucht, eine Vertiefung im Übergangsbereich unter Beibehaltung beziehungsweise Verbesserung der Aufwerfungshöhenreduktion zu minimieren. Die betrachteten Strategien sind in Tabelle 13 beschrieben. Wie anhand der Tabelle ersichtlich, wurde zudem mittels Strategie 05 versucht, über eine Umkehr der Vorschubrichtung im Feldendbereich (entsprechende Bahnversatzwerte sind durch ein Minussymbol gekennzeichnet) die Zielsetzung der Vertiefungsreduktion durch eine gezielte Rückführung des Materials zu erreichen.

Tabelle 14 zeigt die an den einzelnen Feldern dieser Versuchsreihe zur Charakterisierung und Bewertung der jeweiligen Strategie erhobenen Messwerte, bei deren Ermittlung wie im Zuge der vorangegangenen Versuche verfahren wurde. Zur Erleichterung eines direkten Vergleichs sind die anhand des vorangegangenen Versuchs an den Referenzfeldern (ohne Kantenschutz und CAM-Strategie) gemessenen Ergebnisse erneut angeführt.

Tabelle 14: Vergleichswerte der Bahnversatz- und Schlagdistanzvariationsstrategien

Strat. [-]	Bahnabst. $s$ [mm]	Distanz $t$ [mm]	Aufwerfung [ $\mu\text{m}$ ]	Vertiefung [ $\mu\text{m}$ ]	Diff. [ $\mu\text{m}$ ]
Ohne	-	-	<b>43,28</b>	<b>29,16</b>	<b>72,44</b>
CAM	5x 0,2	Red. 0,2	31,48	<b>11,65</b>	<b>43,13</b>
05	1/4x -0,2	0,6	36,73	28,65	65,38
06	0,2/0,3/0,5	Red. 0,6	34,21	15,22	49,43
07	0,2/0,3/0,5	0,2/0,4/0,6	32,13	20,55	52,68
08	0,2/0,4/0,4	0,2/0,5/0,5	<b>28,11</b>	21,14	49,25

Wie anhand der Tabelle ersichtlich, konnte auch hier im Vergleich zu einer Bearbeitung die auf Kantenschutz Einstellungen verzichtet, im Zuge aller Strategien eine Verbesserung des Übergangsbereichs erreicht werden. Eine deutliche Reduktion der entstehenden Vertiefungen konnte allerdings im Verhältnis zur konventionellen Kantenschutzstrategie (CAM-Software) nicht ermöglicht werden. Obgleich die Höhe der Aufwerfung am Ende des mittels Strategie 08 bearbeiteten Feldes im Vergleich zu dieser Strategie leicht verbessert werden konnte, stellt der erreichte Wert von etwa  $28\mu\text{m}$  nicht das Optimum der beiden bisher durchgeführten Versuchsreihen dar (vgl. Tabelle 12). Der Wert ist aus diesem Grund gelb gekennzeichnet.

Die anhand von Strategie 05 durch eine Änderung der Vorschubrichtung und damit durch eine gezielte Materialrückführung angestrebte deutliche Reduzierung der ausgeprägten letzten Bearbeitungsbahn konnte nicht beobachtet werden. Anhand der näheren Betrachtung des Übergangsbereichs und dem direkten Vergleich zum Referenzquerschnitt ohne Kantenschutz Einstellungen (siehe Abbildung 37), kann dies auf einen zu gering gewählten Bahnversatz im Zuge der ersten zwecks Kantenschutz angefügten Bahn zurückgeführt werden.

Wie Abbildung 37 zeigt, wurde der Materialkamm am Feldende durch die angewandte Strategie zwar in Prozessrichtung verformt, es wurde jedoch kein Material in die dahinterliegende, ausgeprägte Bearbeitungsbahn zurückgeführt.

Wie anhand der Betrachtung der im Zuge von Strategie 05 vorgegebenen Bahnversatzwerte (in der Abbildung illustriert) ersichtlich wird, erfolgten die Schläge des MHP-Stößels im Zuge der ersten Kantenschutzbahn (versetzt um  $+1\text{mm}$  in Prozessrichtung) annähernd auf dem Materialkamm.

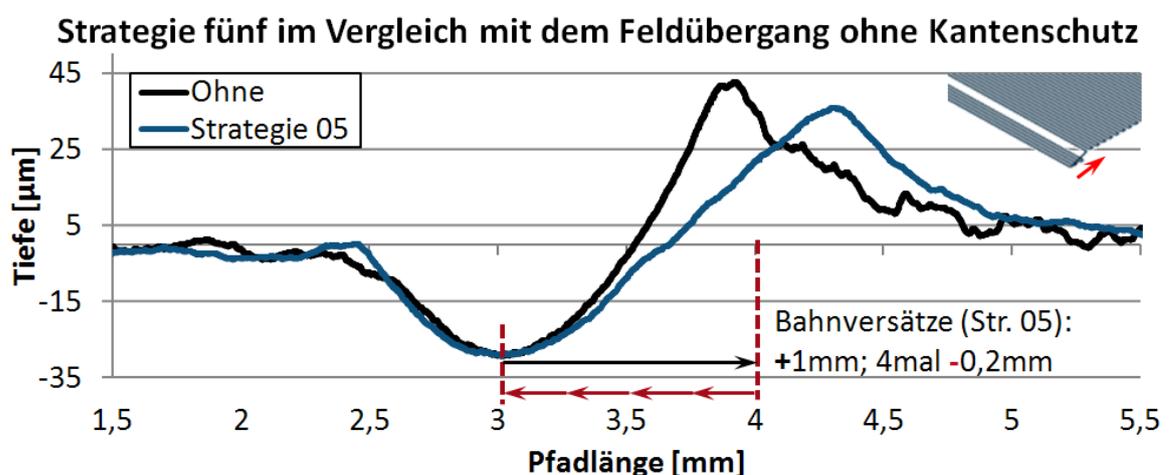


Abbildung 37: Übergangsbereichs ohne Kantenschutz und mit Strategie 05

Die gegen die Prozessrichtung geführten Folgebahnen (vier Bahnen im jeweiligen Bahnversatz von -0,2mm) treffen damit auf die Flanke des bereits nach der ersten Kantenschutzbahn teils in Prozessrichtung verformten Kamms. Dieser wird hierdurch weiter in Prozessrichtung verformt, ein Rücktransport von Material gegen die Prozessrichtung ist jedoch erschwert.

Um zu prüfen, ob eine Erhöhung des Versatzes vor einer Änderung der Vorschubrichtung den erwünschten Effekt einer gezielten Materialrückführung herbeiführen könnte, wurde für die Erstellung weiterer Felder der Versatzwert auf 2mm gesteigert. Im direkten Anschluss daran wurde der Prozess wiederum gegen die ursprüngliche Prozessrichtung geführt, wobei die Schlagdistanz  $t$  im Zuge der einzelnen Untersuchungen variiert wurde. Die genauen Einstellungen der jeweiligen Strategien sind in Tabelle 15 dokumentiert. Die Tabelle zeigt, dass infolge der letzten beiden Strategien die Bahnen des Kantenschutzes in den bereits bearbeiteten Werkstückbereich hinein geführt wurden, wodurch der Effekt der Übergangsverbesserung unterstützt werden sollte.

Die an den, mittels der dargestellten Strategien bearbeiteten Übergangsbereichen ermittelten Vergleichswerte (Aufwerfung und Tiefenwert der ausgeprägtesten Bearbeitungsbahn) sind neben den Werten der Referenzübergänge in Tabelle 16 angegebenen. Die Maximal- und Minimalwerte sind auch in dieser Tabelle grün (Minimalwert) und rot (Maximalwert) gekennzeichnet, wobei sich diese Kennzeichnung auf alle im Zuge dieses Kapitels erhobenen Messwerte bezieht.

Tabelle 15: Strategien des Kantenschutzes mittels Vorschubrichtungswechsels

Strategie [-]	Bahnabstand $s$ [mm]	Distanz $t$ [mm]	Illustration der jeweiligen Strategie
09	2 / 10x -0,2	1	
10	2 / 10x -0,2	Red. auf 0,1	
11	2 / 10x -0,2	0,1	
12	2 / 15x -0,2	0,1	
13	2 / 15x -0,2	0,1/0,2/0,3/0,4 2x 0,5 /0,4/ 0,3/0,2/6x 0,1	

Tabelle 16: Vergleichswerte bei Vorschubrichtungswechsel

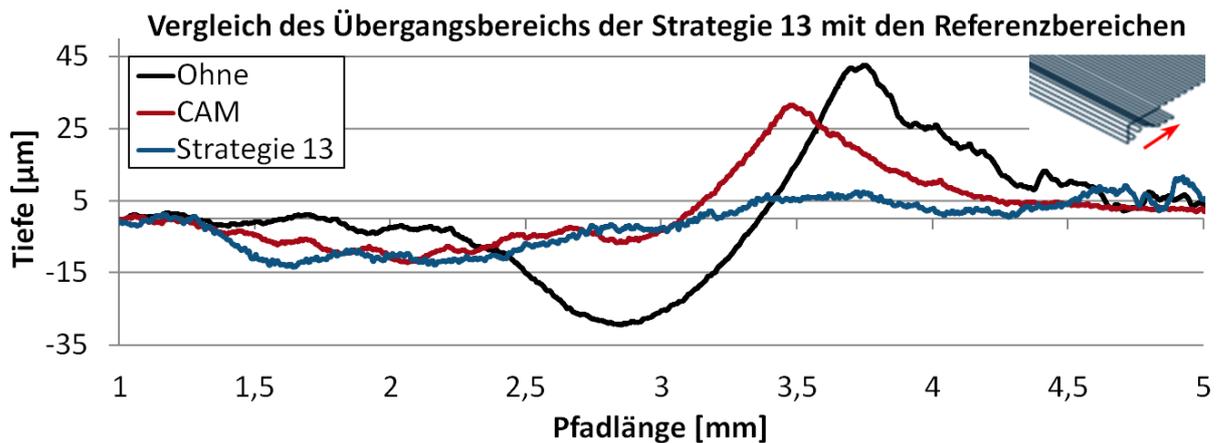
Strat. [-]	Bahnabst. S [mm]	Distanz t [mm]	Aufwerfung [ $\mu\text{m}$ ]	Vertiefung [ $\mu\text{m}$ ]	Diff. [ $\mu\text{m}$ ]
Ohne	-	-	43,28	29,16	72,44
CAM	5x 0,2	Red. 0.2	31,48	11,65	43,13
09	2 / 10x -0,2	1	22,98	28,57	51,55
10	2 / 10x -0,2	Red 0,6	19,97	10,62	30,59
11	2 / 10x -0,2	0,1	28,47	21,82	50,29
12	2 / 15x -0,2	0,1	29,21	17,00	46,21
13	2 / 15x -0,2	var.	8,31	13,00	21,31

Wie anhand eines Vergleichs der dargestellten Werte deutlich gemacht werden kann, konnte das Ziel der Reduzierung einer ausgeprägten Vertiefung durch die gezielte Rückführung von Material infolge des erhöhten Versatzabstandes am Beginn der Schutzstrategie erreicht werden. Die für diese Vergleichsgröße gemessenen Werte liegen im Falle von Strategie 10 und Strategie 13 im Bereich des konventionellen Kantenschutzes mittels CAM-Software. Im Zuge beider Strategien konnte zudem zusätzlich eine deutliche Reduktion der Materialaufwerfung am Ende des Bearbeitungsbereichs realisiert werden. Insbesondere Strategie 13, im Zuge derer durch eine zweckmäßige Variation der Schlagdistanz die Einschlagenergie am Beginn der Rückführung (nach dem Versatz in Prozessrichtung) sowie bei den letzten zwecks Kantenschutz erstellten Bahnen reduziert wurde, zeigt mit etwa  $8\mu\text{m}$  einen sehr guten Wert.

Wie in Abbildung 38 dargestellt, konnte auch eine deutliche Vertiefung im Übergangsbereich vermieden werden. Im direkten Vergleich zu einer Bearbeitung gänzlich ohne Kantenschutzoperation sowie auch zu einer Bearbeitung mittels traditioneller CAM-Schutzstrategie kann eine deutliche Verbesserung des Übergangsbereichs festgestellt werden.

Zusammenfassend kann daher festgehalten werden, dass alle angewandten Strategien zu einer Verbesserung des Übergangs zwischen MHP-bearbeiteter und unbearbeiteter Materialoberfläche führten. Die traditionelle Kantenschutzstrategie der accurapuls CAM-Software zeigt dabei durch einen geringen Eingriff in den Prozess nur eine geringe Tendenz zur Ausbildung deutlicher Vertiefungen.

Durch eine gezielte Rückführung von Material infolge einer geeigneten Prozessführung auf Basis der in Kapitel 5.3 erarbeiteten Erkenntnisse und eine zielgerichtete Variation der Schlagdistanz, deren Einfluss im Zuge von Kapitel 5.1.1 dargestellt werden konnte, kann der Übergangsbereich noch einmal signifikant eingeebnet werden.



*Abbildung 38: Querschnittsprofile der Übergangszonen: ohne Kantenschutz, Strategie 13 und CAM-Schutzoption*

Die letztlich gefundene Strategie (Strategie 13) führt im Vergleich zur derzeit vorliegenden CAM-Lösung zu annähernd gleich ausgeprägten Vertiefungswerten (Strategie 13:  $13\mu\text{m}$ ; CAM:  $11,65\mu\text{m}$ ), wobei jedoch die Entstehung eines Materialkamms am Ende des Bearbeitungsfeldes größtenteils unterbunden werden kann. Der hier erreichte Höhenwert von  $8,31\mu\text{m}$  bezeichnet dabei eine Reduktion um 73,6% der unter CAM-Schutzeinstellungen entstehenden Aufwerfungshöhe von  $31,48\mu\text{m}$ .

Aus diesem Grund kann die dargestellte Strategie (siehe Abbildung 38) insbesondere bei weicheren Werkstoffen angewendet werden, um scharfkantige Strukturen, deren Geometrie nach einer schlagverdichtungstechnischen Oberflächenbehandlung unverfälscht erhalten bleiben soll, effektiv gegen eine Deformation durch den Prozess zu schützen.

## 6 Experimentelle Untersuchung der technologischen Potentiale

Die direkte, deterministische Oberflächenbehandlung des Schlagverdichtens bietet in Hinblick auf die Oberflächen- und Materialmodifikation von Bauteilen erhebliche Potentiale. Der Modifikationsprozess wird dabei, wie in Abbildung 39 dargestellt, inputseitig durch System- und Prozessparameter beeinflusst, welche durch die resultierenden Prozessgrößen letztlich zu einer Beeinflussung des Härtezustandes der Oberfläche, einer Änderung der Oberflächentopographie sowie einer Modifikation des Eigenspannungszustandes der Werkstückrandzone führen.

Eine gezielte Einflussnahme kann hierbei in erster Linie durch eine zweckmäßige Wahl der Prozessparameter erfolgen. Im Gegensatz dazu können Systemparameter dem Prozess nicht direkt vorgegeben werden beziehungsweise sind diese im Zuge des Prozessverlaufs nicht mehr zu variieren.

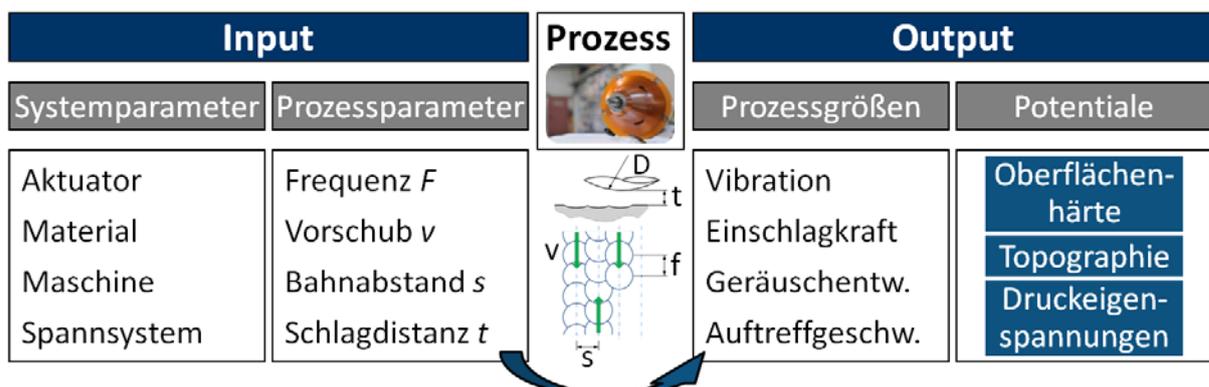


Abbildung 39: Prozessbetrachtung der MHP-Technologie

Im Folgenden werden die Potentiale der Technologie im direkten Zusammenhang mit maschinen- sowie aktuatorseitig stellbaren Prozessparameteren (siehe Kapitel 4.2) analysiert. Durch die Untersuchung unterschiedlicher Versuchswerkstoffe wird zudem ein Systemparameter in die Betrachtung mit einbezogen.

Die Untersuchungen verfolgen das Ziel, eine Grundlage für die Bewertung der unter optimierten Prozessparametern auf industriell relevanten Materialien umsetzbaren Modifikationspotentiale zu schaffen. Zudem soll ein Vergleich der dargestellten Ergebnisse zu bereits etablierten Verfahren ermöglicht werden. Auf diese Weise wird versucht, potentiellen Anwendern eine Einschätzung der technologischen Möglichkeiten einer MHP-Bearbeitung zu ermöglichen.

## 6.1 Beeinflussung der Oberflächenhärte

### 6.1.1 Auswirkung der plastischen Verformung auf den Oberflächenhärtewert

Der Begriff Härte wird üblicherweise als der Widerstand eines Werkstoffs gegenüber dem Eindringen eines anderen, härteren Werkstoffs definiert (vgl. [53] S.3). Um unterschiedliche Materialien und Werkstoffzustände miteinander vergleichen zu können, werden in genormten Prüfverfahren Härtewerte ermittelt. Bei den in der industriellen Praxis gebräuchlichen Verfahren wird dazu im Allgemeinen ein harter Prüfkörper einer bestimmten geometrischen Form durch eine definierte Kraft in die Prüfstückoberfläche gedrückt. Als Härtewert wird letztlich entweder die auf die Oberfläche des entstandenen Eindrucks bezogene Prüfkraft (Brinellhärte, Vickershärte) oder die vom Eindringkörper hinterlassene Eindringtiefe (Rockwellhärte) angegeben (vgl. [54] S.57).

Im Zuge des Schlagverdichtens kommt es zu einer wiederholten, örtlichen, plastischen Verformung der Werkstückoberfläche. Es kann dabei davon ausgegangen werden, dass die Temperatur des Werkstoffs während des Prozesses auch in der Wechselwirkungszone zwischen Werkzeug und Werkstück deutlich unterhalb seiner Rekristallisationstemperatur liegt, die für Stahlmaterialien in einem Größenordnungsbereich von etwa 400°C abgeschätzt werden kann. Aus diesem Grund kann von einer Kaltverformung im Zuge des Prozesses gesprochen werden, die durch die Erzeugung neuer Versetzungen (siehe Kapitel 2.3) zu einer Verfestigung des Werkstoffs, der Kaltverfestigung führt (vgl. [14] S7).

Obgleich ein Zusammenhang zwischen der Härte und der Festigkeit eines Werkstoffs nur bedingt hergestellt werden kann, ist bekannt, dass Härte- und Festigkeitswerte großteils positiv korreliert sind (DIN 18265 [55] enthält hier beispielsweise empirische Beziehungen für eingeschränkte Gültigkeitsbereiche). Damit kann letztlich eine Festigkeitssteigerung des Werkstoffs meist auch anhand der Härtekennwerte nachvollzogen werden. Dies führt auch zur Begriffsdefinition nach VID-Richtlinie 3137, welche den Begriff Verfestigung mit einer „*Erhöhung der Fließspannung (Formänderungsfestigkeit) und Härte mit zunehmender Umformung (Formänderung)*“ ([56] S.6) definiert.

Dabei stellt, wie anhand von Kapitel 2.3 ausgeführt, das Ausmaß der plastischen Verformung im Zuge eines Kaltverformungsprozesses eine wesentliche Einflussgröße für das Ausmaß der herbeigeführten Verfestigung dar. Wie anhand der in Kapitel 5.1.1 dargestellten Untersuchung gezeigt werden kann, ist die Schlagdistanz  $t$ , welche den Ausgangsabstand zwischen Stößelspitze und Werkstückoberfläche bezeichnet, als maßgebliche Einflussgröße anzusehen, auf

welche die durch den Schlagprozess resultierende plastische Verformung zurückgeht.

Aus diesem Grund soll im Zuge der im Folgenden dargestellten Untersuchung der Einfluss der Schlagdistanz auf den resultierenden Oberflächenhärtezustand schlagverdichteter Probenoberflächen näher untersucht werden. Es werden dabei mit dem unlegierten Baustahl C45E (1.1191) und dem Kaltarbeitsstahl X155CrVMo 12-1 (1.2379) zwei Werkstoffe betrachtet, wobei die Untersuchungen jeweils sowohl im normalisierten als auch im thermisch gehärteten Ausgangszustand des Werkstoffs erfolgen.

Auf jeder Probe wurden insgesamt sechs Probenfelder bearbeitet, für deren Erstellung die Schlagdistanz  $t$  ausgehend vom Wert  $t=0,3\text{mm}$  in Schritten von  $t=0,2\text{mm}$  zunehmend gesteigert wurde. Bei der Bearbeitung des Probenwerkstoffs X155CrVMo 12-1 (1.2379) sowie für den im gehärteten Ausgangszustand befindlichen Werkstoff C45E (1.1191) konnte dabei die Schlagdistanz bis auf einen Wert von  $t=1,3\text{mm}$  erhöht werden. Auf der im ungehärteten Ausgangszustand befindlichen C45E Stahlprobe konnte hingegen diese letzte Parameterausprägung von  $t=1,3\text{mm}$  nicht erreicht werden, da es bei Vorgabe dieses Wertes nach kurzem Verfahrenweg der Maschine zum „Abreißen“ des Prozesses kam (siehe Kapitel 4.2; „Abreißen“ des Prozesses). Aus diesem Grund wurde für die Bearbeitung dieser Probe der letztlich höchste Distanzwert mit  $t=1,2\text{mm}$  gewählt. Es kann in diesem Zusammenhang angemerkt werden, dass die maximal erreichbare Schlagdistanz eine werkstoffspezifische Größe darstellt, wobei sich der erreichbare Maximalwert insbesondere für Versuchswerkstoffe geringerer Ausgangshärte reduziert. Die übrigen Prozessparameter wurden im Zuge der Untersuchung auf sämtlichen Probenfeldern konstant gehalten und sind in Tabelle 17 dargestellt. Die Wahl dieser Parameter wurde aufgrund der Tatsache getroffen, dass hierdurch eine flächendeckende Bearbeitung der einzelnen Felder mit einander überdeckenden Einzeleinschlagflächen gewährleistet werden kann.

*Tabelle 17: Fixierte Parameterwerte der Untersuchungen zur Oberflächenhärteänderung*

<b>Prozessparameter</b>	<b>Fixierte Ausprägung</b>
Kugeldurchmesser $D$ [mm]	8
Bahnabstand $s$ [mm]	0,2
Vorschub $v$ [mm/min]	2400
Frequenz $F$ [Hz]	200
Intensität $I$ [%]	100

Die im Folgenden in Hinblick auf den Einfluss des variierten Prozessparameters diskutierten Oberflächenhärtewerte wurden am Institut für Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnologie (WWWT, TU-Wien) ermittelt. Dabei kam mit dem Microdur II (Krautkramer Branson) ein auf dem Ultrasonic Contact Impedance (UCI)-Verfahren basierendes Härteprüfgerät zur Anwendung.

Zur Bestimmung des Härtewertes wird im Zuge dieses Verfahrens ein Eindringkörper nach Vickers (136° Pyramide aus Diamant) verwendet, welcher über einen frei schwingenden Resonator unter gegebener Last, im vorliegenden Fall 150g, in Kontakt mit der Oberfläche gebracht wird. Hierdurch erhöht sich dessen Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Kontaktfläche und der elastischen Eigenschaften an der Kontaktstelle. Sind die elastischen Konstanten des zu prüfenden Werkstoffes bekannt, kann über die gemessene Frequenzänderung auf die Kontaktfläche geschlossen werden, deren Kenntnis letztlich die Bestimmung der Härte erlaubt (vgl. [57] S.5). Auf diese Weise wird bei einer Indentereindringtiefe von etwa 10µm eine lokale Härteprüfung im Oberflächenbereich durchgeführt.

Für jedes im Zuge der Versuche erstellte Probenfeld wurden zur Bestimmung der gegebenen Oberflächenhärtewerte im Allgemeinen neun Einzelmessungen durchgeführt, deren Mittelwerte und Standardabweichungen in Form der folgenden Diagramme dargestellt sind (Härtewerte für  $t=0,5\text{mm}$  und  $t=0,7\text{mm}$  beruhen für den gehärteten Werkstoffs 1.2379 jeweils nur auf sechs Einzelmesswerten).

Abbildung 40 zeigt die Oberflächenhärtewerte der untersuchten Proben des Werkstoffs C45E (1.1191) und stellt einander dabei die Messergebnisse für das gehärtete und nicht gehärtete Ausgangsmaterial gegenüber. Die maximal erreichte Härtesteigerung in Prozent der Ausgangshärte (im Diagramm mit *Ref.* bezeichnet), welche für den gehärteten Werkstoff bei 527HV (~51HRC; Umwertung nach DIN 18265 [55] – Tabelle B.2), für das nicht gehärtete Material bei 230HV (18,5HRC; nach [55] – Tab.B.3) liegt, ist jeweils neben dem hier zugehörigen Balken (maximaler Härtewert) angegeben.

Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, konnte insbesondere für das gehärtete Material nicht an allen mit variiertem Schlagdistanz erstellten Versuchsfeldern eine signifikante Härtesteigerung festgestellt werden.

Obgleich die erhobenen Messwerte in annähernd sämtlichen Fällen betragsmäßig über dem für das Ausgangsmaterial gemessenen Härtewert liegen, bewegen sich einige Messergebnisse im ausgeprägten Streubereich des Referenzmesswertes.

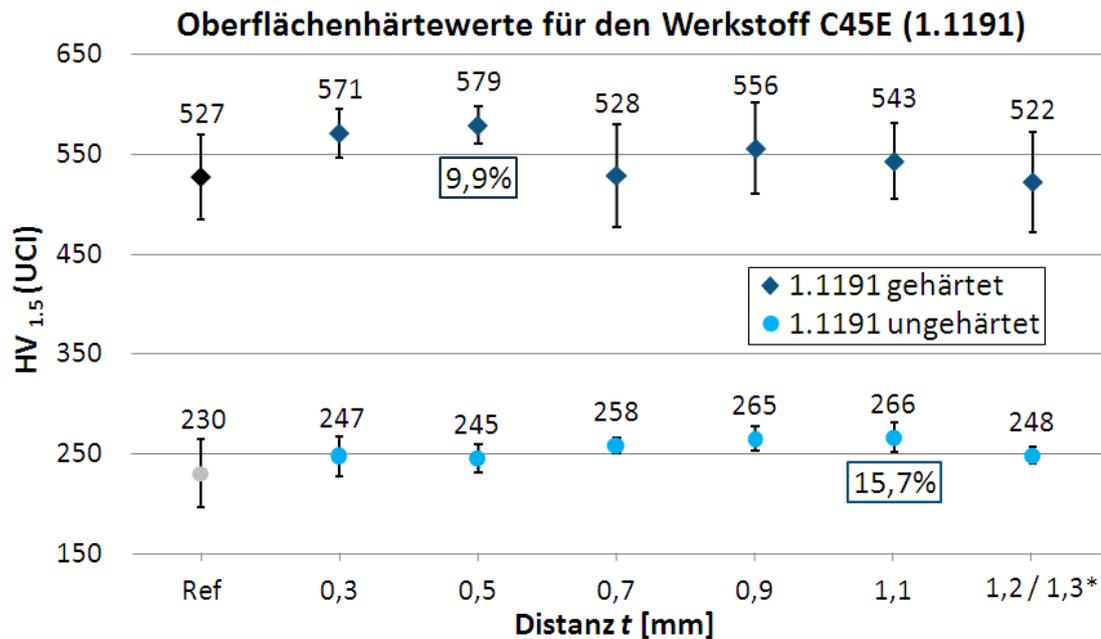


Abbildung 40: Oberflächenhärte in Abhängigkeit der Schlagdistanz  $t$  für den Werkstoff C45E (1.1191)

\*...  $t=1,2\text{mm}$  für ungehärteten,  $t=1,3\text{mm}$  für gehärteten Werkstoff.

Im Falle des ungehärteten Ausgangszustandes kann ein gewisser Zusammenhang der erreichten Härtesteigerung mit einer Erhöhung des Schlagdistanzwertes abgeleitet werden. Hierbei steigt die Härte der Oberfläche infolge einer Erhöhung der Schlagdistanz an, wobei die maximale Härtesteigerung an jener Fläche auftritt, für welche ein Distanzwert von  $t=1,1\text{mm}$  vorgegeben wurde. Der Abfall an Oberflächenhärte für das mit dem Maximalwert von  $t=1,2\text{mm}$  bearbeitete Feld könnte dabei darauf zurückgeführt werden, dass sich dieser Wert der Schlagdistanz nahe der „Abrissgrenze“ des Prozesses bewegt, wodurch die Möglichkeit eines vergleichsweise instabilen Bearbeitungsprozesses für dieses Feld nicht ausgeschlossen werden kann.

Da es zudem auffällig ist, dass der Streubereich der Messwerte für die MHP-bearbeiteten Oberflächen im Vergleich zur unbearbeiteten Referenz deutlich geringer ausfällt, kann im Allgemeinen durchaus von einer Steigerung der Oberflächenhärte infolge einer MHP-bedingten Kaltverfestigung gesprochen werden. In diesem Zusammenhang würde sich auch die Zunahme der Härte infolge einer mit der Schlagdistanzerhöhung einhergehenden erhöhten plastischen Deformation erklären lassen.

Ein ähnlicher Zusammenhang kann allerdings auf Basis der vorliegenden Messergebnisse nicht für den thermisch gehärteten Stahl abgeleitet werden. So zeigt sich für diese Probe keine zunehmende Erhöhung der Oberflächenhärte infolge einer Steigerung der Schlagdistanz. Die maximal erreichte Oberflächenhärte liegt

hingegen bei einer eher geringen bis mittleren Ausprägung des untersuchten Faktors. Zudem weisen auch die Härtemessungen an den MHP-bearbeiteten Oberflächen dieser Probe eine sehr ausgeprägte Streuung der Einzelmesswerte auf. Dennoch kann insbesondere für die Schlagdistanzwerte von  $t=0,3\text{mm}$  und  $t=0,5\text{mm}$  von einer messbaren Steigerung des Härtewertes der bereits thermisch gehärteten Oberfläche durch die MHP-Behandlung gesprochen werden.

Eine derartige Erhöhung der Oberflächenhärte von gehärtetem Grundmaterial konnte auch im Zuge der Untersuchung des Werkstoffs X155CrVMo 12-1 (1.2379) nachgewiesen werden, deren Ergebnisse anhand von Abbildung 41 dargestellt sind. Im Falle dieses hochlegierten Kaltarbeitsstahls liegen zudem die an der thermisch gehärteten sowie der ungehärteten Probe erreichbaren maximalen Härtesteigerungen mit 14,6% und 13,5% in etwa im selben Größenordnungsbereich.

Wie anhand der Darstellung der Messergebnisse ersichtlich, zeigt sich für diesen Werkstoff im Vergleich zum oben dargestellten Vergütungsstahl C45E ein gegenläufiges Bild in Bezug auf die den maximalen Härtewerten zugeordneten Schlagdistanzwerte. Dabei kann die maximal erreichte Oberflächenhärte für das gehärtete Material bei einem vergleichsweise hohen Schlagdistanzwert von  $t=0,9\text{mm}$  gefunden werden. Für das ungehärtete Grundmaterial wurde der Maximalwert auf dem mit geringster Distanz  $t=0,3\text{mm}$  bearbeiteten Versuchsfeld gemessen.

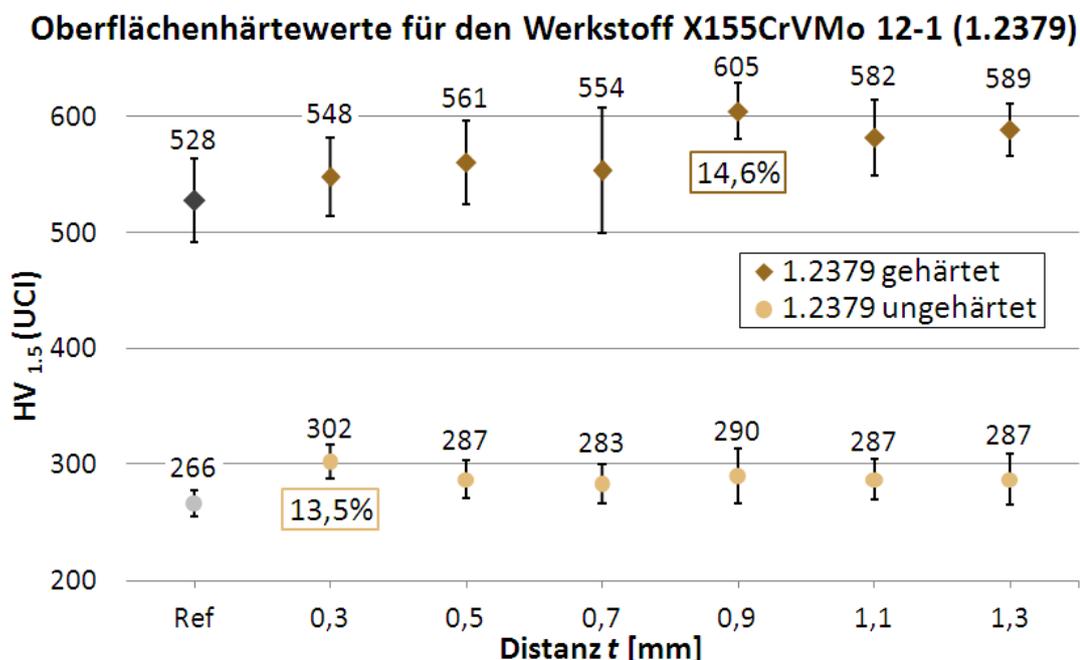


Abbildung 41: Oberflächenhärte in Abhängigkeit der Schlagdistanz  $t$  für den Werkstoff X155 CrVMo 12-1 (1.2379)

Die Messwerte der ungehärteten Probe dieses Werkstoffs zeigen zudem keine ausgeprägte Tendenz in Bezug auf den Einfluss der Schlagdistanz. Die erreichten Härtewerte bewegen sich unabhängig vom Vorgabewert des untersuchten Parameters auf einem annähernd konstanten Niveau ( $\sim 287\text{HV}$ ), wobei eine Ausnahme für den maximal erreichten Härtewert von etwa  $300\text{HV}$  bei  $t=0,3\text{mm}$  besteht.

Basierend auf den im Zuge dieses Kapitels dargestellten Untersuchungsergebnissen kann daher kein materialübergreifender Zusammenhang von Härtesteigerung und Schlagdistanzwert gegeben werden. In Bezug auf die untersuchten Stahlmaterialien unterschiedlicher Ausgangshärte konnte aber die aus der Literatur bekannte Steigerung der Oberflächenhärte nachvollzogen werden (siehe Kapitel 2.4).

Die Auswirkung einer durch das MHP-Verfahren erreichten Erhöhung des Härtewertes auf das Verschleißverhalten behandelter Stahlproben wurde im Zuge von [58] zusammengefasst. Dabei wurde anhand von Tribometer-Untersuchungen die Steigerung der Oberflächenhärte mit einer Verschleißerhöhung des gegen die Flächen geriebenen Gegenkörpers, einer  $100\text{Cr6}$  (1.2067) Stahlkugel des Durchmessers  $10\text{mm}$  in Verbindung gebracht.

### **6.1.2 Einfluss von Mehrfachbearbeitung**

Um den Einfluss einer mehrfachen (doppelten) MHP-Bearbeitung auf die, an der Oberfläche des Materials erzielbaren Härtewerte zu untersuchen, wird im Folgenden eine Probe des Werkstoffs  $\text{X3 CrNiMo 13-4}$  (1.4313) mit den Abmessungen  $160 \times 120 \times 20\text{mm}$  betrachtet.

Im Zuge des Versuchs wurden auf der Oberfläche dieser Probe drei Versuchsfelder ( $20 \times 20\text{mm}$ ) erstellt, wobei für die Erstellung des ersten Feldes ein als eher gering anzusehender Schlagdistanzwert von  $t=0,3\text{mm}$  vorgegeben wurde. Das zweite Versuchsfeld wurde hingegen mit einer vergleichsweise hohen Ausprägung dieses Faktors von  $t=1,2\text{mm}$  bearbeitet. Für die Bearbeitung des dritten Versuchsfeldes wurden insgesamt zwei Bearbeitungsschritte durchgeführt. Nach einer Vorbearbeitung mit  $t=1,2\text{mm}$  erfolgte eine zweite MHP-Behandlung der Versuchsfeldfläche unter Vorgabe des geringeren Schlagdistanzwertes von  $t=0,3\text{mm}$ . Die Vorschubrichtungen dieser beiden Bearbeitungsschritte wurden hierbei nicht variiert und für beide Bearbeitungen ident gehalten.

Die übrigen nicht variierten Parametereinstellungen des dargestellten Versuchs können Tabelle 18 entnommen werden.

Tabelle 18: MHP-Parametersetting des Versuchs der Härteänderung durch Mehrfachbearbeitung anhand von 1.4313 Stahl

-	D [mm]	F [Hz]	I [%]	v [mm/min]	s [mm]
Parameterwert	6	200	100	2400	0,2

Erläuterung der Prozessparameter siehe Kapitel 4.2.

Wie die Betrachtung der an den einzelnen Probenfeldern sowie einer unbearbeiteten Referenzfläche gemessenen Härtewerte zeigt, konnte an der mittels geringer Schlagdistanz bearbeiteten Oberfläche des betrachteten Materials die größte relative Härtesteigerung verzeichnet werden (siehe Abbildung 42). Der ermittelte Härtezuwachs von etwa 9% muss dabei allerdings auch im Kontext einer ausgeprägten Streuung der an der Referenz ermittelten Messwerte gesehen werden.

Für das mit hohem Schlagdistanzwert erstellte Versuchsfeld kann im Vergleich zum Referenzwert keine Steigerung der Oberflächenhärte durch die MHP-Behandlung abgeleitet werden. Damit zeigt der untersuchte Werkstoff ähnlich dem oben betrachteten Kaltarbeitsstahl 1.2379 eine deutlichere Härtesteigerung infolge einer Bearbeitung mittels eher geringer Schlagdistanz.

Der Härtewert der dritten, doppelt bearbeiteten Oberfläche liegt in etwa zwischen jenen der beiden anderen Felder und bewegt sich damit im oberen Streubereich der Referenzmesswerte. Aus diesem Ergebnis kann geschlossen werden, dass über eine mehrfache Bearbeitung des betrachteten Werkstoffs keine Steigerung des letztlich vorliegenden Oberflächenhärtewertes erreicht wird.

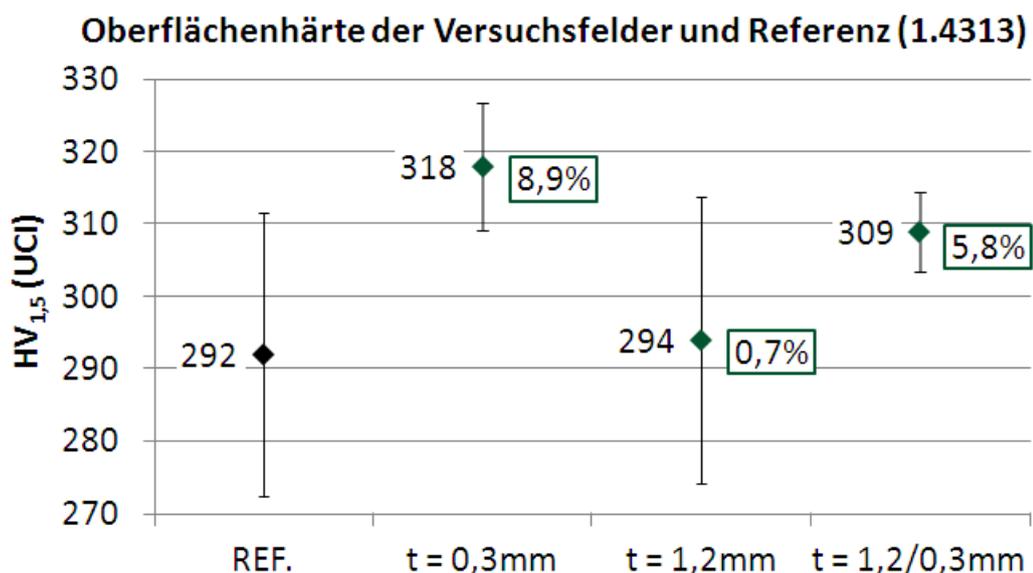


Abbildung 42: Oberflächenhärtewerte der beiden einfach sowie des doppelt bearbeiteten Versuchsfelds und der Referenzfläche

Zusammenfassend führen die hier sowie anhand des vorangegangenen Abschnittes dieses Kapitels dargestellten Ergebnisse zu dem Schluss, dass eine Erhöhung der plastischen Deformation des Materials nicht zwangsläufig zu einer maximalen Ausprägung der Oberflächenhärte führt.

Diese Aussage kann dabei sowohl in Bezug auf eine mehrfache Bearbeitung der Werkstoffoberfläche als auch in Bezug auf eine Erhöhung des Schlagdistanzwertes (Distanz  $t$ ) gegeben werden, welche wie anhand von Kapitel 5.1.1 ausgeführt mit einer Erhöhung der plastischen Deformation einhergeht.

Die diskutierten Untersuchungsergebnisse zeigen damit, dass der Schlagdistanzparameter in Bezug auf eine Steigerung der Oberflächenhärte, welche messbar und teils signifikant durch die MHP-Behandlung herbeigeführt werden konnte, immer in Bezug auf den betrachteten Werkstoff gesehen werden muss. Hierdurch kann der Effekt der Oberflächenhärtesteigerung durch eine materialspezifische Optimierung des Prozessparameters Schlagdistanz maßgeblich erhöht werden.

## **6.2 Beeinflussung der Oberflächentopographie**

### **6.2.1 Prozessparametereinfluss auf die Oberflächenglättung**

Aus dem Stand der Technik (siehe Kapitel 2.4) kann auf eine deutliche Reduktion der Oberflächenrauheitswerte schlagverdichteter Oberflächen geschlossen werden. Auch der Einfluss gewisser Prozessparameter wie Kugeldurchmesser und Einschlagabstand auf das mittels Schlagverdichten zu erreichende Glättungsergebnis wird in einigen Literaturstellen dargestellt. Dieser Einfluss der Prozessparameter soll im Folgenden durch eine Parameterstudie für den Werkstoff C45E (1.1191) ermittelt werden. Daneben soll die Auswirkung des Ausgangsabstandes zwischen Werkzeug und Werkstück (Schlagdistanz  $t$ ) auf das Glättungspotential für unterschiedliche Werkstoffe betrachtet werden, welcher aus dem bekannten Stand der Technik nicht beziehungsweise nur bedingt abgeleitet werden kann. Letztlich wird anhand von Proben des Werkstoffes X3CrNiMo 13-4 (1.4313) die Auswirkung einer mehrfachen Bearbeitung auf das Glättungsergebnis thematisiert.

#### Einfluss von Kugeldurchmesser und Einschlagabstand:

Zwecks der Abschätzung des Einflusses der Parameter Kugeldurchmesser und Einschlagabstand wurden auf der Oberfläche einer Probe des Werkstoffes C45E (1.1191) einzelne Versuchsfelder erstellt. Die Oberfläche der Versuchsprobe wurde vor dem Versuch plan überfräst, wodurch sich in Richtung des Vorschubs der

späteren MHP-Behandlung eine Oberflächenrauheit von  $R_a=1,54\pm 0,22\mu\text{m}$  beziehungsweise  $R_z=8,38\pm 1,21\mu\text{m}$  einstellte. Normal zu dieser Richtung wurden auf der Ausgangsfläche die Rauheitswerte mit  $R_a=1,98\pm 0,41\mu\text{m}$  und  $R_z=10,91\pm 1,83\mu\text{m}$  bestimmt.

Bei der Versuchsumsetzung wurde für die Bearbeitung einzelner Versuchsfelder einheitlich eine Frequenz von  $F=200\text{Hz}$ , ein Intensitätswert von  $I=100\%$  sowie eine Schlagdistanz  $t>1\text{mm}$  vorgegeben. Die einzelnen Flächen wurden dabei mit Werkzeugen der Spitzendurchmesser  $D=6\text{mm}$ ,  $D=8\text{mm}$  und  $D=10\text{mm}$  bearbeitet. Zudem wurde im Zuge des Versuchs der Einschlagabstand  $s=f$  variiert. Dieser Wert bezeichnet hierbei sowohl den vorgegebenen Bahnversatz  $s$  als auch den Abstand zwischen den einzelnen Schlägen einer Bearbeitungsbahn (Distanzwert  $f$ , siehe Abbildung 43). Für einzelne Felder wurden im Zuge der Variation Abstände von  $s=f=0,1\text{mm}$ ,  $s=f=0,3\text{mm}$  und  $s=f=0,5\text{mm}$  vorgegeben, wobei die Parameter Kugeldurchmesser  $D$  und Einschlagabstand  $s=f$  vollständig gegeneinander variiert wurden. Im Zuge der Versuchsauswertung wurden die Oberflächenrauheitswerte der somit jeweils mittels unterschiedlichen Parameterkombinationen erstellten Felder sowohl in als auch normal auf die MHP-Vorschubrichtung ermittelt. Die hierbei erhobenen Messwerte sind in Tabelle A I des Anhangs zusammengefasst.

Wie in Abbildung 43 anhand der normal auf die Vorschubrichtung gemessenen  $R_a$ -Rauheitswerte dargestellt, zeigen beide Parameter einen deutlichen Einfluss auf die erzielte Oberflächenrauheit. Dabei kann die Rauheit der behandelten Oberfläche infolge der Verwendung eines Werkzeuges größeren Kugeldurchmessers sowie einer Reduzierung des Einschlagabstandes signifikant gesenkt werden.

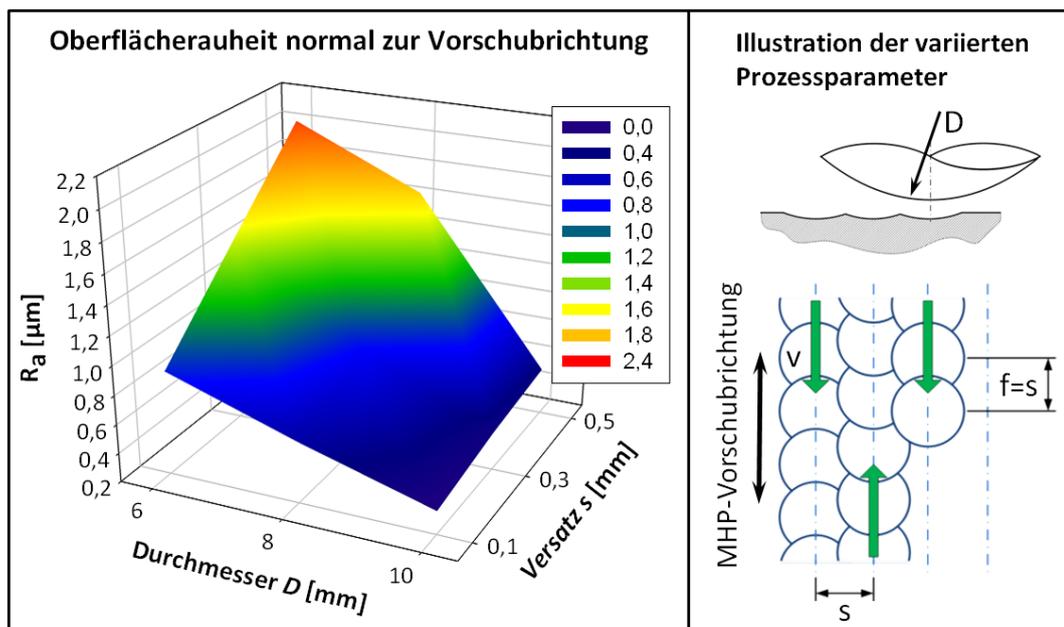


Abbildung 43: Einfluss von Einschlagabstand ( $s=f$ ) und Kugeldurchmesser  $D$  auf den Mittenrauwert gemessen normal auf die Bearbeitungsrichtung (vgl. [37])

Der Einfluss kann durch die Erhöhung des Durchmesser der, durch größere Kugeln resultierenden, Abdrücke erklärt werden, welcher wie auch die Reduzierung des Einschlagabstandes zu einer größeren Überdeckung der einzelnen Abdrücke führt. Die Forderung nach eben einem solchen geringen Einschlagabstand muss allerdings, wie bereits auch bei Wied (vgl. [20]) dargestellt, in Bezug auf eine wirtschaftliche Anwendung der Technologie kritisch betrachtet werden. Ein geringer Einschlagabstand kann dabei nur durch eine Reduktion des Bahnabstandes sowie neben einer Einflussnahme über die zu wählende Schlagfrequenz letztlich nur über eine Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit erreicht werden. Aus diesem Grund muss die erhöhte Oberflächenqualität über eine gesteigerte Bearbeitungszeit und damit höhere Fertigungskosten der behandelten Komponente erkauft werden. Damit kann in Bezug auf eine optimale Glättung der Oberfläche auch für den hier betrachteten Werkstoff, übereinstimmend mit dem Stand der Technik (siehe z.B.: [20] S.105), die Forderung nach einem möglichst hohen Kugeldurchmesser gestellt werden. Die maximale Abmessung kann dabei aber beispielsweise durch die Geometrie des zu bearbeitenden Werkstücks beschränkt sein (Kollision, etc.).

Eine vergleichende Betrachtung der in Tabelle A I des Anhangs für die jeweiligen Messrichtungen angeführten Messwerte zeigt zudem eine deutliche Vorschubrichtungsabhängigkeit der nach einer MHP-Behandlung resultierenden Oberflächenrauheit. Dabei konnten jeweils normal auf die Richtung des MHP-Vorschubs deutlich höhere Rauheitskennwerte gemessen werden. Dieser Effekt, der im Zuge aller im Verlauf der Arbeit erfolgten Rauheitsmessungen beobachtet werden konnte, soll im Folgenden anhand der Versuche zum Einfluss der Schlagdistanz dargestellt und näher betrachtet werden.

#### Schlagdistanzeinfluss:

Neben der Betrachtung der Änderung des Oberflächenhärtezustandes wurde anhand der nicht thermisch gehärteten Proben des in Kapitel 6.1 dargestellten Versuches auch die Oberflächengüte der einzelnen, mittels variierten Schlagdistanzen  $t$  erstellten Versuchsflächen beurteilt. Zu diesem Zweck wurden wiederum die Rauheitskennwerte  $R_a$  und  $R_z$  sowohl in als auch normal auf die Vorschubrichtung des MHP-Prozesses gemessen. Die erhobenen Messergebnisse, welche zur Gänze in Tabelle A III und Tabelle A IV des Anhangs angeführt sind, bieten im Folgenden die Möglichkeit, den Einfluss des Prozessparameters Schlagdistanz auf die Oberflächenqualität zu diskutieren.

Abbildung 44 zeigt dazu zunächst die in Abhängigkeit der jeweils variierten Schlagdistanz auf der Probe des Werkstoffs C45E (1.1191) erreichten Oberflächenrauheitskennwerte.

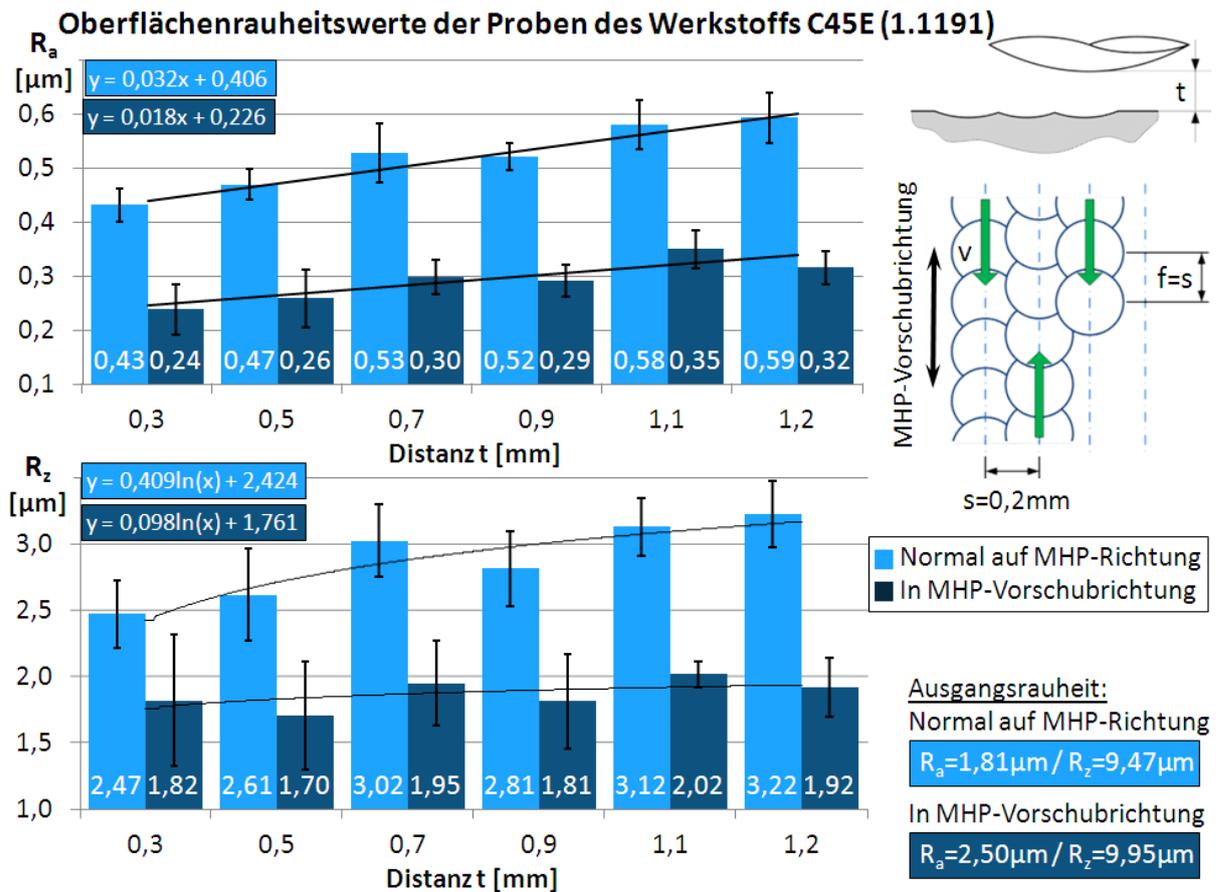
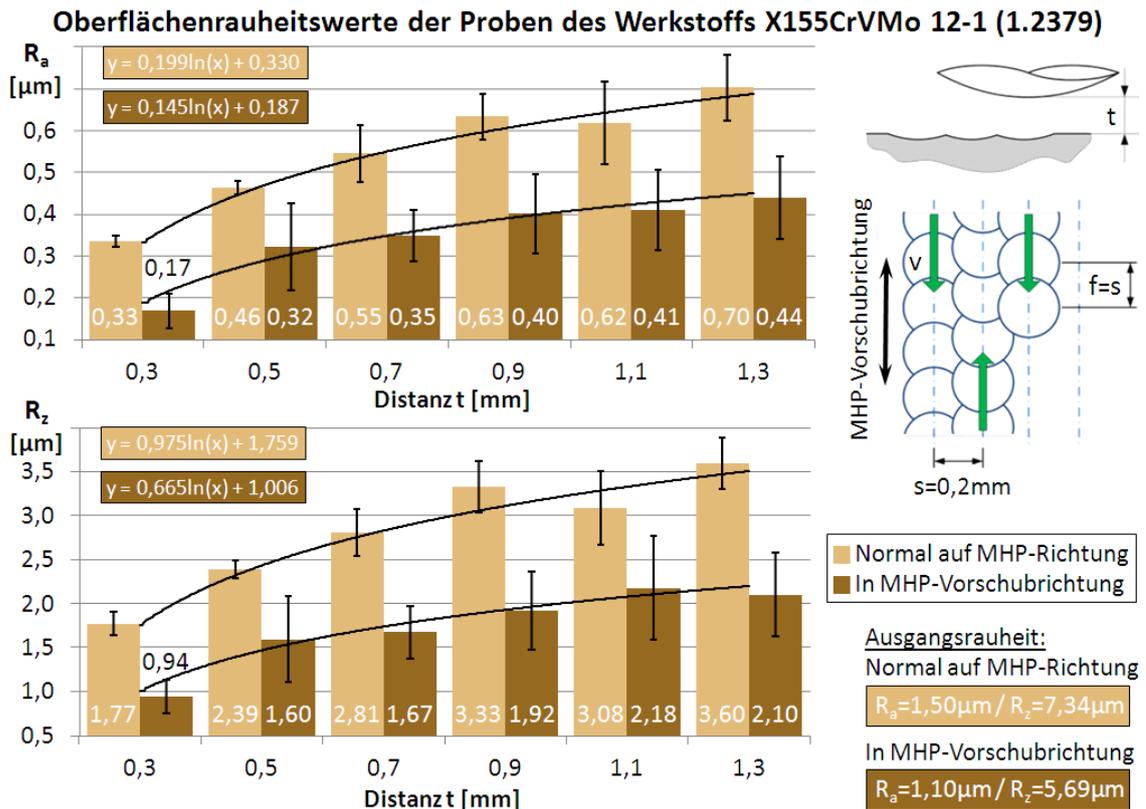


Abbildung 44: Einfluss des Parameters Schlagdistanz  $t$  auf die Oberflächenrauheitswerte des Werkstoffs C45E (1.1191)

Dabei zeigt sich insbesondere für den Mittenrauwert  $R_a$  eine Rauheitsreduzierung in Folge einer Verringerung der Schlagdistanz. Noch deutlicher ist dieser Zusammenhang anhand der Versuchsauswertung für den Werkstoff X155CrVMo 12-1 (1.2379) zu erkennen, welche in Abbildung 45 dargestellt ist.

Damit kann gezeigt werden, dass für die betrachteten Materialien bereits die geringste untersuchte Schlagkraft (positiv korreliert mit der Schlagdistanz, siehe Kapitel 5.1.1) ausreichend ist, um das vorliegende Fräsbild der Oberfläche optimal zu glätten. Eine zusätzliche Erhöhung der Schlagenergie führt in weiterer Folge dazu, dass durch eine Vertiefung der Einschlagabdrücke die Oberflächenrauheit deutlich ansteigt. Anhand von Topographiemessungen kann dabei gezeigt werden, dass die Oberfläche der MHP-bearbeiteten Probenfelder deutlich durch eben diese Einschlagabdrücke dominiert wird.

Zudem zeigen die Ergebnisse beider Materialien eine deutliche Richtungsabhängigkeit, wobei jeweils eine signifikant höhere Rauheit normal zur Vorschubrichtung des MHP-Prozesses auftritt.



*Abbildung 45: Einfluss des Parameters Schlagdistanz  $t$  auf die Oberflächenrauheitswerte des Werkstoffs X155CrVMo 12-1 (1.2379)*

Die deutliche Abweichung der Oberflächenrauheitswerte ist insofern bemerkenswert, da, wie auch anhand der jeweiligen Abbildungen illustriert, der Wert des Bahnversatzes  $s$  ident dem Abstand der einzelnen Schläge im Zuge einer Bearbeitungsbahn (Distanzwert  $f$ ) gewählt wurde. Demnach ergibt sich für beide Richtungen ein identer Abstand der einzelnen Einschlagabdrücke zueinander.

Wie insbesondere anhand der Ergebnisse für den Werkstoffs C45E (Abbildung 44) ersichtlich ist, kann die beobachtete richtungsgebundene Abhängigkeit zudem nicht auf die Ausgangsrauheit der Oberfläche zurückgeführt werden. Die Probe zeigt dabei vor dem Versuch eine deutlich höhere Rauheit in Richtung der Vorschubgeschwindigkeit der späteren MHP-Bearbeitung (siehe Angabe der Ausgangsrauheit im rechten, unteren Teil der Abbildung 44). Nach dem Prozess stellen sich dennoch auch hier, trotz höherer Ausgangsrauheit signifikant geringere Rauheitswerte in dieser Richtung ein.

Der hier anhand der Auswertung taktiler Rauheitsmessungen gezeigte Effekt wird später anhand von Kapitel 6.2.3 noch einmal Betrachtung finden und anhand von Topographiemessungen mit dem Vorschubgeschwindigkeitswert des Prozesses beziehungsweise dem Distanzwert  $f$  und dessen Verhältnis zum gewählten Bahnabstand  $s$  in Verbindung gebracht werden.

Einfluss von Mehrfachbearbeitung:

Anhand der oben dargestellten Untersuchungen konnte für eine orthogonale Bearbeitung ein möglichst geringer Schlagdistanzwert als optimal in Bezug auf die Glättung der betrachteten Werkstückoberflächen identifiziert werden. Die schlussendlich erzielbare Oberflächenrauheit wird dabei durch den letzten MHP-Bearbeitungsschritt und den hier vorgegebenen Schlagdistanzwert bestimmt.

Dies kann anhand der Betrachtung der Oberflächengüte der Proben des Werkstoffs X3CrNiMo13-4 (1.4313) des in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Versuchs gezeigt werden. Für die Darstellung des genannten Zusammenhangs sollen einander im Folgenden die Traglastkurven (Abbott-Firestone-Kurven) ermittelt an extrahierten Schnittprofilen der betrachteten Probenoberflächen gegenübergestellt werden. Der Einfluss der im letzten MHP-Schritt verwendeten Schlagdistanz kann allerdings auch anhand taktiler Rauheitsmessungen nachvollzogen werden, welche für die hier betrachteten Probenflächen sowohl in als auch normal auf die MHP-Vorschubrichtung durchgeführt wurden und deren Ergebnisse anhand von Tabelle A II des Anhangs zu ersehen sind.

Die Traglastkurve eines Oberflächenprofils, welche auch als Materialanteilkurve bezeichnet wird, gibt den Materialanteil des Profils als Funktion der Schnitthöhe  $c$  wieder (vgl. [38] S.19). Die einzelnen Kurvenpunkte stellen damit, wie anhand von Abbildung 46 illustriert, das prozentuelle Verhältnis der für die jeweilige Schnitthöhe ermittelten Materiallänge  $MI(c) = \sum_{i=1}^n MI_i$  (Summe der materialschneidenden Anteile) zur Gesamtmessstrecke  $l_n$  dar.

Die anhand von Abbildung 47b illustrierten und erläuterten Kurvenkennwerte werden durch eine Sekante der Länge  $0,4 \cdot l_n$  ermittelt, die mit geringster Neigung in die gemessene Kurve eingepasst wird. Die Verlängerung dieser Sekante definiert sodann durch die Schnittpunkte zur 0% und 100%  $R_{mr}$ -Linie die jeweiligen Parameter des Kern-, Spitzen- und Talprofilbereichs (vgl. [39] S.9).

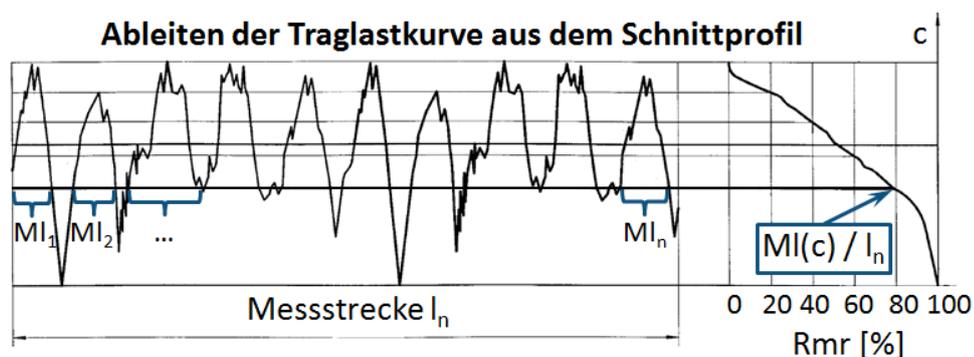
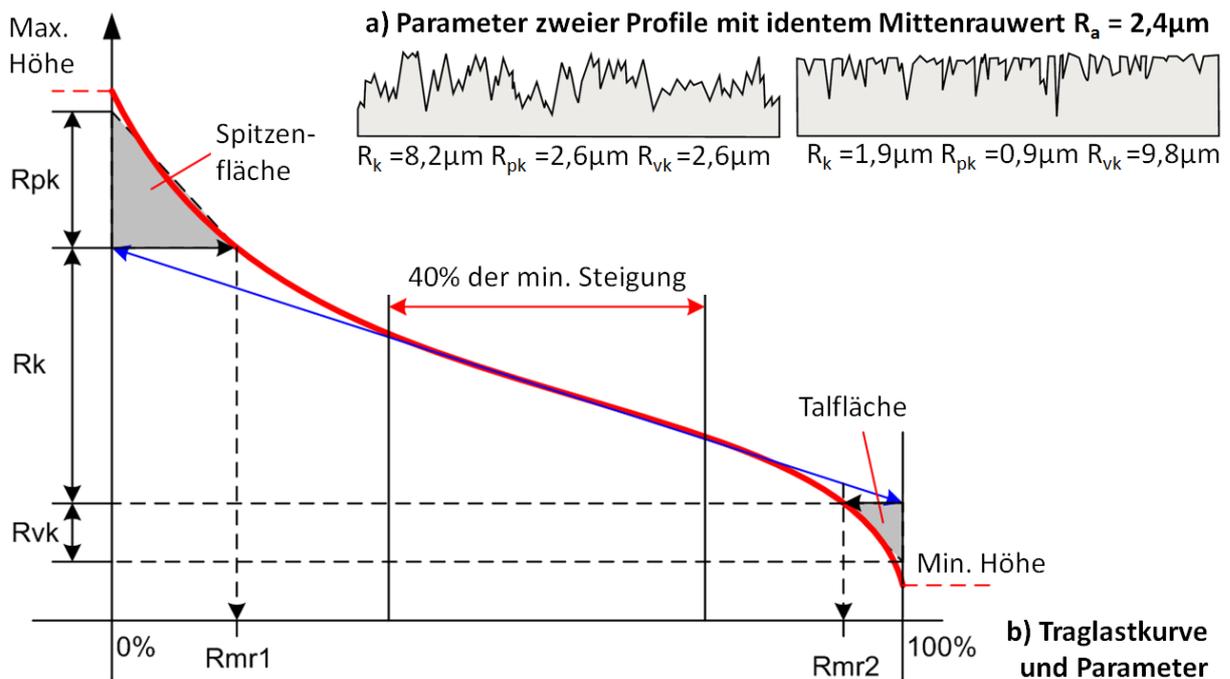


Abbildung 46: Zusammenhang zwischen Oberflächenschnittprofil und Traglastkurve (vgl. [38] S.17)

**Traglastkurven Parameter:**

$R_k$  ... Kernrautiefe (Höhe des Kernprofils)

$R_{pk}$  ... Reduzierte Spitzenhöhe (mittlere Höhe der herausragenden Spitzen über dem Kernprofil)

$R_{vk}$  ... Reduzierte Riefentiefe (mittlere Tiefe der Profiltäler unterhalb des Kernbereiches)

$R_{mr1}$  ... Materialanteil der Oberfläche, welche aus Spitzen oberhalb des Kernbereiches besteht

$R_{mr2}$  ... Materialanteil der Lasttragenden Oberfläche

**Abbildung 47: Traglastkurve (Abbott-Firestone-Kurve): a) Vergleich zweier Profile mit identem  $R_a$ -Wert (vgl. [39] S.9) b) Illustration und Erläuterung der Kurvenparameter (vgl. [32] S.39)**

Die erhaltenen Rauheitskenngrößen ermöglichen eine umfassende Charakterisierung der vorliegenden Oberfläche, die durch andere Kennwerte oft nicht gegeben werden kann. Abbildung 47a zeigt dies anhand zweier Schnittprofile mit identem Mittenrauwert  $R_a=2,4\mu\text{m}$ , deren Topographie anhand der gegebenen Traglastkurvenparameter deutlich zu unterscheiden ist.

Im Zuge der meisten technischen Anwendungen ist dabei die rechts dargestellte Profilform vorteilhaft, welche durch einen niedrigen  $R_{pk}$ - (reduzierte Spitzenhöhe) sowie einen hohen  $R_{vk}$ -Wert (reduzierte Riefentiefe) beschrieben wird. Das Profil wird hierbei im Wesentlichen durch einzelne Plateaus gebildet, die durch tiefe Riefen unterbrochen werden. Damit ist eine derartige Profilform sowohl durch gute Gleiteigenschaften der Plateaus als auch durch ein hohes Ölhaltevermögen der Riefen ausgezeichnet. Durch diese Charakteristik ist die, durch dieses Profil sowie die angeführten Parameter beschriebene Oberfläche beispielsweise für die Funktion in Verbrennungsmotoren bestens geeignet (vgl. [40] S.17).

Für die Ermittlung der im Folgenden dargestellten Traglastkurven wurden die MHP-bearbeiteten Oberflächen sowie die gefräste Referenzfläche der in Kapitel 6.1.2 dargestellten 1.4313 Stahlprobe durch das InfiniteFocus-Messsystem erfasst. Durch die Verwendung eines Objektivs 50-facher Vergrößerung wurden hierbei eine vertikale Auflösung von 19.67nm sowie eine laterale Auflösung von 1.3 $\mu$ m vorgegeben. An den erhobenen Datensätzen wurden längs der Vorschubrichtung des MHP-Bearbeitungsprozesses Profilschnitte extrahiert, anhand derer unter Vorgabe einer Grenzwellenlänge von  $\lambda_c=L_c=800\mu$ m die entsprechenden Rauheitsprofile gefiltert wurden. Diese Profile dienten nun der Ermittlung der in Abbildung 48 mit den jeweiligen Rauheitsparametern gegebenen Traglastkurven.

Wie anhand der Betrachtung der Ergebnisse ersichtlich wird, zeigt der Traglastkurvenverlauf der unter Verwendung eines hohen Schlagdistanzwertes von  $t=1,2$ mm bearbeiteten Oberfläche vergleichsweise geringe Abweichungen zur Kurve der gefrästen Referenz. Eine in Bezug auf diese Kurve zu verzeichnende Reduktion des  $R_k$ - (Kernrautiefe) und  $R_{pk}$ -Wertes (reduzierte Spitzenhöhe) sowie eine Erhöhung der reduzierten Riefentiefe ( $R_{vk}$ ) lassen darauf schließen, dass die Oberfläche durch tiefe MHP-Eindrücke dominiert wird.

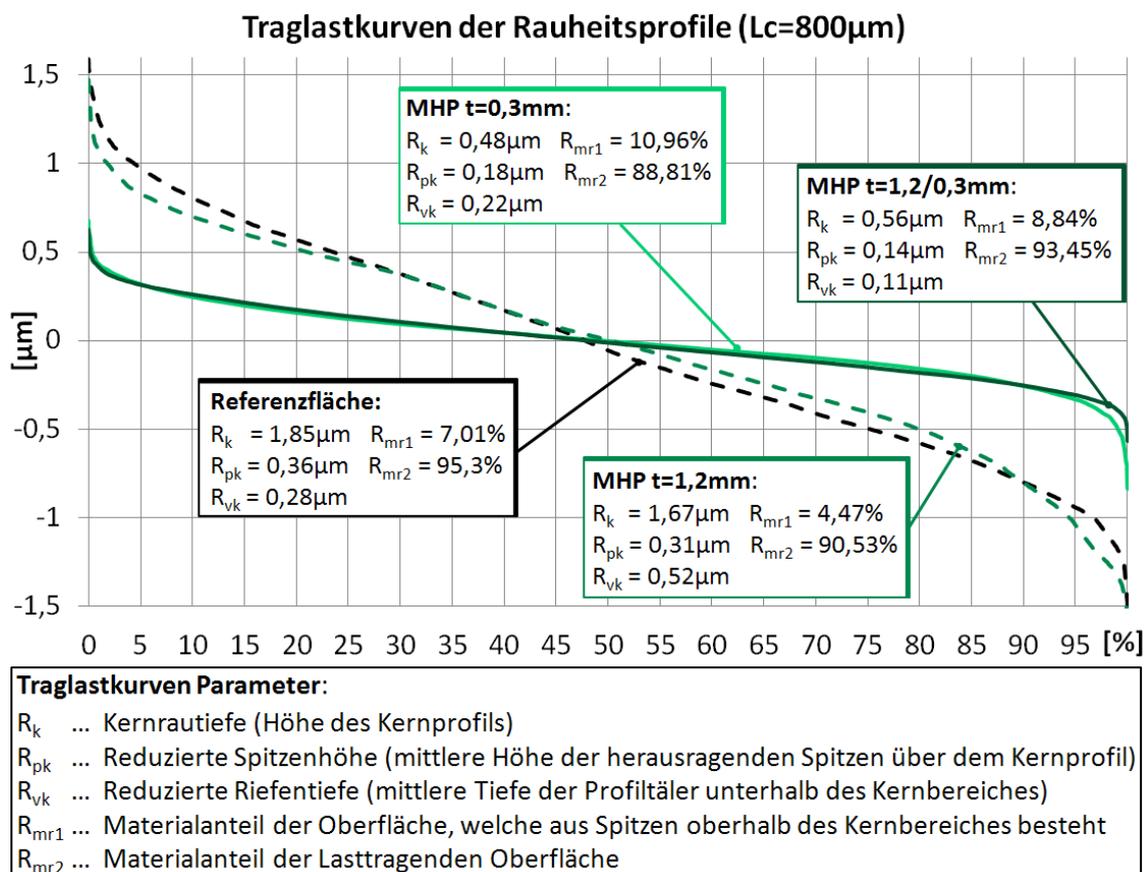


Abbildung 48: Traglastkurven der beiden einfach sowie der doppelt bearbeiteten Oberflächen (Werkstoff: 1.4313)

Im Zuge der beiden übrigen MHP-Bearbeitungen konnte eine deutliche Reduktion sämtlicher Rauheitsparameter ( $R_k$ -,  $R_{pk}$ -,  $R_{vk}$ -Wert) erreicht werden. Dadurch kann von einer deutlichen Rauheitsreduzierung infolge dieser Bearbeitungen gesprochen werden, wobei für beide durchaus ähnliche Traglastkurven resultieren.

Auf diese Weise kann für die hier vorliegende Probe gezeigt werden, dass ob eines geringen Schlagdistanzwertes ein gutes Glättungsergebnis resultiert. Die Untersuchungsergebnisse belegen zudem, dass ausgehend von einer vergleichsweise hohen Oberflächenrauheit infolge einer Bearbeitung mittels hoher Schlagdistanz über eine erneute (zweite) MHP-Bearbeitung mit geringer Distanz ein vergleichbares Glättungsergebnis erreicht werden kann. Die im Falle von Mehrfachbearbeitung für den letzten MHP-Bearbeitungsschritt gewählte Schlagdistanz bestimmt hiermit zumindest für das betrachtete Material die letztlich vorliegende Oberflächenrauheit.

## 6.2.2 Einfluss der Vorbearbeitung

Anhand der oben dargestellten Untersuchungen konnte die Eignung der Technologie des Schlagverdichtens in Bezug auf eine Reduktion der Oberflächenrauheit mittels Schafffräser plan gefräster Werkstückoberflächen dargestellt werden. Um eine Basis für die Bewertung des Glättungsvermögens in Abhängigkeit einer variierten Ausgangsrauheit geben zu können, soll anhand der hier gezeigten Untersuchung dieser Einflussfaktor genauer untersucht werden.

Zu diesem Zweck wurde auf einer Platte des Werkstoffs X3CrNiMo13-4 (1.4313) mit den Abmaßen von 300x300x30mm durch unterschiedliche Fräsbearbeitungen drei Oberflächenbereiche vorbereitet.

*Tabelle 19: Parameter der Fräsoperationen für die Vorbearbeitung der Probenbereiche unterschiedlicher Ausgangsrauheit*

<b>Ausgangsrauheit/Parameter</b>	<b>Hoch</b>	<b>Mittel</b>	<b>Gering</b>
Werkzeug [-]	Radiusfräser Ø 10	Radiusfräser Ø 10	Schafffräser Ø 16
Bahnversatz [mm]	0,7	0,32	8
Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	9600	9600	1989,44
Vorschub [mm/Zahn]	0,023	0,05	0,1
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	301,59	301,59	100

Dabei wurde neben einer Planfräsoperation mittels Schafffräser  $\varnothing 16\text{mm}$  ein Radiusfräser  $\varnothing 10\text{mm}$  verwendet, um über die Vorgaben unterschiedlicher Bahnversatzwerte Regionen einer im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen deutlich höheren Oberflächenrauheit zu erzeugen. Die Parameter der Vorbearbeitung der drei Probenbereiche, welche im Folgenden nach deren Oberflächenrauheit in Richtung des MHP-Vorschubs mit Ausgangsrauheit „hoch“, „mittel“ und „gering“ bezeichnet werden, sind in Tabelle 19 aufgelistet.

Die nach der erfolgten Vorbearbeitung an den drei Probenbereichen ermittelten Oberflächenrauheitswerte sind in Tabelle 20 angeführt. Für die messtechnische Erfassung wurden in der jeweiligen Richtung sechs taktile Einzelmessungen durchgeführt. Die angegebenen Rauheitswerte stellen den Mittelwert dieser Messungen dar, deren Standardabweichung als Streubereich angegeben ist. Um einen direkten Vergleich der Rauheitsparameter mit den späteren Messergebnissen zu gewährleisten, ist die jeweilige Messrichtung nach der Vorschubgeschwindigkeitsrichtung des MHP-Prozesses bezeichnet. Die MHP-Bearbeitung erfolgte dabei unter einem Vorschubrichtungswinkel von  $\varphi=90^\circ$ , wodurch die Fräsriefen normal auf die spätere MHP-Vorschubrichtung verlaufen. Für die mittels Radiusfräser erstellten Flächen ergeben sich dadurch deutlich höhere Rauheitswerte in Richtung des späteren MHP-Prozesses.

Tabelle 20: Ausgangsrauheitswerte der Probenbereiche aufgrund deren Vorbearbeitung

Ausgangsrauheit	In MHP-Vorschubrichtung		Normal auf MHP-Vorschubrichtung	
	$R_a[\mu\text{m}]$	$R_z[\mu\text{m}]$	$R_a[\mu\text{m}]$	$R_z[\mu\text{m}]$
Hoch	<b>5,38</b> $\pm 0,63$ *	<b>26,1</b> $\pm 1,17$ *	<b>0,78</b> $\pm 0,35$	<b>4,23</b> $\pm 1,38$
Mittel	<b>2,64</b> $\pm 0,23$	<b>17,82</b> $\pm 2,48$	<b>0,59</b> $\pm 0,23$	<b>4,25</b> $\pm 1,16$
Gering	<b>0,82</b> $\pm 0,3$	<b>4,45</b> $\pm 0,96$	<b>1,26</b> $\pm 0,51$	<b>6,12</b> $\pm 1,76$

\*... Messeinstellungen: Grenzwellenlänge (Cut-Off)  $L_c = 0,8\text{mm}$  / Taststrecke  $L_t = 5,6\text{mm}$  alle übrigen Werte wurden mit  $L_c = 2,5\text{mm}$  /  $L_t = 17,5\text{mm}$  gemessen.

Auf den vorbereiteten Probenoberflächen wurden, wie in Abbildung 49 dargestellt, insgesamt 81 Versuchsfelder erstellt. Wie in der Abbildung ersichtlich, wurden dabei Stößel des Kugeldurchmessers von  $D=6\text{mm}$ ,  $D=8\text{mm}$  und  $D=10\text{mm}$  verwendet, um auf den drei Probenbereichen Versuchsfeldgruppen zu erstellen. Innerhalb einer Gruppe wurde der Faktor Schlagdistanz  $t$  sowie die Faktoren Bahnabstand  $s$  und Abstand zwischen den Einzeleinschlägen  $f$  ( $s=f$  für jedes Feld konstant) auf jeweils drei Parameterstufen ( $t = 0,2 / 0,7 / 1,2\text{mm}$ ;  $s=f = 0,1 / 0,3 / 0,5\text{mm}$ ) variiert. Für alle

Bearbeitungen wurden einheitlich eine Intensität von  $I=100\%$  und eine Frequenz von  $F=200\text{Hz}$  gewählt.

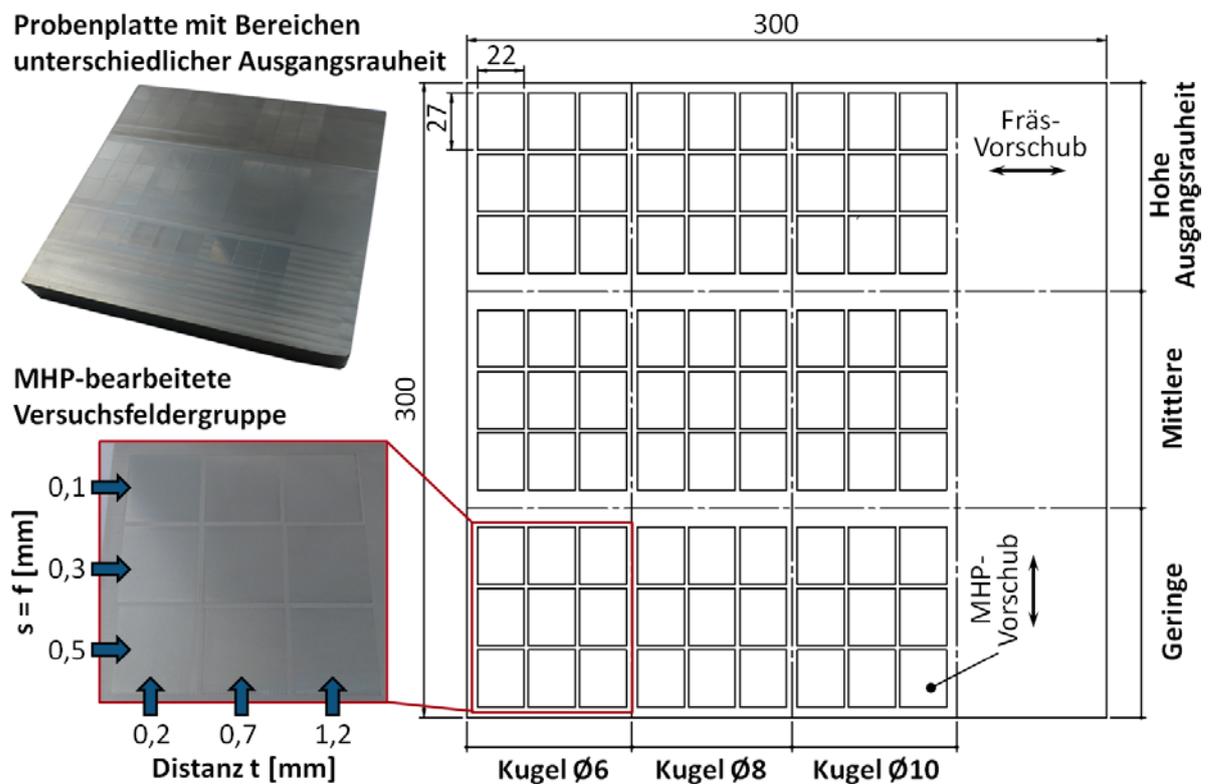


Abbildung 49: Versuchsprobe mit unterschiedlich vorbereiteten Oberflächenbereichen und MHP-Versuchsfeldern variierten Parameter

Durch die vorliegende Versuchsanordnung soll eine Aussage über optimale Glättungsparametersätze für die betrachteten Oberflächen variierten Ausgangsrauheit (Topographie) gegeben werden. Hierbei ist insbesondere der Prozessparameter Schlagdistanz  $t$  für die Betrachtung relevant, dessen Erhöhung, wie in Kapitel 5.1 ausgeführt, zu einer erhöhten plastischen Deformation führt. Es soll die Frage geklärt werden, ob das Prozessergebnis im Falle einer rauen Ausgangsfläche deren Topographie durch deutliche Fräsriefenstrukturen gekennzeichnet ist über eine Erhöhung des Parameters und damit einer erhöhten Deformation der Riefenkämme optimiert werden kann.

Im Zuge der messtechnischen Versuchsauswertung wurde für eine Bewertung des Glättungspotentials die Oberflächenrauheit der bearbeiteten Versuchsfelder anhand des arithmetischen Mittenrauwertes  $R_a$  und der gemittelten Rautiefe  $R_z$  (ermittelt jeweils sowohl in als auch normal auf die Vorschubrichtung des MHP-Prozesses) erfasst. Die hier erhobenen Messwerte sind für die einzelnen Versuchsfeldgruppen in Tabelle A V bis Tabelle A XIII des Anhangs angeführt. Jeder Messwert repräsentiert

auch hier den Mittelwert aus je sechs Einzelmessungen, deren Standardabweichung als Streuungsparameter ebenfalls in den Tabellen hinterlegt ist.

Für eine erste Betrachtung der erhobenen Ergebnisse werden einander anhand von Abbildung 50 die für die jeweiligen Versuchsfeldgruppen erreichten maximalen und minimalen arithmetischen Mittenrauwerte  $R_a$ , gemessen in Richtung des MHP-Vorschubs, gegenübergestellt. Wie der Vergleich mit der in dieser Richtung gemessenen Ausgangsrauheit des jeweiligen Probenbereiches (in der Abbildung jeweils am rechten Rand der dargestellten Versuchsprobenbereiche angeführt) zeigt, kann infolge einer optimierten MHP-Bearbeitung auf eine deutliche Reduktion der jeweils vor der Bearbeitung vorliegenden Rauheitsparameter verwiesen werden. Im Falle einer geringen Ausgangsrauheit führt eine für die Verbesserung der Oberflächengüte unzuweckmäßige Wahl der Versuchsparameter jedoch durchaus zu einer Erhöhung der Oberflächenrauheit.

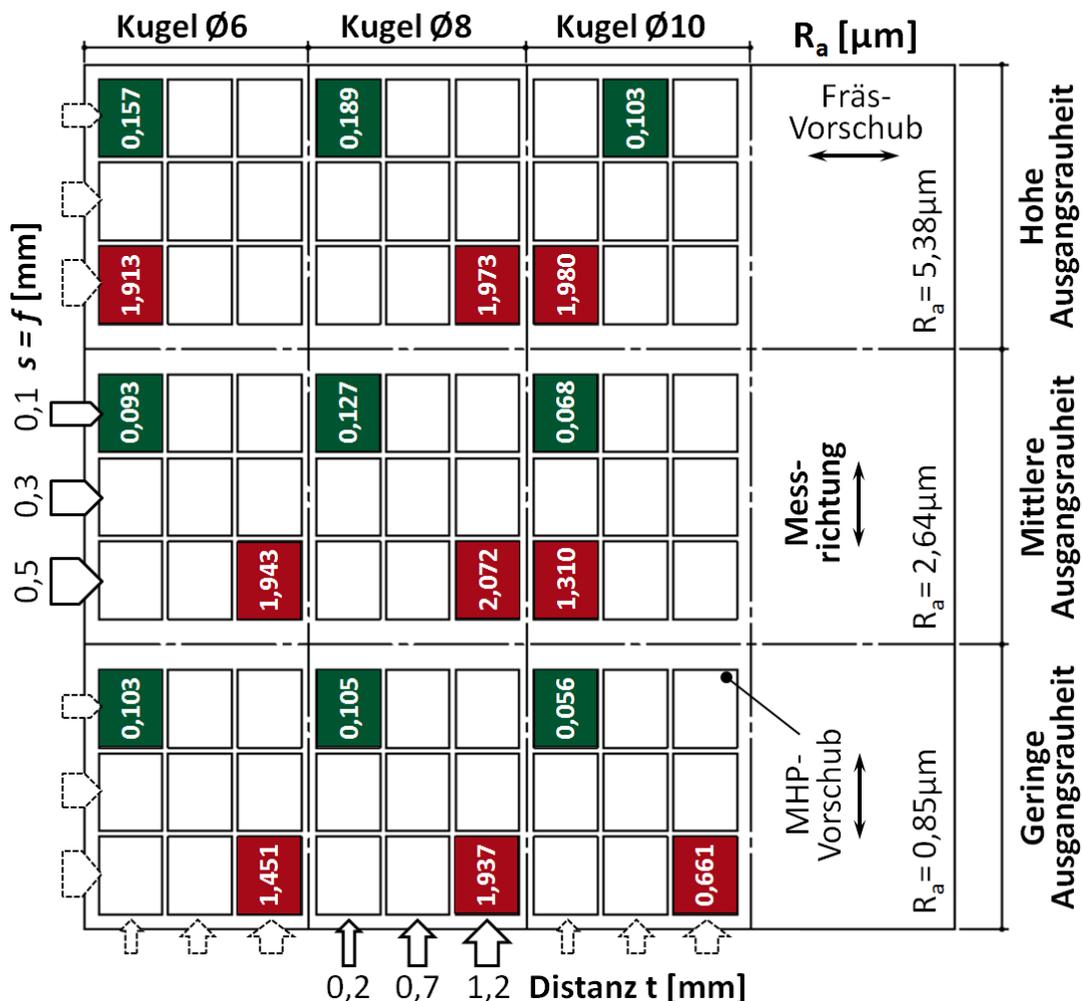


Abbildung 50: Maximale und minimale Ausprägung des Mittenrauwertes  $R_a$  gemessen in MHP-Vorschubrichtung

Anhand der vorliegenden Auswertung sämtlicher Rauheitsparameter ( $R_a$ -,  $R_z$ -Werte in unterschiedlichen Messrichtungen) können auch für den betrachteten Werkstoff die in Kapitel 6.2.1 abgeleiteten Parametereinflüsse auf das Glättungspotential bestätigt werden. So stellt sich im Zuge der Analyse aller Probenbereiche die geringste Oberflächenrauheit an jenen Flächen ein, die mit dem geringsten Abstand der einzelnen MHP-Einschläge (Bahnabstand  $s$ =Distanzwert  $f=0,1\text{mm}$ ) bearbeitet wurden.

Die Verwendung des größten untersuchten Werkzeugkugeldurchmessers führt zudem mehrheitlich zu einer maximalen Glättung der Oberfläche.

In diesem Zusammenhang ist auffällig, dass im direkten Vergleich der einzelnen zur Anwendung gebrachten Kugeldurchmesser die höchsten Rauheitswerte nach der Bearbeitung mittels Werkzeugkugeldurchmessers  $D=8\text{mm}$  vorliegen. Diese Tatsache wird für den vorliegenden Versuch auf die Spitzengeometrie des verwendeten Werkzeuges zurückgeführt. Dabei fanden im Zuge der Untersuchung dieselben Werkzeuge Verwendung, die auch für die Betrachtung der MHP-bedingten Oberflächenmodifikation (siehe Kapitel 5.1.2 und Kapitel 5.2) Anwendung fanden. Wie anhand von Kapitel 5.1.2 ausgeführt, konnten durch eine messtechnische Betrachtung dieser Werkzeuge deutliche Abweichungen der vorliegenden Spitzenformen zur idealen Kugelform erkannt werden. Für das Werkzeug des Nenndurchmessers  $D=8\text{mm}$  kann dabei auf eine in gewissen Ansätzen „kegelförmige“ Spitze verwiesen werden (vgl. Seite 49), welche durch die Erzeugung tieferer, „kegelförmiger“ Einschlagabdrücke letztlich auch zur Ausbildung höherer Rauheitswerte an der Oberfläche führen dürfte.

Anhand des vorliegenden Versuchs wird zudem klar, dass die in den vorangegangenen Untersuchungen für eine optimale Oberflächenglättung gestellte Forderung nach einer möglichst geringen Schlagkraft (positiv korreliert mit dem Prozessparameter Schlagdistanz  $t$ ) teils relativiert werden muss. Die Versuchsauswertung zeigt, dass die zweckmäßige Wahl dieses Parameters (Schlagdistanz  $t$ ) neben anderen Einflussgrößen insbesondere an den vorgegebenen Einschlagabstand gebunden ist.

Abbildung 51 illustriert diesen Zusammenhang anhand der in MHP-Vorschubrichtung gemessenen  $R_a$ -Oberflächenrauheitswerte der mittels Kugeldurchmesser  $D=10\text{mm}$  auf dem Probenbereich hoher Ausgangsrauheit erstellten Versuchsfeldgruppe. Wie ersichtlich, ändert sich der Einfluss der Schlagdistanz auf das Glättungsergebnis infolge einer Variation des Einschlagabstandes deutlich.

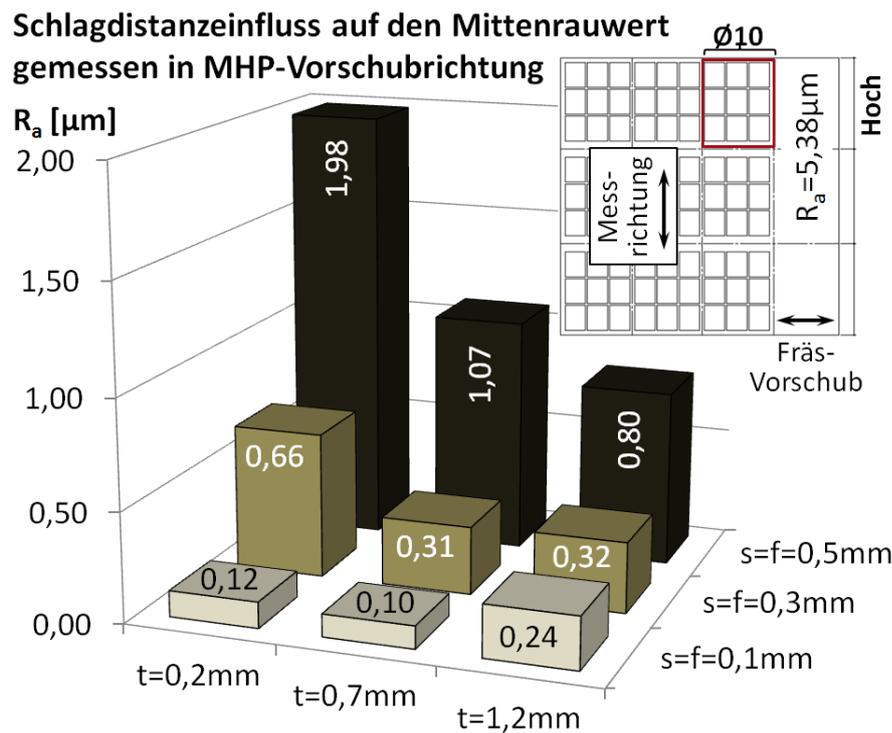


Abbildung 51: Schlagdistanzeinfluss in Abhängigkeit des Einschlagabstandes

So führt ein höherer Distanzwert  $t$  für eine Bearbeitung mit geringem Einschlagabstand zu einer höheren Oberflächenrauheit. Im Falle von weiter auseinanderliegenden Einschlägen kann jedoch durch eine derartige Parameteranpassung eine deutliche Verbesserung des Glättungsergebnisses erzielt werden.

Anhand der Gegenüberstellung der in MHP-Vorschubrichtung gemessenen, Rautiefen (siehe Abbildung 52) soll in diesem Zusammenhang weiterführend der Einfluss von Kugeldurchmesser (anhand des Vergleichs der Kugeln  $D=6\text{mm}$  und  $D=10\text{mm}$ ) sowie Ausgangsrauheit der zu bearbeiteten Oberfläche abgeschätzt und diskutiert werden. Für eine Bearbeitung mit geringem Einschlagabstand ( $s=f=0,1\text{mm}$ ) kann dabei die Wahl eines geringen Schlagdistanzwertes für die Verwendung eines Werkzeuges kleineren Kugeldurchmessers als zweckmäßig erachtet werden. Geringere Schlagdistanzwerte führen hier unabhängig von der Ausgangsrauheit zu einer Verbesserung des Glättungsergebnisses. Dies trifft im Allgemeinen auch auf das Werkzeug größeren Durchmessers zu, wobei hier auch eine mittlere Ausprägung des Schlagdistanzwertes zu vergleichbaren Glättungsergebnissen führt. Im Falle höherer Einschlagabstände zeigt sich auch im Zuge dieser Betrachtung, dass das höchste Glättungspotential zunehmend infolge einer Erhöhung der Schlagdistanz (mittlerer bzw. hoher Parameterwert) erzielt wird. Der Effekt ist dabei insbesondere für das Vorliegen einer mittleren bis hohen Ausgangsrauheit und die Verwendung eines Werkzeuges größeren Durchmessers deutlich ersichtlich.

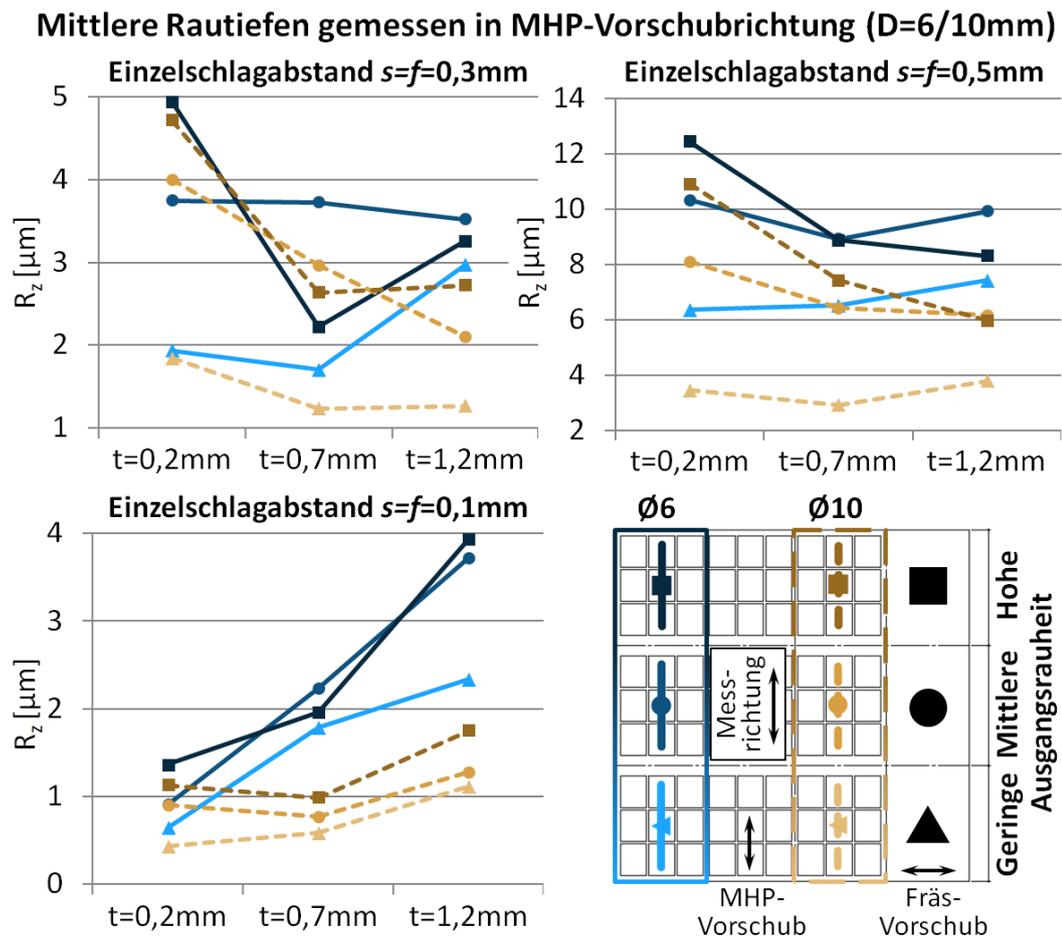
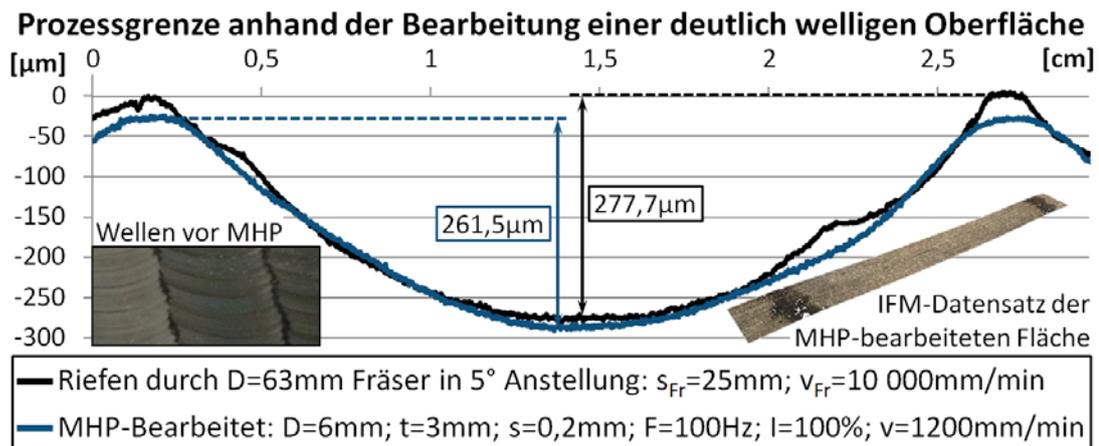


Abbildung 52: Gegenüberstellung der an Probenbereichen unterschiedlicher Ausgangsrauheit, in Abhängigkeit des Einschlagabstandes ermittelten Rautiefen

Die dargestellte Untersuchung zeigt, dass aufgrund des Vorliegens einer erhöhten Oberflächenausgangsrauheit nicht zwingend eine Erhöhung des Schlagdistanzwertes für eine Steigerung des Glättungspotentials erforderlich ist. Dies gilt insbesondere in Bezug auf eine Bearbeitung mittels geringen Einschlagabständen  $s=f$ . Erst eine Vergrößerung dieser Abstände kann letztlich zur Zweckmäßigkeit einer Erhöhung des primär betrachteten Parameters Schlagdistanz  $t$  führen. Zudem konnte das unter optimierten Parametereinstellungen vorliegende, deutliche Glättungspotential der MHP-Technologie selbst in Bezug auf verhältnismäßig raue Oberflächen gezeigt werden.

In diesem Zusammenhang soll allerdings auch auf die technologischen Grenzen des vorliegenden Prozesses verwiesen werden. Wie anhand von Abbildung 53 gezeigt, können deutliche Wellenstrukturen resultierend aus einem Frässchruppprozess durch die MHP-Bearbeitung der Oberfläche nur bedingt beziehungsweise nicht beeinflusst werden.



### Ordnungssystem für Gestaltabweichungen nach DIN 4760:

Nicht durch MHP beeinflussbar

Gestaltabweichung	Abweichungsbeispiele
<b>1. Ordnung: Formabw.</b> 	Ebenheitsabweichungen,...
<b>2. Ordnung: Welligkeit</b> 	Wellen

Durch MHP zu beeinflussen

Gestaltabweichung	Beispiele
<b>3. Ordnung: Rauheit</b> 	Rillen,...
<b>4. Ordnung: Rauheit</b> 	Riefen,...
<b>5. Ordnung: Rauheit</b>	Gefügestruktur
<b>6. Ordnung</b>	Werkstoffgitter

Abbildung 53: Grenze des Prozesspotentials (wellige Oberfläche) sowie technologisch beeinflussbare und unbeeinflussbare Ordnungen der Gestaltabweichung nach DIN 4760 (vgl. [41] S.2)

Bezugnehmend auf DIN 4760 [41], anhand derer ein Ordnungssystem zur Unterscheidung verschiedener Gestaltabweichungen von Oberflächen festgelegt ist, kann das Glättungspotential der MHP-Technologie damit, wie anhand des unteren Teils der obigen Abbildung dargestellt, auf die dritte sowie höhere Ordnungen von Gestaltabweichungen bezogen werden. Abweichungen erster und zweiter Ordnung, welche sich auf die Welligkeit einer Oberfläche beziehungsweise Geradheits-, Ebenheits- oder Rundheitsabweichungen dieser beziehen, können hingegen durch die vorliegende Technologie nicht beeinflusst werden.

### 6.2.3 Einfluss der Einzelschlaganordnung

Anhand der in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels dargestellten Rauheitsmessungen wurde eine deutliche Vorschubrichtungsabhängigkeit der gemessenen Rauheitswerte festgestellt. Im Allgemeinen kann dabei eine signifikant geringere Oberflächenrauheit in Vorschubrichtung des MHP-Prozesses ermittelt werden. Das Auftreten richtungsbezogener Rauheitswerte kann übereinstimmend mit dem Stand der Technik erkannt werden, wobei ähnliche Beobachtungen beispielsweise anhand der in [20] dargestellten Untersuchungen beschrieben werden (siehe Kapitel 2.4.1). Ein deutliches Spiel der Klopfkugel (des Werkzeugs), welches in der genannten Literaturstelle als Ursache des beschriebenen Phänomens angeführt

wird, kann allerdings für den im Zuge dieser Arbeit verwendeten Versuchsaufbau nicht nachvollzogen werden (vgl. [20] S.58). Wie anhand der Untersuchung des Oberflächenmodifikationsprozesses (siehe Kapitel 5.2 sowie Kapitel 5.3) gezeigt werden kann, ist hingegen unter Verwendung des gegebenen Aufbaus von einer exakten Führung des Stößelwerkzeugs auszugehen. So entsprechen die messtechnisch erfassten Werte des Abstands zwischen den einzelnen Bearbeitungsbahnen sowie auch des Abstands zwischen den Einschlagabdrücken einer Bahn jeweils den vorgegebenen beziehungsweise zu erwartenden Werten (Bahnabstand  $s$ , Distanzwert  $f$ ).

Aus diesem Grund soll im Folgenden der Einfluss der Einschlagabstände auf die Oberflächentopographie und speziell die Richtungsabhängigkeit der Oberflächenrauheitswerte schlagverdichteter Oberflächen näher analysiert werden. Hierzu wurden auf C45E (1.1191) Versuchsscheiben ( $\varnothing 120\text{mm}$ , Stärke  $8\text{mm}$ ) mit unterschiedlichen Vorschubwerten einzelne Versuchsfelder bearbeitet. Die Feldbreite wurde dabei mit  $15\text{mm}$  einheitlich konstant gewählt, die Feldlänge jedoch, wie in Abbildung 54 dargestellt, in Abhängigkeit der jeweiligen Vorschubgeschwindigkeit sukzessive erhöht, um das Erreichen des vorgegebenen Vorschubwerts in der Mitte des Versuchsfeldes zu gewährleisten.

Im Zuge eines ersten Versuchs wurde nun für die Bearbeitung einer plangedrehten Scheibe der Bahnabstand  $s$  für jedes Versuchsfeld jeweils äquivalent dem Einzeleinschlagabstand in Vorschubrichtung (Parameter  $f$ ) gewählt.

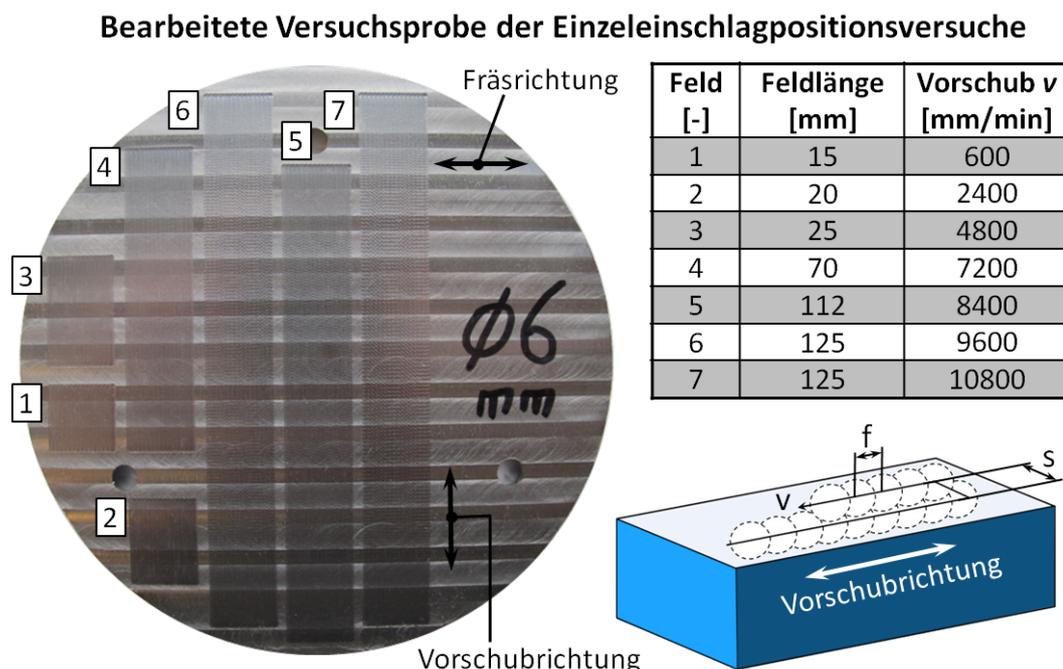


Abbildung 54: Bearbeitete Versuchsprobe mit Probenfeldern variabler Vorschubgeschwindigkeiten

Damit kann für jedes Feld von einem konstanten Matrixabstand  $s=f$  ausgegangen werden, dessen Wert sich für die jeweils vorliegende Vorschubgeschwindigkeit (siehe Tabelle in Abbildung 54) und die in den Versuchen konstant belassene Frequenz von  $F=200\text{Hz}$  anhand von Gleichung (12) ermitteln lässt.

Um des Weiteren die Auswirkung der Vorschubgeschwindigkeit isoliert betrachten zu können, wurden für die Bearbeitung von zwei weiteren Versuchsscheiben mit plangefräster Oberfläche (Schafffräser  $\varnothing 16\text{mm}$ ; Vorschub  $509\text{mm/min}$ ; Spindeldrehzahl  $1592\text{U/min}$ ; siehe Abbildung 54) dieselben Vorschubwerte in Kombination mit einem konstanten Bahnabstand  $s=0,5\text{mm}$  verwendet. Neben dem im vorangegangenen Versuch bei konstanter Matrixweite (Einschlagabstände) angewendeten Werkzeug mit Kugeldurchmesser  $D=6\text{mm}$  wurde hier auch ein Stößel mit Kugeldurchmesser  $D=10\text{mm}$  eingesetzt. Die beschriebenen und für die Bearbeitung der drei Versuchsscheiben angewendeten MHP-Parametersätze sind in ihrer Gesamtheit zusammenfassend anhand von Tabelle 21 dargestellt.

Anhand der bearbeiteten Proben sollte im Zuge der Auswertung der Einfluss der Einschlagabstandsvariation auf die Oberflächenrauheitswerte sowie die Oberflächentopographie ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurde an den einzelnen Probenfeldern der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$  sowie die gemittelte Rautiefe  $R_z$  in als auch normal auf die Vorschubrichtung des Schlagverdichtungsprozesses ermittelt (siehe Tabelle A XIV und Tabelle A XV des Anhangs A). Die im Folgenden angegebenen und diskutierten Messergebnisse stellen dabei jeweils den Mittelwert aus sechs Einzelwerten dar, die in der Mitte der einzelnen Probenfelder gemessen wurden.

*Tabelle 21: Parameter der Versuche mit variablen Matrix- und Vorschubwerten*

<b>Prozessparameter</b>	<b>Variable Matrixweite</b>	<b>Variabler Vorschub</b>
Kugel $\varnothing$ $D$ [mm]	6	6 / 10
Bahnabstand $s$ [mm]	0,05 / 0,2 / 0,4 0,6 / 0,7 / 0,8 / 0,9	0,5
Vorschub $v$ [mm/min]	600 / 2400 / 4800 7200 / 8400 / 9600 10800	600 / 2400 / 4800 7200 / 8400 / 9600 10800
Frequenz $F$ [Hz]	200	200
Intensität $I$ [%]	100	100
Schlagdistanz $t$ [mm]	1,0	1,0

Erläuterung der Prozessparameter siehe Kapitel 4.2.

Die Kennwerte geben hierdurch die Rauheit in einem Bereich wieder, in welchem die Werkzeugmaschine den angegebenen Vorschubwert bereits erreichen konnte. Die zur Bewertung der Oberflächentopographie erstellten InfiniteFocus (Alicona) Messungen wurden im selben Bereich der Probenoberfläche erstellt.

Abbildung 55 zeigt die an den einzelnen, mit variiertem Matrixabstand  $s=f$  erstellten Probenfeldern erhobenen Rauheitskennwerte sowie Topographiemessungen ausgewählter Felder. Wie die Gegenüberstellung zeigt, ergeben sich auch im Zuge der vorliegenden Bearbeitung zumeist deutlich höhere Rauheitswerte normal auf die vorgegebene MHP-Vorschubrichtung.

Lediglich die mit höchstem Matrixabstand bearbeitete Probenoberfläche zeigt eine weitgehend richtungsunabhängige Verteilung der erhobenen Kennwerte. Wie anhand der Topographiemessung dieses Feldes ersichtlich wird, ist die Oberfläche hier durch einzelne, zueinander abgegrenzte, kreisrunde Abdrücke des MHP-Werkzeugs dominiert. Diese sind im betrachteten Flächenausschnitt der Feldmitte wabenförmig zueinander angeordnet.

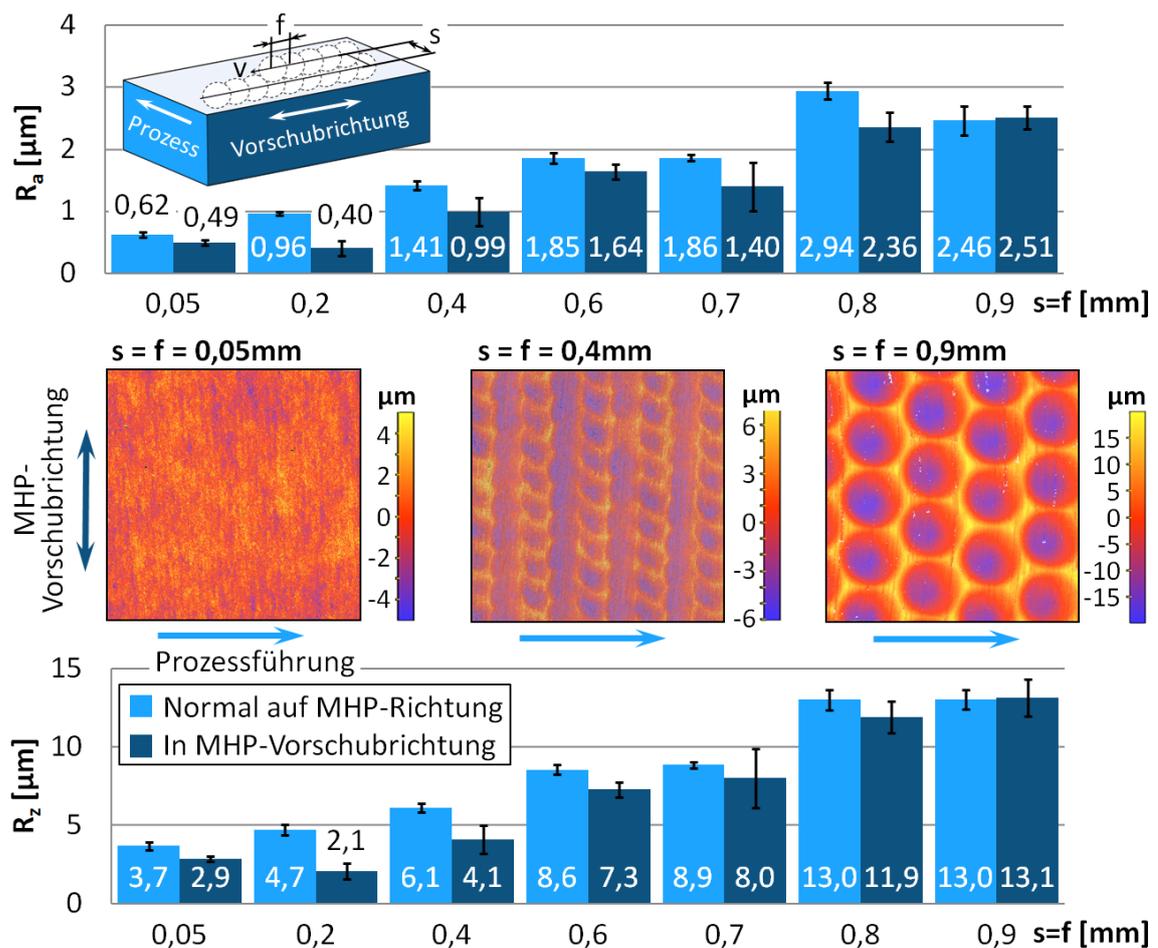


Abbildung 55: Oberflächenrauheitswerte  $R_a$  und  $R_z$  sowie InfiniteFocus-Messungen (10-fach Objektiv) erhoben an den Probenfeldern des Matrixweitenversuchs

Damit kommt es durch die vorgegebenen Bearbeitungsparameter (Matrixabstand  $s=f=0,9\text{mm}$ , Kugeldurchmesser  $D=6\text{mm}$ , Schlagdistanz  $t=1\text{mm}$ ) für den untersuchten Werkstoff zu keiner Überlagerung der einzelnen Einschlagabdrücke. Die Richtungsabhängigkeit der Oberflächenrauheitswerte kann damit erst für den Fall einer derartigen Überlagerung von Einschlagabdrücken festgestellt werden, welche mit einer Reduzierung der Matrixweite einhergeht.

Wie anhand der Oberflächentopographiebetrachtung des Feldes mit Matrixabstand  $s=f=0,4\text{mm}$  (mittlerer Teil der Abbildung 55) gezeigt werden kann, könnte im Falle des vorliegenden Versuchs eine mögliche Ursache für die Richtungsbezogenheit in einer leicht schräg erfolgten Schlagbewegung gesehen werden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Vorbearbeitung der vorliegenden Probe (Plandrehprozess) nicht an derselben Maschine wie die spätere MHP-Bearbeitung erfolgte, kann hierbei nicht ausgeschlossen werden, dass durch das Umspannen des Werkstücks eine geringfügige Abweichung zur angestrebten, orthogonalen Schlagführung resultierte. Auf diese Weise könnte durch das Auftreten eines Anstellschlagwinkels  $\alpha \neq 0^\circ$ , welcher sich in der Ebene des Maschinenvorschubs eingestellt haben müsste (Vorschubschlagwinkel  $\beta = \pm 90^\circ$ ), erklärt werden, dass sich gerade und ungerade Bearbeitungsbahnen dieses Feldes deutlich voneinander unterscheiden. Die jeweiligen Bahnen ähnlicher Charakteristik eint dabei die Verfahrriechtung des mäanderförmig über die Oberfläche geführten Werkzeugs. Ein Einschlag unter gewissem Winkel würde somit jeweils mit beziehungsweise gegen dessen Bewegungsrichtung erfolgen (ziehende, stoßende Bearbeitung). Die dargestellte Oberflächentopographie, für welche anhand jeder zweiten Bearbeitungsbahn deutliche Einschlagabdrücke ersichtlich sind, könnte als direktes Resultat dieses Zusammenhangs gesehen werden.

Durch die gezeigte Topographie können für den vorliegenden Versuch damit auch bedingt die geringeren Rauheitswerte, gemessen in Richtung des MHP-Vorschubs, erklärt werden. Der gezeigte Zusammenhang kann jedoch nicht global auf die übrigen, in dieser Arbeit dargestellten, Versuche übertragen werden, da im Allgemeinen die jeweiligen Probenoberflächen direkt vor der MHP-Bearbeitung an der auch später hierfür eingesetzten Werkzeugmaschine plan überfräst wurden. Diese Vorgehensweise der Probenerstellung, infolge derer letztlich von einem orthogonal erfolgenden Einschlag des Werkzeugs ausgegangen werden kann, wurde auch im Zuge der im Folgenden diskutierten Untersuchung des Vorschubgeschwindigkeitseinflusses angewendet.

Abbildung 56 zeigt die Auswertung der mittels Kugeldurchmesser  $D=6\text{mm}$  erstellten Versuchsfelder.

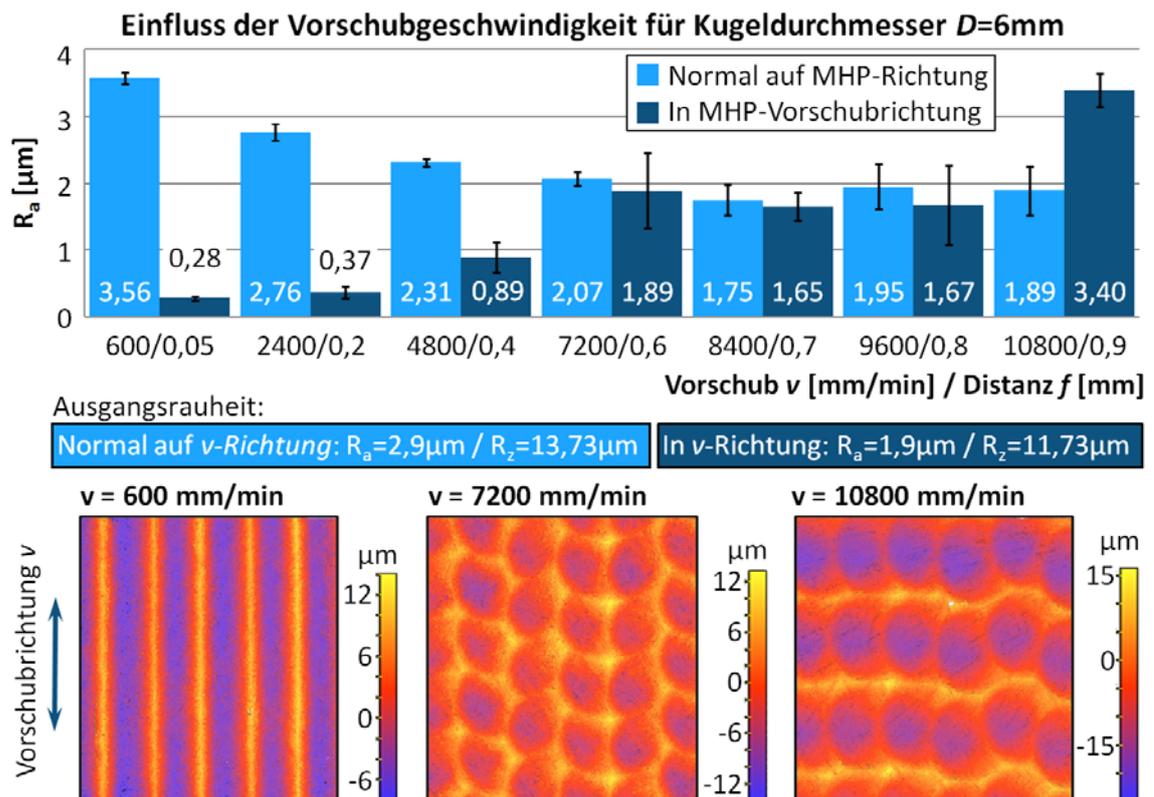


Abbildung 56: Arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$  sowie InfiniteFocus-Topographiemessungen (10-fach Objektiv) erhoben an den mittels Kugeldurchmesser  $D=6\text{mm}$  bearbeiteten Probenfeldern

In der Abbildung wurde auf die Darstellung der gemittelten Rautiefen ( $R_z$ -Werte) verzichtet, da diese in Bezug auf die einzelnen Felder dieselbe Charakteristik wie die dargestellten  $R_a$ -Werte zeigen. Die an den einzelnen Probenfeldern gemessenen  $R_z$ -Werte können jedoch Tabelle A XV des Anhangs entnommen werden.

Anhand der Gegenüberstellung wird ein deutlicher Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die in unterschiedlichen Richtungen ermittelten Rauheitswerte ersichtlich. Im Falle geringerer Geschwindigkeiten, aus welchen auch ein geringer Abstand der einzelnen Schläge im Zuge einer Bearbeitungsbahn resultiert, kann eine deutlich höhere Rauheit normal auf die gegebene Vorschubrichtung gemessen werden. Im Zuge einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit gleichen sich die richtungsbezogenen Rauheitswerte dabei sukzessive an. Für den Fall der höchsten hier untersuchten Vorschubgeschwindigkeit überwiegt letztlich der in Vorschubrichtung vorliegende Messwert gegenüber dem normal dazu ermittelten Wert.

Die jeweilige richtungsbezogene Orientierung der nach der Bearbeitung vorliegenden Oberflächenrauheit kann auch sehr anschaulich anhand der dargestellten Oberflächentopographien nachvollzogen werden.

Für den Fall einer geringen Vorschubgeschwindigkeit sind dabei deutlich die im Bahnversatz von  $s=0,5\text{mm}$  angeordneten Bearbeitungsbahnen zu erkennen. Die zwischen diesen ausgebildeten Materialkämme bestimmen das Querschnittsprofil normal zur Vorschubrichtung und bedingen die hier gemessenen hohen  $R_a$ - beziehungsweise  $R_z$ -Werte.

Durch die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit vergrößert sich der für die orthogonale Bearbeitung anhand von Gleichung (12) ermittelbare Abstand der im Zuge einer Bearbeitungsbahn aneinandergereihten Werkzeugeinschläge (Distanzwert  $f$ ). Hierdurch zeichnen sich die durch die Schläge hervorgerufenen plastischen Abdrücke sowie die zwischen diesen liegenden Materialaufwerfungen deutlich auf der Werkstückoberfläche ab. Für den Fall einer Vorschubgeschwindigkeit von  $v=7200\text{mm/min}$  (mittleres Topographiebild der Abbildung 56) führt dies durch eine annähernde Gleichheit der Einschlagabstände in den jeweiligen Richtungen (Bahnversatz  $s=0,5\text{mm}$ , Distanz  $f=0,6\text{mm}$ ) auch zu einer annähernd gleichen Verteilung der Oberflächenrauheit.

Dennoch können auch im Falle von höheren Vorschubgeschwindigkeiten (mit Ausnahme der höchsten angewendeten Geschwindigkeit) keine signifikant höheren Rauheitswerte normal zur jeweiligen Vorschubrichtung gemessen werden. Hierdurch kann durch die vorliegende Betrachtung die im Zuge der vorangegangenen Untersuchungen getätigte Beobachtung unterstrichen werden, dass sich infolge einer schlagverdichtungstechnischen Bearbeitung prozessbedingt eher höhere Rauheitswerte normal zur vorliegenden Vorschubrichtung ausbilden. Nur ein im Vergleich zum Bahnversatz annähernd doppelt so hoher Abstandswert von  $f=0,9\text{mm}$  führt über eine, anhand des rechten Topographiebildes der Abbildung 56 dargestellte, deutliche Abgrenzung der einzelnen Einschlagabdrücke zu höheren Rauheitswerten in Richtung des Vorschubes.

Es sei dabei angemerkt, dass das dargestellte Schlagabdruckmuster, im Zuge dessen sich die einzelnen Schläge einer Bahn jeweils nebeneinander anordnen, nicht als repräsentativ für die gesamte Versuchsfeldfläche angesehen werden kann. In Abhängigkeit der Messposition lassen sich dabei auch Bereiche finden, bei denen ähnlich der rechten Topographiemessung der Abbildung 55 ein wabenförmiges Schlagabdruckmuster vorliegt. Eine definierte Abdruckanordnung von Bahn zu Bahn kann dabei auf Basis der eingesetzten Technologie nicht aktiv herbeigeführt werden. Um eine derartige gezielte Beeinflussung gewährleisten zu können, müsste eine Synchronisierung beziehungsweise ein definierter zeitlicher Versatz zwischen Schlagzeitpunkt und Vorschubbewegung vorgenommen beziehungsweise definiert werden können.

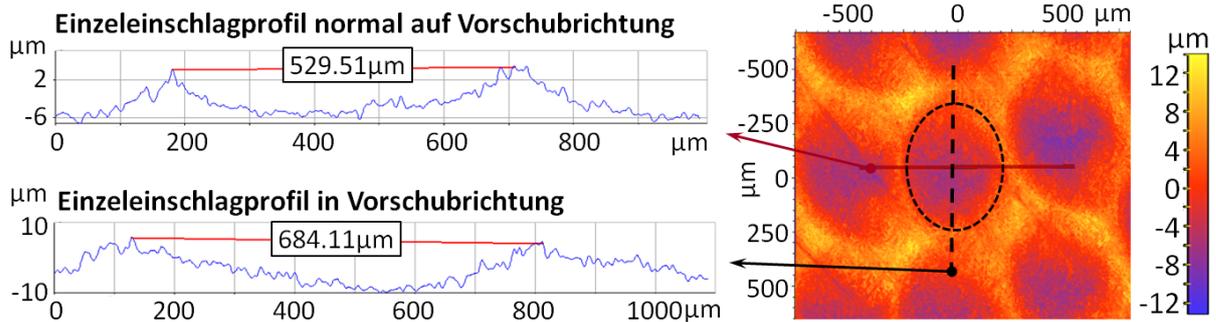
Auswertung der elliptischen Einschlagabdrücke am Beispiel des Feldes  $v=8400\text{mm/min}$ 

Abbildung 57: Vermessen der an den Versuchsfeldern variiertes Vorschubgeschwindigkeiten ( $D=6\text{mm}$ ) verbleibenden Deformationen

In Folge einer näheren Betrachtung der Topographiemessungen ist zudem auffällig, dass durch die Überlagerung einzelner Abdrücke die letztlich auf der Oberfläche verbleibenden Deformationen teilweise elliptische Form annehmen (vgl. rechtes Topographiebild, Abbildung 56). Die Deformationsform kann dabei auf das Verhältnis von Bahnversatz  $s$  zu Einschlagabstand  $f$  zurückgeführt werden. Dieser Zusammenhang wird anhand der, in Abbildung 57 dargestellten, messtechnischen Erfassung der Ellipsenhauptachsenlängen deutlich.

Die in Tabelle 22 gegebenen Messwerte zeigen dabei eine annähernde Übereinstimmung mit dem vorgegebenen Bahnversatz  $s=500\mu\text{m}$  (Länge normal auf Vorschubrichtung) beziehungsweise dem jeweils vorliegenden Distanzwert  $f$  (Länge in  $v$ -Richtung). Es kann daher darauf geschlossen werden, dass die elliptisch verbleibenden Deformationen durch die fortlaufende Überlagerung der einzelnen Einschlagabdrücke resultieren. Dabei wird der infolge eines Schlages gebildete Eindruck zunächst durch den im Distanzwert  $f$  erfolgenden nächsten Schlag deformiert. Im Zuge der nachfolgenden Bearbeitungsbahn beeinflussen die hierbei im Bahnabstand  $s$  erfolgenden Schläge das Deformationsmuster erneut, wodurch die letztlich verbleibende Topographie mit teils elliptisch erscheinenden Deformationen gebildet wird.

Tabelle 22: Dimensionen der elliptischen Deformationen des Vorschubgeschwindigkeitsversuchs (Kugeldurchmesser  $6\text{mm}$ )

Vorschub $v$ [mm/min]	Distanz $f$ [ $\mu\text{m}$ ]	Länge in $v$ -Richtung [ $\mu\text{m}$ ]	Länge normal auf $v$ -Richtung [ $\mu\text{m}$ ]
7200	600	628	563
8400	700	684	530
9600	800	884	656
10800	900	908	541

Zudem kann darauf verwiesen werden, dass die Ausbildung einer elliptischen Deformationsform lediglich für eine teilweise Überdeckung der Einschläge zu beobachten ist. Wie anhand des vorangegangenen Versuchs (rechtes Topographiebild, Abbildung 55) aber auch anhand der in Kapitel 5.1 dargestellten Untersuchungen gezeigt werden kann, bilden sich für nicht überlagerte Eindrücke auch infolge höchster Vorschubgeschwindigkeiten keine elliptischen Formen aus. Die Einschlagabdruckfläche liegt hier annähernd kreisrund vor. Dadurch kann abgeleitet werden, dass das Phänomen nicht ausschließlich auf das Vorliegen einer hohen Vorschubgeschwindigkeit zurückzuführen ist.

Die vorliegende Untersuchung zeigt zudem, dass die Richtungsbezogenheit der Rauheitswerte auch im Zusammenhang mit dem verwendeten Werkzeug gesehen werden muss. Wie anhand von Abbildung 58 gezeigt, ergeben sich infolge der Verwendung des Werkzeugs mit Kugeldurchmesser  $D=10\text{mm}$  selbst für verhältnismäßig niedrige Vorschubgeschwindigkeiten (für den vorliegenden Bahnversatz) weitgehend richtungsunabhängige Oberflächenrauheitswerte. Diese Tatsache kann auf den größeren Durchmesser der durch das Werkzeug erzeugten Eindrücke zurückgeführt werden, welcher infolge des konstanten Bahnversatzes zu einer höheren Überdeckung der einzelnen Bearbeitungsbahnen führt.

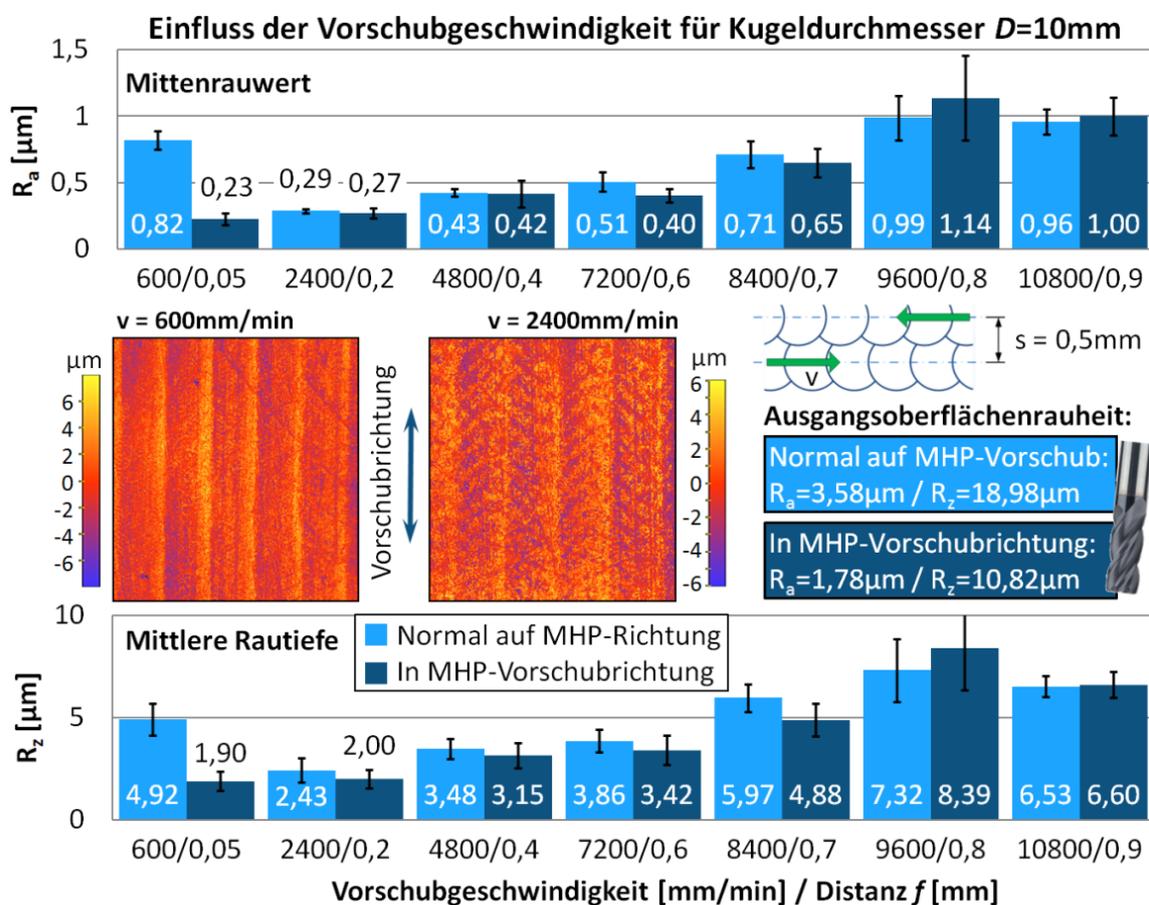


Abbildung 58: Vorschubgeschwindigkeitseinfluss für Kugeldurchmesser  $D=10\text{mm}$

Damit kann lediglich für das erste Versuchsfeld mit einer sehr hohen Differenz der Einschlagabstände ( $f=0,05\text{mm}$ ;  $s=0,5\text{mm}$ ), dessen Oberflächentopographie im Vergleich zu Versuchsfeld zwei (nächst höherer Distanzwert  $f=0,2\text{mm}$ ) in obiger Abbildung dargestellt ist, auf eine deutliche Differenz der richtungsbezogen erhobenen Messwerte verwiesen werden.

Zusammenfassend zeigt die dargestellte Betrachtung, dass sowohl das Verhältnis der Einschlagabstände (Bahnabstand  $s$ , Distanzwert  $f$ ) als auch der verwendete Kugeldurchmesser  $D$  wesentliche Einflussgrößen für die MHP-bedingten Oberflächenrauheitswerte darstellen. Zudem kann gerade im Zuge der Verwendung eines kleineren Werkzeugdurchmessers zumeist eine geringere Rauheit in Vorschubrichtung der Bearbeitung gemessen werden. Die richtungsbezogenen Abweichungen können dabei teilweise auf das Verhältnis der Einschlagabstände zurückgeführt werden (Bahnabstand  $s$  zu Distanz  $f$ ). Sie treten jedoch insbesondere auch für idente Einschlagabstandswerte (Bahnabstand  $s = \text{Distanz } f$ ) in Erscheinung. In einem solchen Fall dürften die Abweichungen letztlich auf die Überlagerung der Vorschubbewegung und der Schlagbewegung des Werkzeugs (orthogonal zur Werkstückoberfläche) zurückzuführen sein.

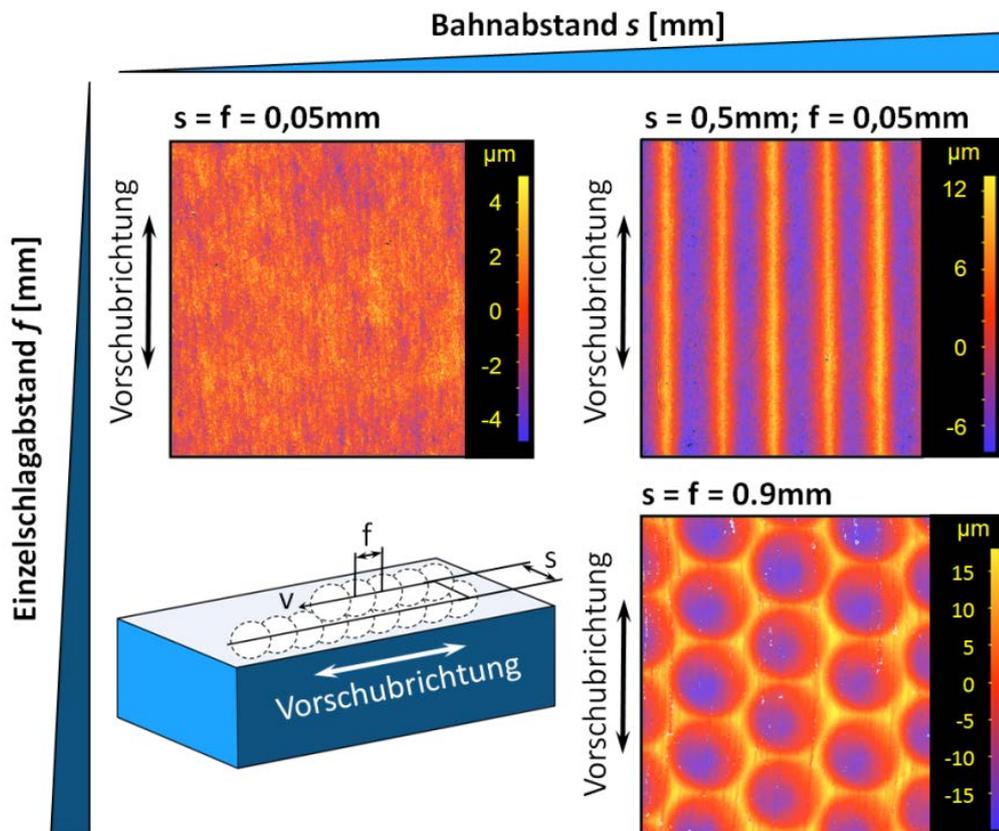


Abbildung 59: Resultierende Oberflächentopographien aufgrund unterschiedlicher Einzeleinschlaganordnungen (vgl. [37])

Durch die dabei resultierende Werkzeugbewegung in Vorschubrichtung, könnten die Aufwerfungshöhen zwischen den einzelnen Schlägen einer Bearbeitungsbahn im Vergleich zu den Materialaufwerfungen zwischen den Bahnen deutlich reduziert werden. Die dargestellten Topographiemessungen machen zudem deutlich, dass infolge einer Variation der Prozessparameter in gewissen Grenzen auch eine Strukturierung der Oberfläche herbeigeführt werden kann. Die Bandbreite der in Abhängigkeit der Einschlaganordnung mittels Kugeldurchmesser  $D=6\text{mm}$  zu realisierenden Strukturmuster ist zusammenfassend in Abbildung 59 dargestellt.

#### 6.2.4 Einfluss des Schlagwinkels

Wie anhand der Abschnitte dieses Kapitels dargestellt, birgt die schlagverdichtungstechnische Bearbeitung von Oberflächen nachweisbare Potentiale in Bezug auf eine Reduzierung der Oberflächenrauheit. Bei den dargestellten Versuchen wurde bislang eine Bearbeitung mittels orthogonalen Schlägen untersucht. Für die Bearbeitung realer Bauteile kann jedoch eine derartige Schlagführung aufgrund verschiedenster Restriktionen durch die Bauteilgeometrie nicht immer gewährleistet werden, da die notwendige Ausrichtung des Werkzeugs (MHP-Aktuator) in gewissen Fällen beispielsweise zu einer Kollision mit dem Werkstück führen kann. Die im Folgenden dargestellte Untersuchung soll daher klären, inwieweit ein Auftreffen des Schlagwerkzeugs unter einem bestimmten Winkel die erreichbare Oberflächenqualität beeinflusst. Zudem wird durch die Untersuchung des Probenwerkstoffs X155CrVMo 12-1 (1.2379) sowohl im weichgeglühten (250HV) als auch im vakuumgehärteten Zustand (650HV) die Ausgangshärte des zu bearbeiteten Materials in die Betrachtung mit einbezogen.

Um in Bezug auf die Topographie der Versuchsproben einen definierten Ausgangszustand sicherzustellen, wurden zunächst die Oberflächen beider Proben (weichgeglühtes und thermisch gehärtetes Material) mittels Radiusfräser (Durchmesser 10mm) mit einem definierten Bahnversatz von 0,4mm plan überfräst. In weiterer Folge wurden auf den vorbereiteten Probenflächen (100x100mm) unter Verwendung der in Tabelle 23 angegebenen Parameter Versuchsfelder (18x30mm) bearbeitet (siehe Abbildung 60 rechts).

*Tabelle 23: MHP-Parameter der Schlagwinkelinflussuntersuchung*

<b>Prozessparameter</b>	<b>I</b> [%]	<b>F</b> [Hz]	<b>D</b> [mm]	<b>s</b> [mm]	<b><math>\beta</math></b> [°]	<b><math>\varphi</math></b> [°]	<b>v</b> [mm/min]
Wert	100	200	8	0,2	0	0	2400

Erläuterung der Prozessparameter siehe Kapitel 4.2.

Hierbei wurde zum einen die Schlagdistanz  $t$  der Bearbeitung auf den Werten  $t=0,3$ ;  $t=0,5$ ;  $t=0,8$  und  $t=1,0$ mm sowie zum anderen der Anstellwinkel  $\alpha$  mit  $0^\circ$ ;  $10^\circ$ ;  $30^\circ$  (für die Schlagdistanzen  $t=0,3$ mm und  $t=0,5$ mm auch  $45^\circ$ ) variiert. Da dabei die Anstellung einheitlich gegen die Prozessrichtung erfolgte und damit keine Variation des Vorschubschlagwinkels  $\beta=0^\circ$  durchgeführt wurde, wird der Anstellwinkel  $\alpha$  im Zuge dieses Kapitels auch kurz mit Schlagwinkel bezeichnet.

Im Zuge der Versuchsauswertung wurde die Güte der erzeugten Oberflächen durch die Ermittlung der Oberflächenrauheitswerte  $R_a$  und  $R_z$  sowohl in als auch normal auf die Vorschubrichtung des MHP-Prozesses bestimmt. Eine Aufstellung der erhobenen Messwerte kann Tabelle A XVI und Tabelle A XVII des Anhangs entnommen werden. Für die Darstellung der wesentlichen Versuchsergebnisse werden im Folgenden die normal auf den Vorschub erhobenen Messwerte dargestellt und diskutiert, da diese eine Aussage über die erfolgte Einebnung der durch die Vorbearbeitung erzeugten Fräsriefen erlauben (ob des vorliegenden Vorschubrichtungswinkels  $\varphi=0^\circ$  sind Fräs- und MHP-Vorschubrichtung ident).

Abbildung 60 stellt einander zunächst die gemessenen arithmetischen Mittenrauheitswerte gegenüber. Hierbei kann in Bezug auf das weichgeglühte Material der bereits in vorangegangenen Untersuchungen thematisierte Einfluss der Schlagdistanz auf das Oberflächenglättungsergebnis mittels orthogonalen Schlägen dargestellt werden. Die Mittenrauheitswerte steigen dabei infolge einer Erhöhung der Schlagdistanz nahezu linear an.

Wie die Betrachtung der unter Anstellung erstellten Probenfelder zeigt, nimmt dieser Einfluss jedoch durch Auftreten eines Schlagwinkels und dessen Erhöhung zunehmend ab. Hierdurch kann für eine Bearbeitung unter  $\alpha=30^\circ$ , gänzlich unabhängig vom vorgegebenen Schlagdistanzwert, die deutlichste Reduktion des Mittenrauheitswertes verzeichnet werden. Ausgehend von der gefrästen Referenzfläche ( $R_a = 1,3 \pm 0,1 \mu\text{m}$ ), bezeichnet der erreichte  $R_a$ -Wert von  $\sim 0,2 \mu\text{m}$  eine Reduktion von 84,6%. Für den ungehärteten Grundwerkstoff stellt sich daher in Bezug auf eine Reduktion des Mittenrauheitswertes ein positiver Effekt des Anstellwinkels dar.

Im Gegensatz dazu führt im Falle des thermisch gehärteten Werkstoffs eine deutliche Abweichung von der orthogonalen Schlagführung zu einer Erhöhung des Mittenrauheitswertes (siehe Abbildung 60; dunkelblaue Balken). Zudem kann für eine Rauheitsreduktion die Forderung nach einer erhöhten Schlagkraft (positiv korreliert mit der Schlagdistanz  $t$ ) abgeleitet werden. Dabei führt eine Erhöhung der Schlagdistanz unabhängig vom vorliegenden Schlagwinkel zu einer Reduktion des  $R_a$ -Wertes.

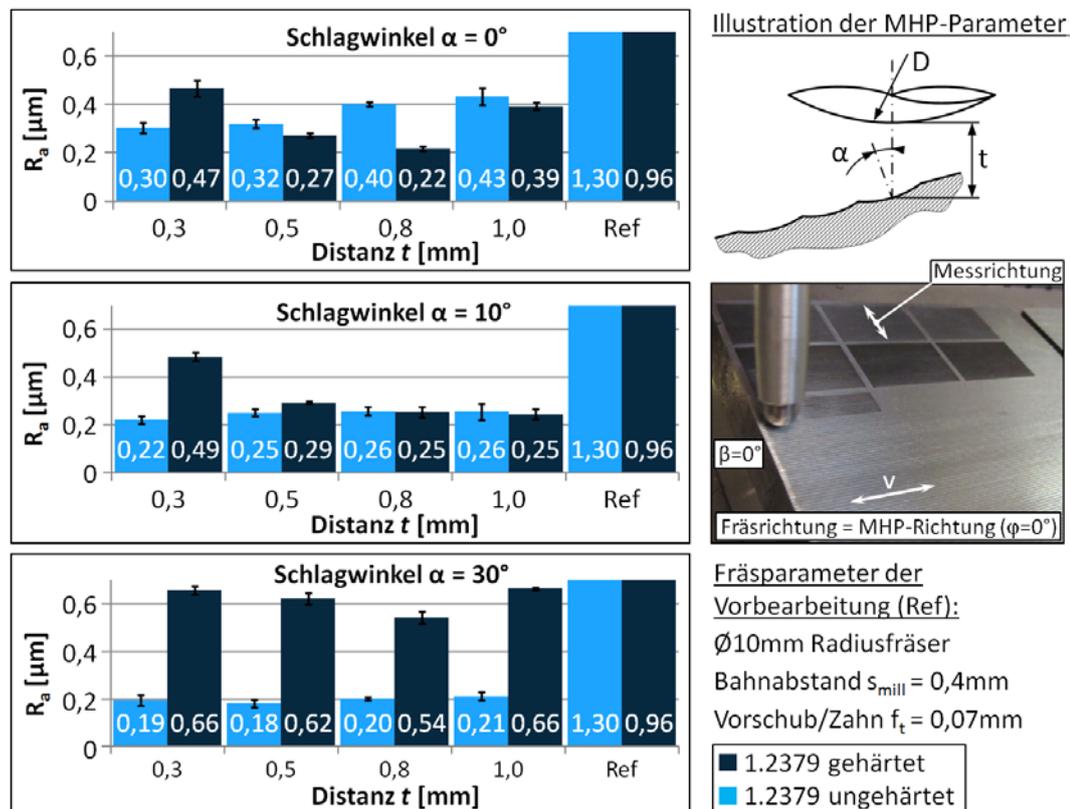


Abbildung 60: Schlagwinkeleinfluss auf die Oberflächenglättung anhand des Mittenrauwertes  $R_a$  (vgl. [5])

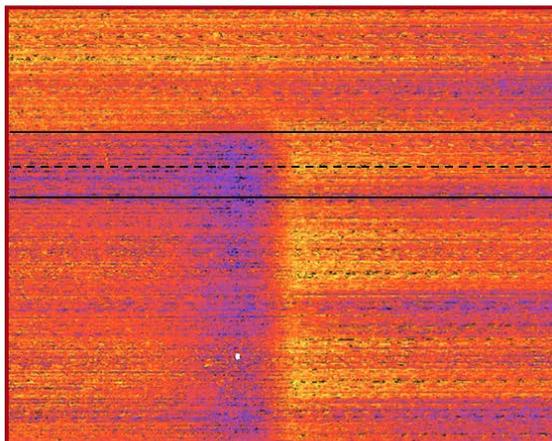
Eine Ausnahme stellen in diesem Zusammenhang die erhobenen Messwerte der mit maximaler Schlagdistanz  $t=1,0\text{mm}$  unter einem Winkel von  $\alpha=0^\circ$  und  $\alpha=30^\circ$  erstellten Versuchsfeldoberflächen dar. Durch eine genauere Betrachtung der Oberflächentopographie kann dabei ein möglicher Zusammenhang dieser Abweichungen mit der vorliegenden Versuchsfeldanordnung erkannt werden, welcher anhand von Abbildung 61 näher erläutert werden soll.

Die Abbildung zeigt die Anordnung der einzelnen Versuchsfelder auf der Probenoberfläche. Wie ersichtlich, wurden im Zuge der Versuchsdurchführung zunächst drei Reihen unter der Vorgabe der Schlagwinkel  $\alpha=0^\circ$ ,  $\alpha=10^\circ$  und  $\alpha=30^\circ$  erstellt, wobei die Schlagdistanz für die Bearbeitung der einzelnen Felder einer Reihe von  $t=0,3\text{mm}$  bis  $t=0,8\text{mm}$  gesteigert wurde. Die mittels  $t=1,0\text{mm}$  erstellten Felder wurden hingegen aus Platzgründen auf dem unteren Teil der Versuchsprobe angeordnet.

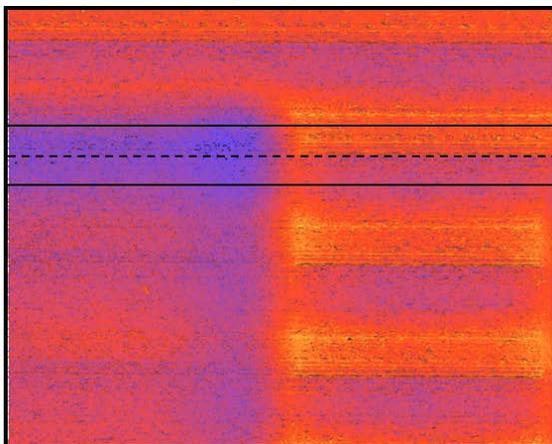
Wie die Betrachtung der Topographie einzelner Feldrandbereiche zeigt, dürften die unerwartet hohen Messergebnisse der mittels  $t=1,0\text{mm}$  erstellten Oberflächen im direkten Zusammenhang mit dieser Positionierung stehen. Dabei kann eine positionsbedingte Abweichung der relativen Lage zwischen MHP- und Fräsbahnen (-riefen) als Hauptursache gesehen werden.

### Topographiebetrachtung der Feldrandzonen ( $t=0,8/1,0\text{mm}$ ; $\alpha=0^\circ$ )

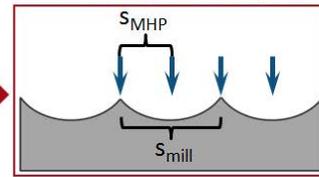
Versuchsfeld  $\alpha=0^\circ$  /  $t=0,8\text{mm}$



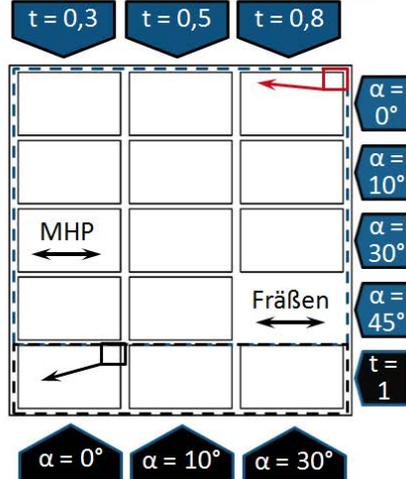
Versuchsfeld  $\alpha=0^\circ$  /  $t=1,0\text{mm}$



Bearbeitungsbahnen ( $t=0,8$ )



Anordnung der Versuchsfelder



Bearbeitungsbahnen ( $t=1,0$ )

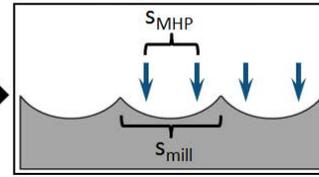


Abbildung 61: Untersuchung der Randbereichstopographie ausgewählter Versuchsfelder

Illustrativ ist dieser Zusammenhang anhand der Topographien zweier Feldrandbereiche in Abbildung 61 dargestellt, in welchen jeweils die erste Bearbeitungsbahn des MHP-Prozesses durch eingezeichnete Linien hervorgehoben wurde. Es zeigt sich, dass diese erste Bahn im Falle des mittels  $t=0,8\text{mm}$  bearbeiteten Bereichs relativ genau auf der Spitze einer Fräsriefe positioniert wurde (obere Darstellung). Durch den vorgegebenen MHP-Bahnversatz von  $s_{MHP}=0,2\text{mm}$ , dessen Betrag genau der Hälfte des Bahnversatzes der Fräsbearbeitung  $s_{mill}=0,4\text{mm}$  entspricht, wird damit auch jede zweite Folgebahn genau auf der Spitze einer Fräsriefe positioniert. Die Riefen können dadurch optimal eingebnet werden. Im Falle des mit  $t=1,0\text{mm}$  bearbeiteten Feldes liegt hingegen die erste Bearbeitungsbahn und dadurch später auch die Folgebahnen genau auf der Flanke der vorliegenden Fräsriefe. Aus diesem Grund können die, für dieses Feld messtechnisch ermittelten, auffallend hohen Rauheitswerte über die, in Bezug auf eine Einglättung der Oberfläche, nicht optimale Positionierung der MHP-Bearbeitungsbahnen erklärt werden.

Dieser Einfluss der Startposition auf das Glättungsergebnis, welcher in Bezug auf die Reproduzierbarkeit der Bearbeitungsergebnisse problematisch bewertet werden muss, kann allerdings durch die Vorgabe eines Vorschubrichtungswinkels  $\varphi \neq 0^\circ$  unterbunden werden. Eine derartige Winkelvorgabe zwischen der MHP- und der Fräsvorschubrichtung sollte, wie anhand der Versuchsergebnisse verdeutlicht wird, insbesondere für die Bearbeitung von harten Werkstoffen vorgenommen werden. Neben einer erhöhten Krafteinwirkung bedarf es gerade hier einer genauen Schlagpositionierung, um eine plastische Deformation (Einglättung) der Fräsriefenstruktur zu gewährleisten.

Wie Abbildung 62 zeigt, lassen sich die soeben anhand der Mittenrauwerte beschriebenen Zusammenhänge auch Großteils auf die erhobenen Rautiefen übertragen, welche zudem einen besseren Schluss auf die Einebnung der vorliegenden Riefenstrukturen erlauben. Für eine orthogonale Bearbeitung ( $\alpha = 0^\circ$ ) zeigt sich dabei auch für den  $R_z$ -Wert anhand der Proben unterschiedlicher Ausgangshärte eine gegenläufige Tendenz des Einflusses der Schlagdistanz. Dadurch wird die Forderung nach einer erhöhten Schlagkraft für die Einebnung von Fräsriefenstrukturen auf gehärteten Materialien unterstrichen (Messwert des Feldes mit  $t=1,0\text{mm}$  aus oben angeführten Gründen aus der Betrachtung ausgenommen).

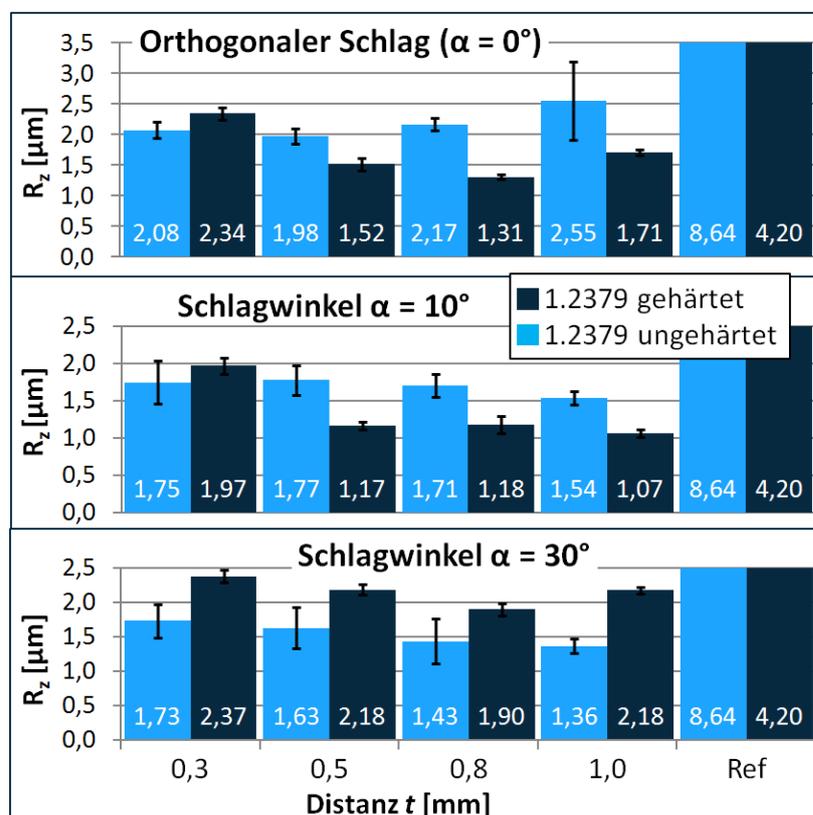


Abbildung 62: Gemittelte Rautiefen  $R_z$  erhoben normal auf die MHP- bzw. Fräsvorschubrichtung (Vorschubrichtungswinkel  $\varphi = 0^\circ$ )

Im Falle von weicheren Materialien reicht hierfür bereits eine geringere Schlagkraft vollends aus, wobei die Oberflächengüte durch eine weitere Erhöhung der Schlagdistanz herabgesetzt wird. Wie bereits anhand vorangegangener Versuche dargestellt, ist dies auf die zunehmende Ausprägung der Einschlagabdrücke zurückzuführen, welche die Topographie der MHP-bearbeiteten Oberflächen weicherer Proben dominieren. Durch das Auftreten eines Schlagwinkels kann für weichere Materialien analog zum  $R_a$ -Wert auch eine zunehmende Reduktion der gemittelten Rautiefen verzeichnet werden.

Der Einfluss des Schlagwinkels dürfte dabei auf das Auftreten einer Kraftkomponente parallel zur Werkstückoberfläche zurückzuführen sein, welche auch den Betrag der Normalkraftkomponente reduziert. Durch ein Abgleiten des Stößels an der Oberfläche würde hierdurch die Einglättung der vorbearbeitungsbedingten Fräsriefen unterstützt. Zudem führt die Reduzierung der Normalkraftkomponente selbst bei erhöhter Schlagdistanz zu geringeren Einzeleinschlagabdrucktiefen, wodurch deren Einfluss abnimmt.

Ein seitliches Auftreffen auf die Fräsriefen und das teilweise Abgleiten des Stößels könnte auch die Ursache für die Reduktion der  $R_z$ -Messwerte bei einer Bearbeitung unter  $\alpha=10^\circ$  darstellen, welche sich im Gegensatz zu den Mittenrauwerten unter diesem Winkel auch für die thermisch gehärtete Probe einstellt. Ein deutlich steilerer Schlagwinkel von  $\alpha=30^\circ$  bedingt aber letztlich einen deutlichen Anstieg der Rautiefenwerte. Es ist naheliegend, dass hierbei die durch die Anstellung reduzierte Normalkraftkomponente nicht mehr ausreicht um die Riefenstruktur des gehärteten Grundmaterials einzuebnen.

Zusammenfassend kann anhand der vorliegenden Betrachtung festgehalten werden, dass eine signifikante Reduktion der Oberflächenrauheit unter allen im Zuge des Versuchs vorgenommenen Winkeleinstellungen beobachtet werden konnte. In Bezug auf eine Optimierung des Prozessparameters zeigt sich für das weiche Material, übereinstimmend mit dem Stand der Technik (siehe Kapitel 2.4), ein positiver Einfluss einer Winkelerhöhung. Im Falle des gehärteten Werkstoffs ist hingegen, neben einer möglichst hohe Schlagkraft (Schlagdistanz  $t$ ), eine orthogonale Schlagführung beziehungsweise lediglich eine Bearbeitung unter geringem Winkel Zielführend um eine hohe Einglättung der Oberfläche zu erreichen.

## 6.3 Einbringung von Druckeigenspannungen

### 6.3.1 Einfluss von Vorschubrichtung und Mehrfachbearbeitung

Anhand der in [23] beschriebenen Betrachtung des Eigenspannungszustandes MHP-bearbeiteter Proben kann die Eignung der Technologie für das Einbringen von Druckeigenspannungen abgeleitet werden. Es wird dabei auf eine Richtungsabhängigkeit der eingebrachten Spannungen verwiesen, wobei eine deutlich höhere Druckeigenspannungseinbringung normal auf die Vorschubrichtung des MHP-Prozesses gemessen wurde.

Dieser Effekt soll anhand der im Folgenden beschriebenen Untersuchung erweiternd behandelt werden, wobei die in [23] erläuterte Theorie des Vorbearbeitungseinflusses untersucht werden soll. Hierbei wurde der beschriebene Effekt auf die Richtung der vorangegangenen Fräsbearbeitung zurückgeführt, welche normal auf die spätere MHP-Vorschubrichtung erfolgte (Vorschubrichtungswinkel  $\varphi=90^\circ$ ). Dabei wurde nahegelegt, dass die durch die Bearbeitung mittels Kugelkopffräser resultierenden Fräsriefen, durch deren Ausrichtung eine einfachere Verformung in Normalrichtung der MHP-Bearbeitung erlauben dürften. Die höhere Spannungseinbringung wird daher aufgrund einer dadurch resultierenden höheren plastischen Deformation in dieser Richtung erklärt (vgl. Kapitel 2.4.1).

Neben der Betrachtung des Einflusses der Vorschubrichtungen (MHP-, Fräsvorschub) soll anhand der Untersuchung zudem geklärt werden, ob sich über eine mehrfache Bearbeitung derselben Oberfläche der Eigenspannungszustand des behandelten Probenmaterials zusätzlich beeinflussen lässt.

Zu diesem Zweck wurden auf einer überfrästen Probe des Werkstoffs C45E (1.1191) insgesamt fünf Versuchsfelder bearbeitet, wobei einheitlich die in Tabelle 24 angegebenen Parametereinstellungen zur Anwendung kamen. Im Zuge des Versuchs wurde für die Bearbeitung der einzelnen Felder jeweils die Vorschubrichtung der MHP-Bearbeitung variiert. Zudem wurden einzelne Probenbereiche (Versuchsfelder) zweifach bearbeitet, wobei auch hier jeweils unterschiedliche Vorschubrichtungen vorgegeben wurden.

*Tabelle 24: MHP-Parametersetting des Versuchs der Beeinflussung des Eigenspannungszustandes*

-	<i>D</i> [mm]	<i>F</i> [Hz]	<i>I</i> [%]	<i>v</i> [mm/min]	<i>s</i> [mm]	<i>t</i> [mm]
Parameterwert	8	200	100	2400	0,2	1

Erläuterung der Prozessparameter siehe Kapitel 4.2.

Die jeweilige Ausrichtung der Bearbeitung sowie die Anzahl der Bearbeitungsschritte kann für die einzelnen Felder aus der Probendarstellung im linken Teil der Abbildung 63 entnommen werden, in welcher die Bearbeitungsschritte und deren Richtungen anhand von Pfeilen illustriert sind.

Die MHP-bearbeitete Probe wurde im Zuge des, die Grundlage dieser Arbeit bildenden, Forschungsprojekts (siehe Vorwort) ausgewertet. Es kam dabei ein D8 Diffraktometer mit *General Area Detector Diffraction System* (GADDS) der Firma Bruker ASX ausgestattet mit einem Vantec 2000 Halbleiterdetektor zum Einsatz. Im Zuge der Messungen wurde mittels Röntgenbeugung ( $\sin^2\psi$ -Methode) der Eigenspannungszustand an der Oberfläche der einzelnen Versuchsfelder bestimmt. Der Zustand wurde dabei jeweils sowohl in Feldlängsrichtung (Vertikale Messrichtung) als auch in Querrichtung des Feldes (Horizontale Messrichtung) ausgewertet. Die derart erhaltenen Messergebnisse, welche in [13] präsentiert wurden, sind anhand von Abbildung 63 dargestellt und sollen im Folgenden in Hinblick auf die Auswirkung der variierten Einflussgrößen diskutiert werden.

Wie zunächst gezeigt werden kann, konnte über die Bearbeitung mittels Machine Hammer Peening eine deutliche Indizierung von Druckspannungen an der Oberfläche des behandelten Materials erreicht werden. Im Vergleich zur unbearbeiteten (gefrästen) Referenzfläche, an welcher lediglich geringe Druckeigenspannungswerte ( $<100\text{MPa}$ ) gemessen wurden, zeigt sich hierbei für sämtliche MHP-bearbeiteten Probenbereiche eine signifikante Steigerung des Druckspannungswertes.

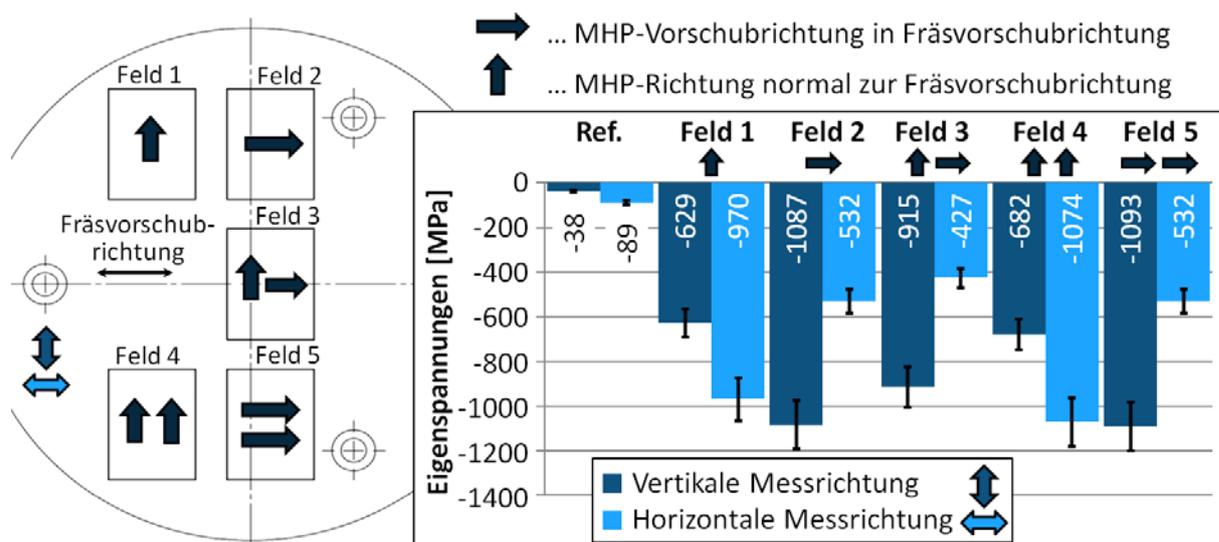


Abbildung 63: Illustration der Probenbearbeitung sowie Darstellung der gemessenen Eigenspannungen an der Oberfläche (vgl. [13])

Anhand des direkten Vergleichs von Feld 1 zu Feld 4 beziehungsweise Feld 2 zu Feld 5, welche in der gegebenen Vorschubrichtung jeweils einfach beziehungsweise doppelt bearbeitet wurden, wird ersichtlich, dass der Wert der eingebrachten Druckeigenstressungen in Folge einer mehrfachen Bearbeitung derselben Fläche nicht in signifikanter Weise gesteigert werden konnte.

Anhand der dargestellten Untersuchung kann zudem die Richtungsabhängigkeit der Druckeigenstressungseinbringung nachvollzogen werden. Für sämtliche bearbeitete Probenfelder liegt dabei der Wert der Druckeigenstressungen gemessen normal zur Vorschubrichtung des MHP-Prozesses deutlich über jenem Messwert, der in Richtung des Prozessvorschubs gemessen wurde.

Wie anhand der Betrachtung des Versuchsfelds 3 abgeleitet werden kann, stellt im Falle einer mehrfachen Bearbeitung die Ausrichtung des letzten Bearbeitungsschrittes den ausschlaggebenden Einflussfaktor für die letztliche Verteilung der Eigenstressungswerte dar. Das betrachtete Feld wurde dabei zunächst in der mit vertikal bezeichneten, in einem zweiten Schritt in der als horizontal bezeichneten Messrichtung bearbeitet. Die Eigenstressungsmessung dieses Feldes zeigt, obgleich anhand einer betragsmäßig etwas geringeren Ausprägung, dieselbe Spannungsverteilung, die auch an den lediglich in horizontaler Richtung bearbeiteten Probenfeldern 2 und 5 gemessen werden kann. Einheitlich liegen dabei an diesen Feldern höhere Druckspannungswerte in vertikaler Messrichtung und damit normal auf die MHP-Vorschubrichtung des letzten Bearbeitungsschrittes vor.

Wie weiterführende im Zuge des, die Grundlage dieser Arbeit bildenden, Projektes durchgeführte Messungen an den vorliegenden Proben zeigen, kann die erläuterte vorschubrichtungsabhängige Eigenstressungsverteilung auch unterhalb der Materialoberfläche nachvollzogen werden. Wie in [42] dargestellt, wurde dabei für die Erstellung von Eigenstressungstiefenprofilen ein auf dem Bohrlochverfahren basierendes MTS3000-RESTAN-Messsystem der Firma SINT Technology herangezogen.

Abbildung 64 zeigt beispielhaft anhand des ersten Versuchsfeldes den Vergleich der hier ermittelten Ergebnisse mit der oben dargestellten Röntgendiffraktometrie-messung an der Materialoberfläche dieses Feldes. Wie ersichtlich, stimmen die Messungen der Eigenstressungswerte qualitativ sehr gut überein. Dies gilt insbesondere in Bezug darauf, dass für die anhand der Bohrlochmethode ermittelten Werte auf einen Streubereich von etwa  $\pm 200\text{MPa}$  hingewiesen werden muss. Zudem ist auch der Streubereich der röntgendiffraktometrisch erhobenen Werte zu beachten.

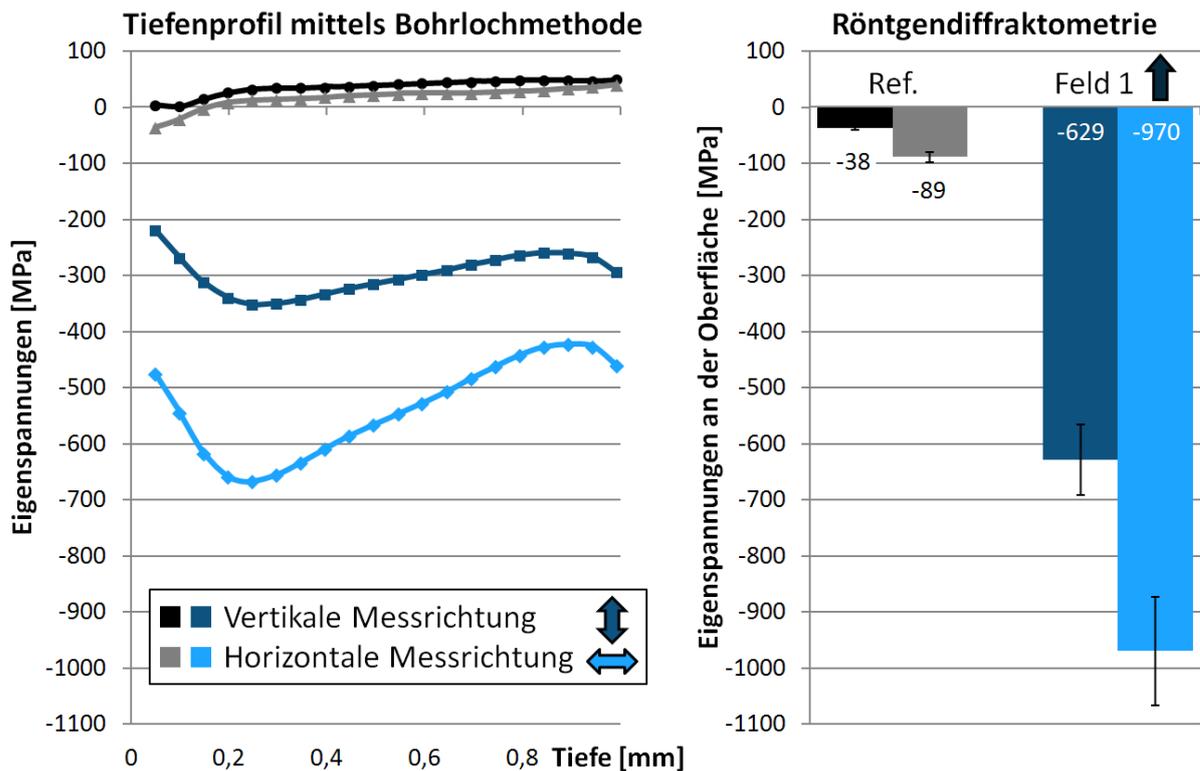


Abbildung 64: Vergleich der Eigenspannungsmessungen basierend auf Röntgendiffraktometrie- und Bohrlochmethode, Versuchsfeld 1 (vgl. [42])

Die richtungsabhängige Einbringung von Druckspannungen, welche sich wie gezeigt sowohl an der Bauteiloberfläche als auch im behandelten Material selbst einstellt, kann im vorliegenden Fall nicht auf die vorangegangene Fräsbearbeitung und die dadurch resultierenden Fräsriefen zurückgeführt werden. So stellen sich die messbaren Abweichungen der eingebrachten Eigenspannungen gänzlich unabhängig von der Richtung der vorangegangenen Fräsbearbeitung ein (in Abbildung 63 durch einen Doppelpfeil gekennzeichnet). Das betrachtete Phänomen kann damit lediglich auf die Vorschubrichtung des MHP-Prozesses zurückgeführt werden.

Ein möglicher Zusammenhang könnte hierbei mit der prozessbedingt richtungsabhängigen Materialmodifikation infolge der bahnweisen MHP-Bearbeitung bestehen, welche wie anhand der Betrachtungen des Kapitels 6.2 erläutert auch zu deutlich richtungsabhängigen Oberflächenrauheitswerten führt.

Eine Betrachtung der Oberflächentopographie der hier bearbeiteten Versuchsfelder zeigt dabei, wie am Beispiel des ersten Feldes anhand von Abbildung 65 dargestellt, für die vorliegenden Parametereinstellungen deutliche Materialanhäufungen zwischen den einzelnen Bearbeitungsbahnen des MHP-Prozesses.

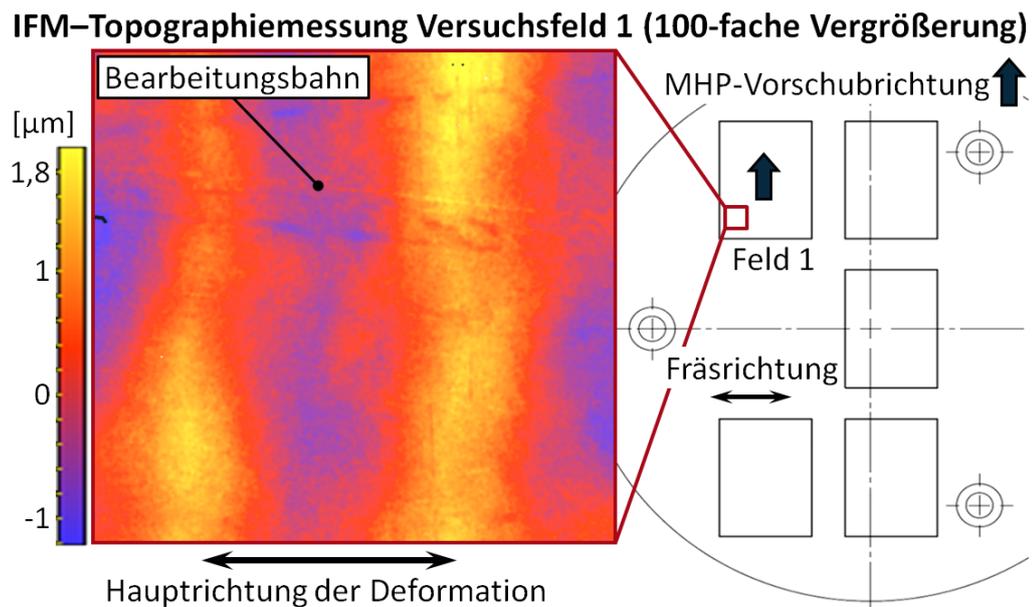


Abbildung 65: Betrachtung der Oberflächentopographie, Versuchsfeld 1

Es kann damit davon ausgegangen werden, dass im Zuge der Bearbeitung die primäre Materialumformung normal zu den jeweiligen Bahnen und somit zur Vorschubrichtung des MHP-Prozesses erfolgt. Hierdurch können letztlich durch eine höhere plastische Deformation auch höhere Eigenspannungswerte gemessen in dieser Richtung erklärt werden, welche letztlich lediglich aufgrund der bahnweisen Prozessführung und der hierdurch herbeigeführten richtungsbezogenen Materialmodifikation resultieren.

Zusammenfassend zeigt die hier dargestellte Betrachtung eine deutliche Generierung von Druckeigenspannungen für den untersuchten Werkstoff, welche sowohl an der Materialoberfläche als auch unterhalb dieser nachgewiesen werden konnten. Die Ausprägung der Eigenspannungswerte ist dabei nicht in signifikanter Weise durch eine mehrfache Bearbeitung ein und desselben Probenbereichs zu beeinflussen. Sie stellt sich jedoch in deutlicher Abhängigkeit von der für den letzten Bearbeitungsschritt vorgegebenen MHP-Vorschubrichtung ein, wobei eine deutlich höhere Druckspannungseinbringung normal auf diese zu verzeichnen ist. Diese richtungsbezogene Einbringung von Druckspannungswerten ist dabei ein direktes Resultat des bahnweise geführten MHP-Prozesses und stellt sich unabhängig von der Richtung der Vorbearbeitung ein.

### 6.3.2 Vergleich zu materialabtragenden Prozessen

Die funktionelle Leistungsfähigkeit technologisch bearbeiteter Komponenten ist im größten Maße durch die Güte und die Eigenschaften der durch die Prozesse erzeugten Oberfläche geprägt.

Als Plattform für die Generierung neuer Erkenntnisse wurde die CIRP Collaborative Working Group on „*Surface Integrity and Functional Performance of Components*“ gebildet, deren Arbeit die Grundlage für das Keynote-Paper [2] bildete.

Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse enthalten unter anderem die Darstellung der Auswertung eines Round-Robin-Tests, welche in internationaler Zusammenarbeit von zwölf Teilnehmern aus neun Nationen erarbeitet wurde. Dabei wurden identische Proben vergeben, deren Oberflächen mit einem frei zu wählenden Fertigungsprozess (hierbei auch frei wählbare Prozessparameter) und dem Ziel einer Druckeigenspannungseinbringung von etwa  $-200\text{MPa}$  sowie einer leichten Härtesteigerung der Oberfläche bearbeitet werden sollten (vgl. [43]). Neben anderen Oberflächenbeschaffenheitsparametern wie Härte und Oberflächenrauheit wurde im Zuge der Testauswertung auch der Eigenspannungszustand dieser Proben anhand von Eigenspannungstiefenprofilen untersucht.

Der direkte Vergleich dieser Ergebnisse, welche aus [2] entnommen wurden, mit dem Eigenspannungszustand einer MHP-bearbeiteten Probe stellt das Ziel der im Folgenden beschriebenen Untersuchung dar.

Ein derartiger Vergleich kann hierbei dadurch ermöglicht werden, dass im Zuge des Versuchs auf eine Versuchsprobe ident zu jenen der oben dargestellten Arbeitsgruppe zurückgegriffen werden konnte.

Die in Abbildung 66 dargestellte zylindrische Testscheibe aus vergütetem Werkzeugstahl 100Cr6 (1.2067) mit Ausgangshärte von 54HRC wurde im Folgenden mit dem primären Ziel der Einbringung von Druckeigenspannungen MHP-bearbeitet.

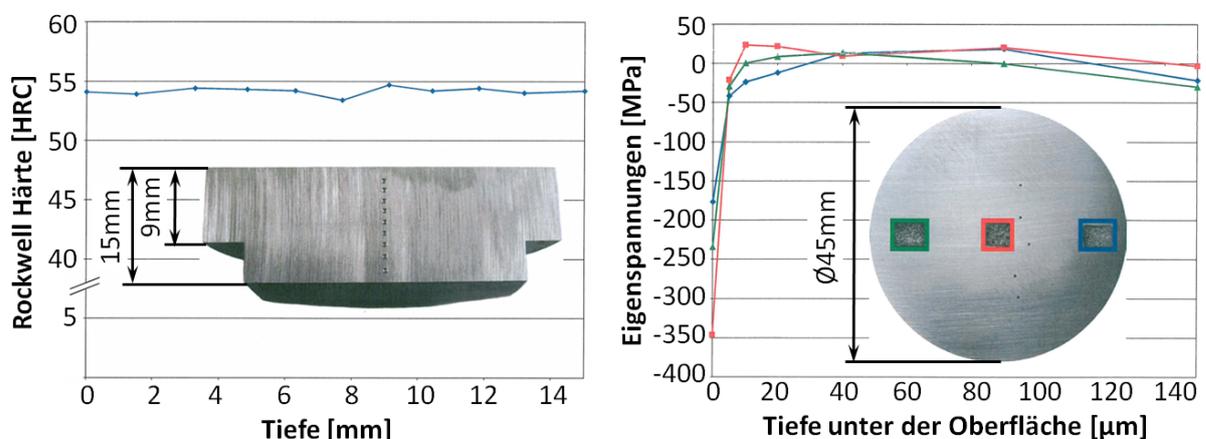


Abbildung 66: Spezifikation der Versuchsproben mit Härte- und Eigenspannungsausgangszustand (vgl. [43])

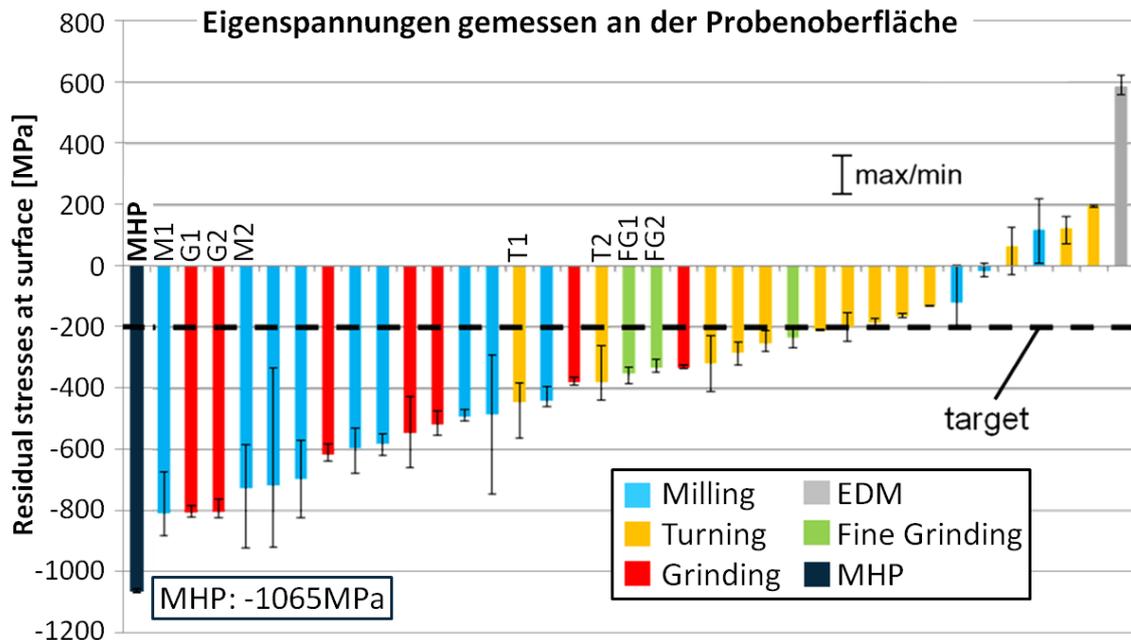
Zu diesem Zweck wurde durch die Wahl einer vergleichsweise geringen Schlagfrequenz von  $F=100\text{Hz}$  eine Steigerung der Schlagdistanz  $t$  auf 4,3mm ermöglicht, wodurch durch die erhöhte Umformung des Probenmaterials die Einbringung von Druckeigenspannungen begünstigt wurde. Für den Bearbeitungsprozess wurde des Weiteren eine spiralförmige Prozessführung gewählt, deren Prozessverlauf beginnend in Probenmitte zu dessen Rand geführt wurde. Hierdurch sollte, basierend auf den im vorangegangenen Kapitel dargestellten Erkenntnissen, die Hauptrichtung der Druckeigenspannungen in radiale Probenrichtung gelegt werden. Die Gesamtheit der für die Probenbearbeitung gewählten Prozessparameter, welche anhand von Kapitel 4.2. ihre Erläuterung finden, ist in Tabelle 25 dargestellt.

Um des Weiteren auch in Bezug auf die messtechnische Ermittlung des Eigenspannungszustandes eine genaue Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurde die behandelte Probe am Foundation Institute of Materials Science (IWT, Bremen) mit denselben Methoden und unter Verwendung der Messeinrichtung aus [2] ausgewertet. Aufgrund der identischen Probenspezifikation und Auswertung können die Messwerte damit im Folgenden für einen direkten Vergleich des Eigenspannungszustandes eines MHP-modifizierten Materials mit den Eigenspannungsverläufen (entnommen aus [2]) herangezogen werden, die durch unterschiedliche, materialabtragende Prozesse herbeigeführt wurden.

In den folgenden Abbildungen werden dabei die Eigenspannungen an der Materialoberfläche, der Druckspannungsmaximalwert sowie das gesamte Eigenspannungstiefenprofil der jeweiligen Proben vergleichend dargestellt. Unter dem jeweiligen Diagramm werden zudem die aus [2] entnommenen Spezifikationen jener Fräs- (milling, Kürzel: M), Schleif- (grinding, G), Dreh- (turning, T) und Läppprozesse (fine grinding, FG) angegeben, deren Eigenspannungswerte am ehesten repräsentativ für einen Vergleich zu den vorliegenden Werten des MHP-Prozesses sind.

*Tabelle 25: Strategie zur Bearbeitung der 100 Cr 6 Versuchsprobe*

<b>Prozessparameter</b>	<b>MHP Probe</b>
Kugeldurchmesser $D$ [mm]	8
Bahnabstand $s$ [mm]	0,1
Vorschub $v$ [mm/min]	600
Frequenz $F$ [Hz]	100
Intensität $I$ [%]	100
Schlagdistanz $t$ [mm]	4,3

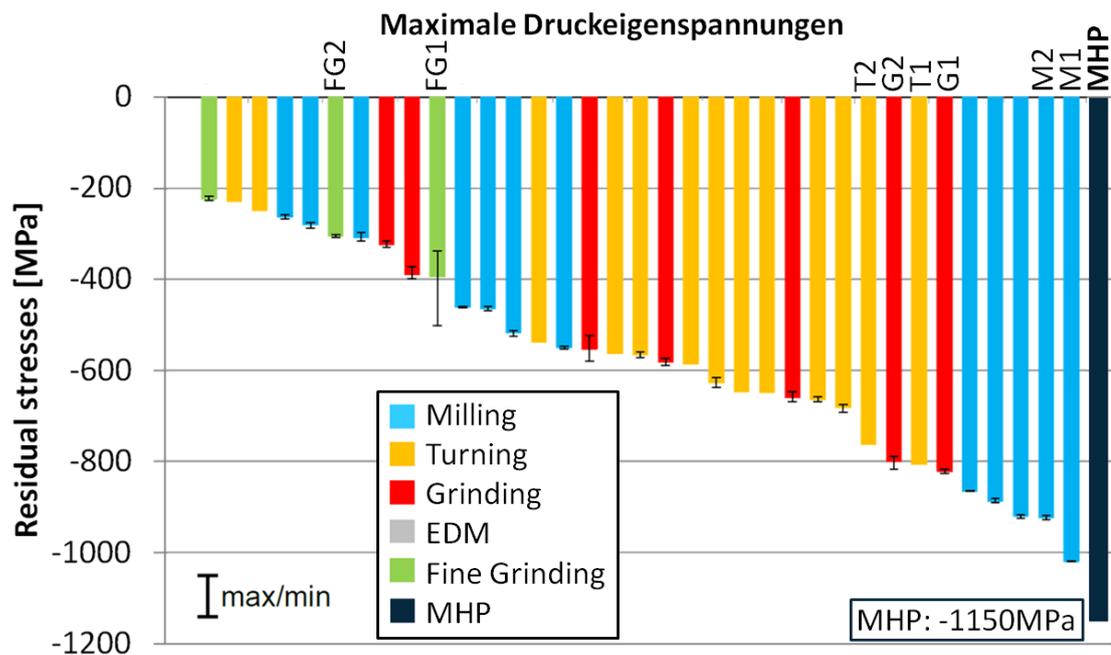


Set ID	Process	Specific feature
M1	UA face milling	Ø 5mm milling tool, $a_p = 0.01\text{mm}$
M2	Face milling	Ø 25mm inserted blade cutter, 1 cutting edge, $f_t = 0.1\text{mm}$
G1	Face grinding	CBN grinding wheel, $a_e = 10\mu\text{m}$
G2	UA face grinding	Ø 60 mm grinding tool, $a_p = 5\mu\text{m}$
T1	Face turning	CBN tool, $a_p = 0.3\text{mm}$ , $f = 0.1\text{ mm}$ , $v_c = 90\text{m/min}$ , lubrication: dry
T2	Face turning	CBN tool, $a_p = 0.3\text{mm}$ , $f = 0.1\text{ mm}$ , $v_c = 90\text{m/min}$ , lubrication: oil
FG1	Fine grinding	Lapping, grain size $15\text{pm Al}_2\text{O}_3$ , time 24min, pressure $0.1\text{N/mm}^2$
FG2	Fine grinding	Lapping, grain size $30\text{pm Al}_2\text{O}_3$ , time 12min, pressure $0.05\text{N/mm}^2$

Abbildung 67: Eigenspannungen gemessen an der Probenoberfläche und ausgewählte Prozessparameter (vgl. [2] S.613)

Wie bereits anhand der Betrachtung des Eigenspannungszustandes an der Werkstückoberfläche in Abbildung 67 ersichtlich, zeigen die meisten dargestellten Proben deutliche Druckspannungswerte nach der jeweiligen Bearbeitung (vgl. [2] S.613). Die hier im Wesentlichen anhand von Fräs- und Schleifprozessen erreichten Maximalwerte in der Größenordnung von etwa  $-800\text{MPa}$  werden durch den mittels einer MHP-Bearbeitung erreichten Druckspannungswert von über  $-1000\text{MPa}$  jedoch deutlich überschritten. Auch in Bezug auf die maximal eingebrachten Druckeigenspannungen, welche im Allgemeinen unterhalb der Materialoberfläche gefunden werden setzt sich dieses Bild fort (siehe Abbildung 68).

Das hier mittels MHP-Bearbeitung erreichte Druckspannungsmaximum von deutlich über  $-1100\text{MPa}$  kann im Wesentlichen nur zu einigen Fräsprozessen annähernd in Relation gesetzt werden. Diese zeigen in Bezug auf materialabtragende Technologien die höchsten Maximalwerte. In Abhängigkeit der Prozessparameter können jedoch auch deutlich niedrigere Werte ermittelt werden (vgl. [2] S.613).



Set ID	Process	Specific feature
M1	Face milling	Multi-insert mill, 7 inserts, $f_t = 0.02\text{mm}$
M2	Face milling	Multi-insert mill, 7 inserts, $f_t = 0.01\text{mm}$
G1	UA face grinding	$\varnothing 60\text{ mm}$ grinding tool, $a_p = 5\mu\text{m}$
G2	Face grinding	CBN grinding wheel, $a_e = 10\mu\text{m}$
T1	Face turning	CBN tool, $a_p = 0.3\text{mm}$ , $f = 0.1\text{ mm}$ , $v_c = 170\text{m/min}$ , lubrication: dry
T2	Face turning	CBN tool, $a_p = 0.3\text{mm}$ , $f = 0.1\text{ mm}$ , $v_c = 170\text{m/min}$ , lubrication: oil
FG1	Fine grinding	Lapping, grain size $15\text{pm Al}_2\text{O}_3$ , time 24min, pressure $0.1\text{N/mm}^2$
FG2	Fine grinding	Lapping, grain size $30\text{pm Al}_2\text{O}_3$ , time 12min, pressure $0.05\text{N/mm}^2$

Abbildung 68: Maximalwert der eingebrachten Druckeigenstressungen und ausgewählte Prozessparameter (vgl. [2] S.613)

Neben der in Relation zu den betrachteten Referenzen hohen maximalen Ausprägung der Druckspannungswerte wurde für die MHP-Technologie auch eine hohe Tiefenwirkung der Eigenstressungseinbringung ermittelt. Anhand des, in Abbildung 69 bis zu einer Tiefe von  $350\mu\text{m}$  dargestellten Eigenstressungstiefenprofils wurde dabei der finale Nulldurchgang (Wechsel von Druck- zu Zugspannungen) in einer Tiefe von  $945\mu\text{m}$  gefunden.

Durch diesen Wert kann auf eine ausgeprägte Schichtdicke des durch die MHP-Bearbeitung modifizierten Werkstoffanteils verwiesen werden. Ein direkter Vergleich zu den dargestellten Referenzen kann jedoch in Hinblick darauf, dass die Auswertung einiger dieser Proben lediglich bis zu einer Tiefe von  $250\mu\text{m}$  erfolgte, nicht gezogen werden (vgl. [2] S.613). Die hier gezeigte, vergleichsweise hohe Einbringung von Druckeigenstressungen infolge einer MHP-Behandlung der Oberfläche konnte ob der Tatsache erwartet werden, dass der betrachtete Prozess als einziger eine auf die Generierung derartiger Spannungen direkt ausgerichtete Oberflächenbehandlung darstellt.

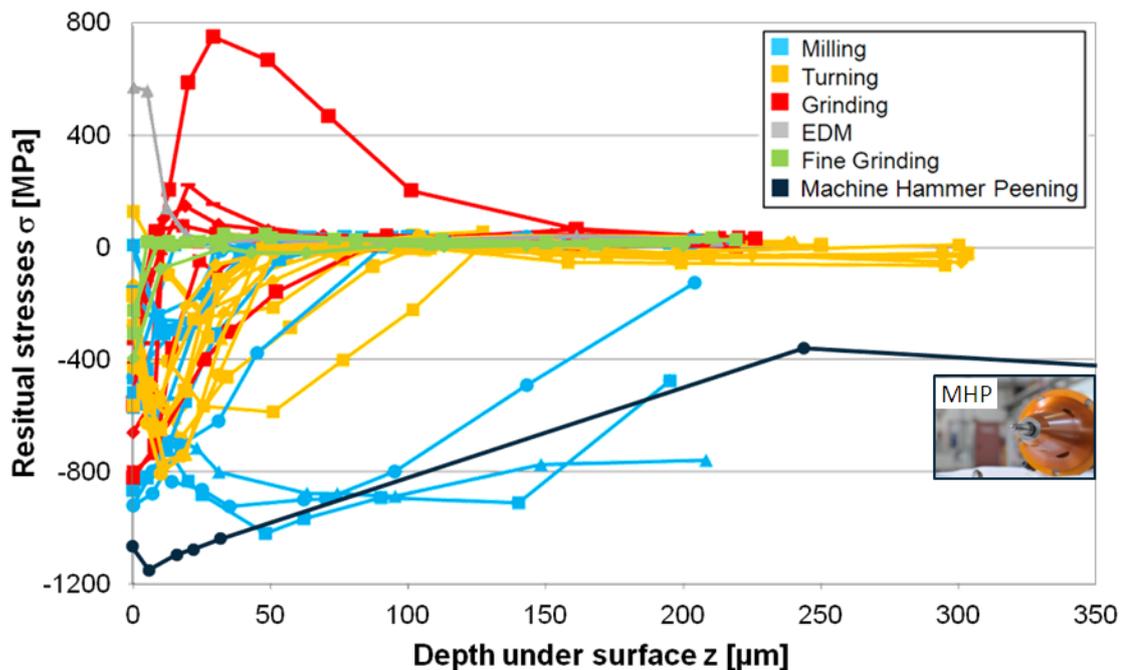


Abbildung 69: Eigenspannungstiefenprofile der materialabtragenden Prozesse im Vergleich zur MHP-bearbeiteten Probe (vgl. [2] S.612)

Die gegebene Betrachtung kann dennoch nahe legen, dass durch eine nach einer formgebenden Bearbeitung eines Bauteils vorgenommene MHP-Bearbeitung der Eigenspannungszustand durch die Generierung höherer Druckspannungswerte weiter verbessert werden kann. Wie anhand von Abbildung 69 durch die Gegenüberstellung der Tiefenprofile ersichtlich, könnten dabei nach Fräsoperationen deutlich vorliegende Druckspannungswerte durchaus noch gesteigert werden.

#### 6.4 Verfahrensvergleich nach Almen

Im Zuge der vorangegangenen Abschnitte dieses Kapitels wurden die infolge gewisser Parametereinstellungen erreichbaren, technologischen Potentiale der MHP-Technologie für unterschiedliche Materialien dargestellt. Dabei konnten anhand des in Kapitel 6.3.2 dargestellten Vergleichs der Eigenspannungszustände einer MHP-bearbeiteten Probe zu unterschiedlichen, über spanabtragende Prozesse gefertigten, Referenzen gewisse Ergebnisse auch in Relation zu anderen Verfahren betrachtet werden. Es ist jedoch festzuhalten, dass die vorliegende Technologie keine spanabtragende Bearbeitung darstellt. Wie in Kapitel 2.2 ausgeführt, ist die MHP-Behandlung hingegen als direktes, deterministisches, mechanisches Oberflächenverfestigungsverfahren zu klassifizieren. Um eine Grundlage für den Vergleich der vorliegenden Technologie zum ebenfalls direkt wirkenden Oberflächenverfestigungsverfahren des Kugelstrahlens zu schaffen, welches in der industriellen Praxis weite Verbreitung findet, soll im Folgenden auf die Intensitätsmessung nach Almen zurückgegriffen werden.

Dieses 1944 durch John O. Almen in [44] patentierte Verfahren basiert auf der infolge plastischer Oberflächenstreckung resultierenden Durchbiegung einseitig kugelgestrahlter Plättchen (Almen-Teststreifen). Für die Messung im Zuge des Kugelstrahlverfahrens werden derartige, nach [45] genormte Streifen aus kaltgewalztem Federstahl SAE 1070 (44-50 HRC) über vier Schrauben auf einem Halter gespannt und für unterschiedliche Zeit dem Strahlprozess ausgesetzt. Unter Verwendung einer Almen-Messuhr wird nun die Durchbiegung (Bogenhöhe) der einzelnen Plättchen bestimmt, wobei sich in Abhängigkeit der Strahldauer unterschiedliche Höhen einstellen. Dabei steigt zunächst durch eine erhöhte plastische Streckung der Oberfläche die Bogenhöhe infolge einer Verlängerung der Strahldauer an. Über der Streckung entgegenwirkende Kaltverfestigungseffekte kommt es letztlich jedoch zu einer Sättigung, wobei die Bogenhöhe auch infolge einer deutlichen weiteren Erhöhung der Strahlzeit nur mehr geringfügig erhöht wird. Anhand der somit bestimmten Sättigungskurve (Probendurchbiegung aufgetragen über die Strahlzeit) wird nun der Almenintensitätswert als jener Wert der Bogenhöhe bestimmt, für welchen eine Verdopplung der Strahlzeit eine maximal 10%ige Erhöhung der Probendurchbiegung bedeuten würde (vgl. [46]).

Anhand der im Folgenden dargestellten Untersuchung soll nun in Anlehnung an diesen für Strahlverfahren äußerst bedeutenden Intensitätskennwert eine MHP-bedingte Almenintensität für unterschiedliche Prozessparametereinstellungen ermittelt werden. Zunächst wurde dabei für die anhand von Abbildung 70 dargestellte MHP-Bearbeitung von Teststreifen ein in Bezug auf dessen Abmessungen und dem Lochbild der Fixierungsschrauben der SAE Norm J442 [45] entsprechender Teststreifenhalter angefertigt.

Die für die Bearbeitung genutzten Maschinenprogramme wurden derart erstellt, dass eine möglichst flächendeckende Bearbeitung der Streifen ermöglicht werden konnte. Dabei wurde das Werkzeug möglichst nahe um die Fixierungsschrauben geführt, wobei dennoch in Abhängigkeit des jeweiligen Werkzeugdurchmessers ein gewisser Abstand zur Vermeidung einer Kollisionen vorgegeben werden musste (siehe Abbildung 70). Das in der Abbildung illustrierte Maschinenprogramm stellt eine Bearbeitung des Teststreifens in Streifenquerrichtung dar (Bearbeitungsbahnen verlaufen parallel zur Querseite des Streifens). Im Zuge der späteren Versuche wurden daneben auch Teststreifen mit einer Vorschubausrichtung in Streifenlängsrichtung bearbeitet, wobei die Bearbeitungsbahnen hier parallel zur Längsseite des Streifens geführt wurden. Auf diese Weise sollte im Zuge der späteren Auswertung eine Aussage über die Vorschub- beziehungsweise Prozessrichtungsabhängigkeit der ermittelten Intensitätswerte ermöglicht werden.

### Versuch zur Bestimmung der Almen Intensität des MHP-Prozesses

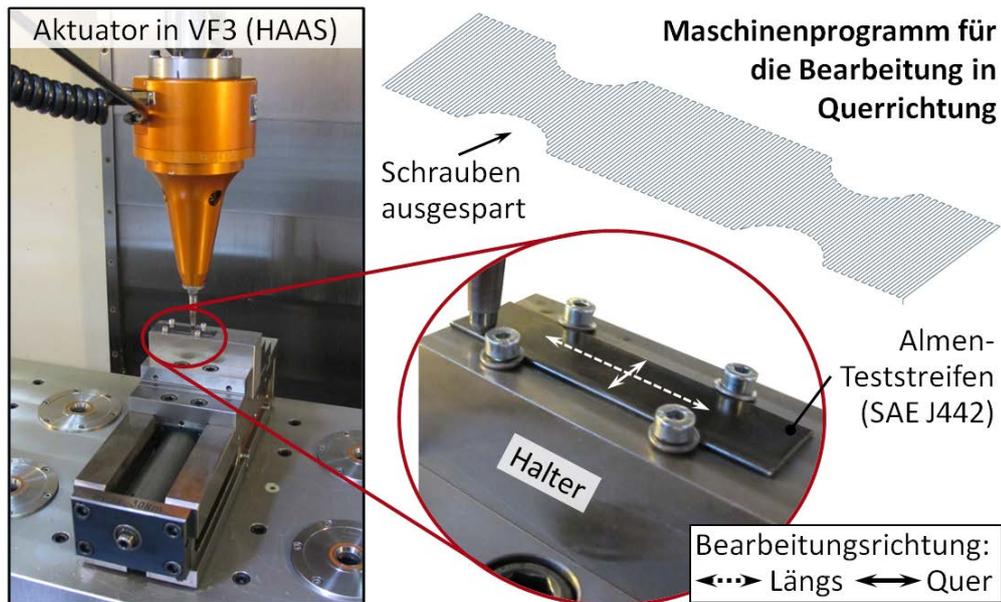


Abbildung 70: Bestimmung der MHP-bedingten Almenintensität

Für eine normgerechte Bestimmung der Almenintensität musste im Vorfeld der Untersuchung auch eine zweckmäßige Wahl der später zu verwendenden Teststreifenausführung erfolgen. Anhand von [45] sind dabei drei, durch die Buchstaben N, A und C bezeichnete Varianten genormt, welche sich im Wesentlichen lediglich durch deren Dicke unterscheiden. Die Bezeichnung des verwendeten Teststreifens ist dabei auch im Zuge der Darstellung eines Almenintensitätswertes der Längeneinheit der entsprechenden Bogenhöhe beizufügen. So bezeichnet beispielsweise eine Intensität von 0,35mm A eine, an einem A-Teststreifen vorliegende Bogenhöhe von 0,35mm (analog auch für andere Maßsysteme z.B.: 0,0132 inch N).

Die SAE Normschrift J443 [47] stellt die normgerechte Einsetzbarkeit der einzelnen Teststreifenvarianten anhand eines für einen A-Streifen zu ermittelnden Intensitätsbereichs dar. So kann diese Variante mittlerer Stärke (1,27-1,32mm) für eine normgerechte Ermittlung von Intensitäten im Bereich von 0,1mm A bis 0,6mm A eingesetzt werden. Für geringere Intensitätswerte ist der unter der Bezeichnung N genormte Teststreifen geringerer Stärke (0,76-0,81mm) einzusetzen und höhere Intensitäten sind anhand eines C-Teststreifens einer Stärke von 2,36-2,41mm zu ermitteln.

Um nun den grundsätzlichen Bereich der MHP-bedingten Almenintensität abschätzen zu können, wurden in einem ersten Versuchsschritt unter Verwendung eines Werkzeugs mit Kugeldurchmesser  $D=10\text{mm}$  einzelne A-Teststreifen jeweils unter Vorgabe der Schlagdistanzwerte von  $t=0,2\text{mm}$ ,  $t=0,5\text{mm}$  und  $t=0,9\text{mm}$  bearbeitet. Die in einem Bahnabstand von  $s=0,2\text{mm}$  erfolgte Bearbeitung wurde

dabei jeweils für einzelne Streifen in Streifenlängs- sowie in Streifenquerrichtung durchgeführt. Da die hier gemessenen Bogenhöhenwerte, die in Tabelle 26 neben den übrigen im Zuge der späteren Versuche erhobenen Werte gegebenen sind, gänzlich in einem Bereich von 0,1 bis 0,6mm A gefunden werden konnten, wurden auch im Zuge der Folgeuntersuchungen mittelstarke A-Teststreifen für die Bestimmung der Almenintensitäten eingesetzt.

Um einen Vergleich der oben gegebenen MHP-Potentiale zu intensitätsäquivalenten Kugelstrahlprozessen ermöglichen zu können, wurde bei der Wahl der für die Ermittlung der Almenintensität betrachteten Parameterkombinationen versucht, die Bandbreite der oben variierten Prozessparameter bestmöglich abzudecken. Dabei wurden mit dem Kugeldurchmesser  $D=6\text{mm}$  sowie  $D=10\text{mm}$  Werkzeuge des kleinsten sowie größten bisher betrachteten Durchmessers eingesetzt. Für die Einschlagabstände wurde durch die Vorgabe des minimalen und maximalen Parameterwerts der in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Untersuchung ( $s=f=0,1\text{mm}$ ,  $s=f=0,5\text{mm}$ ) versucht eine Vergleichbarkeit zu den dort gegebenen Ergebnissen herzustellen. Hierbei wurde der Distanzwert  $f$  durch eine zweckmäßige Wahl des Vorschubs jeweils auf den Wert des Bahnversatzes  $s$  gesetzt, wobei die Frequenz konstant mit  $F=200\text{Hz}$  vorgegeben wurde ( $s=f$  wird in den folgenden Abbildungen und Tabellen lediglich durch  $s$  bezeichnet).

Tabelle 26: Anhand MHP-bearbeiteter A-Teststreifen ermittelte Kennwerte

Kugeldurchmesser $D$	Distanz $t$ [mm]	Richtung	Almenintensität (MHP)		Kugeldurchmesser $D$	Distanz $t$ [mm]	Richtung	Almenintensität (MHP)	
Kugeldurchmesser $D=6\text{mm}$	$s=0,1\text{mm}$	0,2	Längs	0,34 [mm A]	Kugeldurchmesser $D=10\text{mm}$	$s=0,1\text{mm}$	0,2	Längs	0,18 [mm A]
			Quer	0,47 [mm A]				Quer	0,22 [mm A]
		0,6	Längs	0,37 [mm A]			0,6	Längs	0,20 [mm A]
			Quer	0,62 [mm A]				Quer	0,33 [mm A]
		1,0	Längs	0,35 [mm A]			1,0	Längs	0,25 [mm A]
			Quer	0,75 [mm A]				Quer	0,43 [mm A]
	1,0	2x Längs	0,44 [mm A]	0,2		Längs	0,15 [mm A]		
		2x Quer	0,66 [mm A]			Quer	0,16 [mm A]		
	$s=0,5\text{mm}$	0,2	Längs	0,20 [mm A]		$s=0,2\text{mm}$	0,5	Längs	0,18 [mm A]
			Quer	0,27 [mm A]				Quer	0,21 [mm A]
		0,6	Längs	0,29 [mm A]			0,9	Längs	0,24 [mm A]
			Quer	0,36 [mm A]				Quer	0,34 [mm A]
1,0		Längs	0,32 [mm A]	0,2	Längs		0,08 [mm A]		
		Quer	0,48 [mm A]		Quer		0,10 [mm A]		
$s=0,5\text{mm}$	0,2	2x Längs	0,09 [mm A]	0,6	Längs	0,14 [mm A]			
		2x Quer	0,13 [mm A]		Quer	0,19 [mm A]			
	1,0	Längs	0,24 [mm A]	1,0	Längs	0,24 [mm A]			
		Quer	0,29 [mm A]		Quer	0,29 [mm A]			

**Illustration der variierten Parameter:**

Kugel  $\varnothing D$   
Schlagdistanz  $t$

←→ Längs  
←→ Quer

Die Vorgabe der Schlagdistanzwerte von  $t=0,2\text{mm}$ ,  $t=0,6\text{mm}$  sowie  $t=1,0\text{mm}$  sollte zudem für einen möglichst weiten Bereich dieses, auf unterschiedlichen Vorgabewerten untersuchten Prozessparameters die entsprechenden Intensitätskenngrößen liefern. Unter Zuhilfenahme einer normgerechten Almen-Messuhr wurde nun die Durchbiegung der mit diesen Parameterkombinationen bearbeiteten Teststreifen (jeweils für gesonderte Streifen in Streifenlängs- bzw. in Streifenquerrichtung angewendet) gemessen.

Die hierbei ermittelten Ergebnisse sind anhand von Tabelle 26 zusammengestellt. Die Tabelle enthält dabei auch die Messwerte von vier Teststreifen, die im Zuge der Untersuchungen zweifach MHP-bearbeitet wurden (zweite Bearbeitung erfolgte mit identer Vorschubrichtung, im direkten Anschluss an die vorangehende). Hierbei sollte anhand der Betrachtung der jeweiligen Maximalausprägungen der Parameter (geringster/höchster Kugeldurchmesser angewendet im geringsten/höchsten Bahnversatz mit höchster/geringster Schlagdistanz; damit  $D=6\text{mm}$ ;  $s=0,1\text{mm}$ ;  $t=1,0\text{mm}$  sowie  $D=10\text{mm}$ ;  $s=0,5\text{mm}$ ;  $t=0,2\text{mm}$ ) eine Abschätzung der unter den jeweiligen Vorschubrichtungen eintretenden Sättigung erfolgen. Wie die anhand von Tabelle 27 gegebene Betrachtung der prozentuellen Änderung der gemessenen Bogenhöhenwerte zeigt, kommt es dabei infolge einer zweiten MHP-Bearbeitung durchaus zu einer Änderung der vorliegenden Messwerte, deren Größenordnung auch in einem Bereich  $>10\%$  zu finden ist.

Es ist auffällig, dass infolge der Parameterkombination unter Verwendung des Werkzeuges  $D=6\text{mm}$  eine niedrige Streifendurchbiegung nach der zweiten MHP-Bearbeitung in Querrichtung gemessen wurde. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass im Zuge der Erstellung dieses Teststreifens eine Anpassung der Bearbeitungsstrategie erfolgen musste, um den bereits nach der ersten MHP-Behandlung deutlich deformierten Streifen erneut bearbeiten zu können. Da hierbei insbesondere die Seitenkanten des Streifens deutlich verformt waren, kam es im Zuge der zunächst vorgenommen zweiten Bearbeitung, die durch einen einmaligen Zündvorgang gestartet wurde, zu einem „Abreißen“ des Prozesses beim Erreichen eines stark deformierten Kantenbereiches. Aus diesem Grund wurde das Maschinenprogramm derart geändert, dass das Werkzeug nach jeder Bearbeitungsbahn kurzzeitig auf Zündhöhe ( $t_{\text{zünd}}=0,2\text{mm}$ ) verfahren wurde. Erst danach wurde dieses wieder auf den jeweiligen Schlagdistanzwert gebracht und für die Bearbeitung einer neuen Bahn genützt. Obgleich hierdurch letztlich eine durchgängige zweite Bearbeitung eines neuen Teststreifens erreicht werden konnte, dessen Bogenhöhenwert in Tabelle 27 gegeben ist, dürfte die erhöhte Anzahl an Werkzeugeinschlägen an den Bahnnumkehrpunkten das vorliegende Messergebnis deutlich beeinflusst haben.

Tabelle 27: Prozentuelle Änderung der Bogenhöhe infolge von Mehrfachbearbeitung

[mm A]	D=6mm/s=0,1mm/t=1,0mm			D=10mm/s=0,5mm/t=0,2mm		
	1xMHP	2xMHP	Änderung	1xMHP	2xMHP	Änderung
Längs	0,35	0,44	<b>26%</b>	0,08	0,09	<b>13%</b>
Quer	0,75	0,66	<b>-12%</b>	0,10	0,13	<b>30%</b>

Hierdurch erscheint die Ermittlung einer MHP-bedingten Almenintensität anhand einer Sättigungskurve und damit analog zu Strahlprozessen problematisch. Dabei ist es durchaus denkbar, über die oben beschriebene Maschinenprogrammänderung (vor jeder Bahn erneutes Verfahren auf Zündhöhe) einzelne Streifen unter jeweiliger Anwendung dieser Bearbeitungsstrategie mehrfach zu bearbeiten und damit Bogenhöhenwerte für die Erstellung einer Sättigungskurve zu ermitteln. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Anpassung das Ergebnis deutlich verfälschen würde. Um nach Möglichkeit die Verhältnisse einer realen MHP-Behandlung mit durchgängiger Bearbeitung nach einmaligem Zündvorgang wiederzugeben, wurde aus diesem Grund von einer derartigen Ermittlung abgesehen.

Damit wird an dieser Stelle die Almenintensität des MHP-Prozesses als gemessene Bogenhöhe eines nach einmaligem Zündvorgang mit durchgängig konstanter Schlagdistanz bearbeiteten, genormten Teststreifens definiert. Die gegebenen Werte können hierdurch zum einen die Intensität einer im Zuge einer realen Applikation erfolgenden MHP-Bearbeitung wiedergeben. Zum anderen bieten sie eine gewisse, wenn auch unter den genannten Einschränkungen zu sehende, Vergleichbarkeit zu entsprechenden Intensitätskenngrößen von Strahlprozessen. Da jedoch im Allgemeinen infolge einer zweiten MHP-Behandlung ohne Programmvariation durchaus eine Steigerung der Bogenhöhe >10% zu erwarten ist (vgl. Tabelle 27), zeigen die hier angegebenen MHP-Kenngrößen die Tendenz eine eher zu geringe Vergleichsgröße zu repräsentieren. Die angeführten Werte können damit als Minimalintensität einer MHP-Bearbeitung gesehen werden. Für einen Vergleich mit Almenintensitätswerten, die auf Basis einer Sättigungskurve ermittelt wurden sind diese daher gegebenenfalls noch etwas zu erhöhen.

Abbildung 71 zeigt die, an den in Querrichtung bearbeiteten A-Teststreifen ermittelten Bogenhöhenwerte, welche der obigen Definition folgend als Almenintensität des MHP-Prozesses (MHP-Almenintensität) mit der Einheit mm A (MHP) bezeichnet werden. Die Betrachtung der Einflüsse der variierten Prozessparameter zeigt dabei deutlich, dass die Verwendung eines geringeren Kugeldurchmessers zu durchwegs höheren Kennwerten führt. Die Grenzen der für die beiden hier betrachteten Durchmesser farblich hinterlegten Bereiche werden dabei einerseits durch die mittels hohem Einschlagabstand  $s=f=0,5\text{mm}$  (kurz mit  $s$  bezeichnet) erreichten Kennwerte (Untergrenze) und andererseits durch die für geringe Abstände  $s=f=0,1\text{mm}$  vorliegenden Werten (Obergrenze) gebildet.

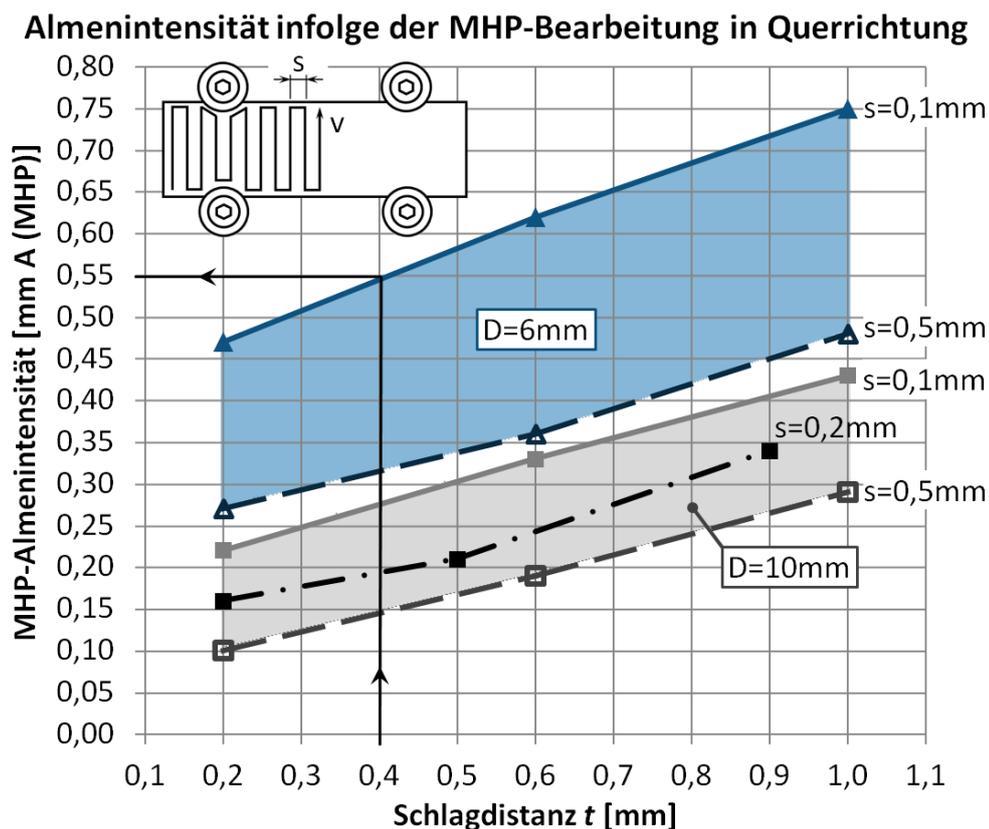


Abbildung 71: MHP-Almenintensitätswerte in Querrichtung bearbeiteter Teststreifen

Die Kenngrößenwerte der im Vorfeld zwecks Abschätzung der ungefähren Intensitätsgrößenordnung mittels  $s=f=0,2\text{mm}$  erfolgten Bearbeitungen liegen innerhalb des für die entsprechende Kugel gegebenen Bereichs. Damit kann anhand der Darstellung eine ungefähre Abschätzung von Intensitätswerten erfolgen, die infolge einer Bearbeitung innerhalb der gegebenen Parametergrenzbereiche resultieren würden.

Da die nach einer Bearbeitung in Querrichtung ermittelte MHP-Almenintensität für alle gewählten Parametereinstellungen infolge einer Erhöhung der Schlagdistanz deutlich ansteigt, kann der Einfluss dieses Faktors auf die durch den Prozess bedingte, plastische Deformation sehr gut wiedergegeben werden (siehe dazu Kapitel 5.1.1).

Zudem wird auch der Einfluss der gewählten Vorschubrichtung durch die Messwerte dargestellt. Wie anhand von Abbildung 72 ersichtlich, welche die infolge einer Bearbeitung in Steifenlängsrichtung zu messenden Kenngrößen zeigt, werden hier deutlich geringere Werte erreicht. In Bezug auf den Einfluss von Kugeldurchmesser und Einschlagabstand behalten die oben für eine Bearbeitung in Querrichtung angegebenen Zusammenhänge Gültigkeit. Wie die Abbildung zeigt, kann zudem auch ein intensitätserhöhender Einfluss der Schlagdistanz erkannt werden.

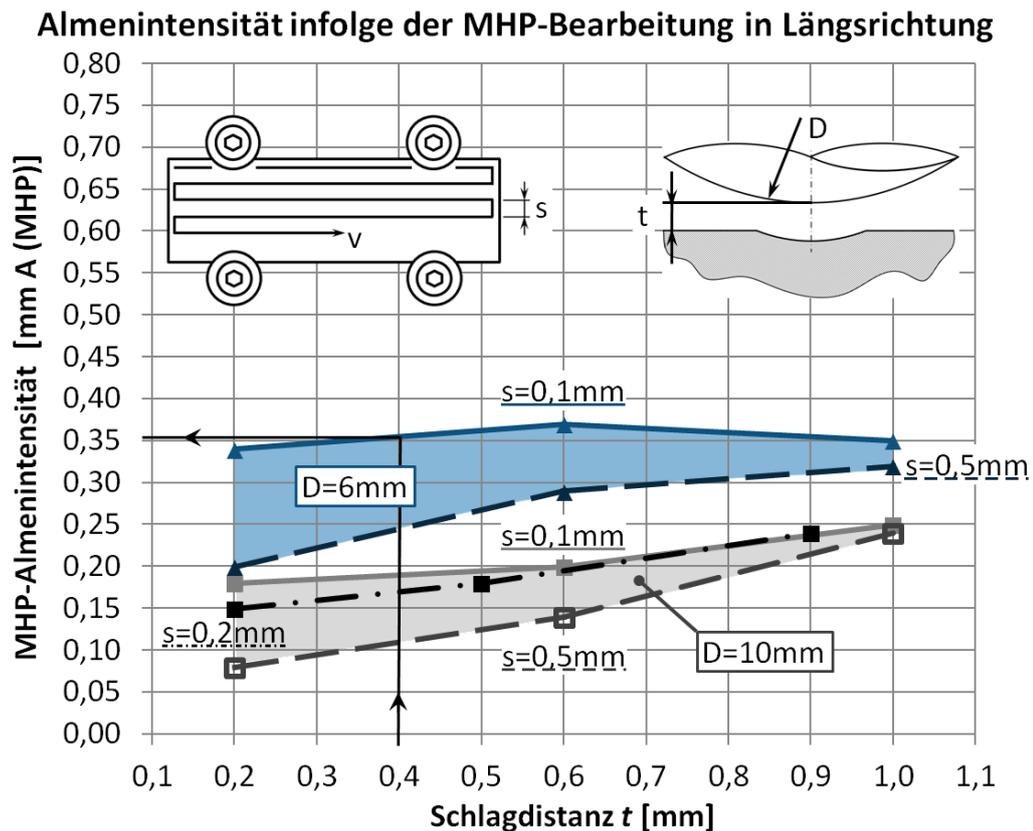


Abbildung 72: MHP-Almenintensitätswerte in Längsrichtung bearbeiteter Teststreifen

Dieser ist jedoch im Falle des geringeren Kugeldurchmessers von  $D=6\text{mm}$  für die höchsten Schlagdistanzwerte abgeschwächt, wobei für  $s=f=0,1\text{mm}$  auch eine gegenläufige Tendenz zu verzeichnen ist. Letztlich ist auch in Bezug auf eine Bestimmung von Intensitätskenngrößen in Längsrichtung die Möglichkeit der Ableitung von Werten für Einschlagabstände zwischen den hier gegebenen Grenzen möglich. Dabei liegen auch hier die Intensitätswerte der mittels  $s=f=0,2\text{mm}$  bearbeiteten Streifen zwischen den, den niedrigeren und höheren Einschlagabständen zuzuordnenden Werten.

Zusammenfassend kann damit festgehalten werden, dass sich durch die Bestimmung einer MHP-bedingten Almenintensität wesentliche Merkmale des MHP-Prozesses, wie Vorschubrichtungsbezogenheit oder der Einfluss der Schlagdistanz, wiedergeben lassen. Die Ermittlung des mit Almenintensität des MHP-Prozesses bezeichneten Kennwertes erfolgt dabei in Anlehnung an einen gängigen Intensitätskennwert für Kugelstrahlprozesse, jedoch aus oben gegebenen Gründen nicht anhand einer Sättigungskurve.

Dennoch scheinen die gezeigten Kurven geeignet für eine überschlägige Ermittlung einer Intensitätskenngröße, die den Vergleich der dargestellten MHP-Prozesspotentiale zu Kugelstrahlprozessen ermöglicht.

Beispielhaft kann dabei, wie anhand der oberen beiden Abbildungen durch Pfeile dargestellt, für die Parameterkombination  $D=6\text{mm}$  und  $s=f=0,1\text{mm}$  bei Vorliegen eines Schlagdistanzwertes von  $t=0,4\text{mm}$  eine Intensität von etwa  $0,55\text{mm A}$  (MHP) für die Bearbeitung in Längsrichtung beziehungsweise etwas über  $0,35\text{mm A}$  (MHP) für die Bearbeitung in Querrichtung ermittelt werden. Sind für einen Anwender die technologischen Möglichkeiten eines Kugelstrahlprozesses vergleichbarer Intensität bekannt, kann damit die Relation zu einer unter oben genannten Parametern erfolgten MHP-Behandlung gegeben werden.

## 6.5 Zusammenfassung der technologischen Potentiale

Wie anhand des gegenwertigen Kapitels dargestellt, können die aus dem Stand der Technik ableitbaren, technologischen Potentiale der vorliegenden Technologie anhand experimenteller Untersuchungen auch an den betrachteten Materialien gezeigt werden. So kann eine Härtesteigerung an MHP-bearbeiteten Oberflächen nachgewiesen werden, welche sich für die hier betrachteten Werkstoffe (C45E; 1.2379; 1.4313) auch im Falle von bereits thermisch gehärteten Probenoberflächen (untersucht anhand der gehärteten Stahlwerkstoffe C45E und 1.2379) in einem Größenordnungsbereich von etwa 9%-15% des Härteausgangswertes einstellt.

Im Zuge der dargestellten Untersuchungen konnte dabei für die betrachteten Werkstoffe kein globaler Einfluss des primär untersuchten Parameters, der Schlagdistanz  $t$ , gefunden werden. Der maximale Härtewert stellte sich, obgleich der Parameter wie in Kapitel 5.1.1 dargestellt maßgeblichen Einfluss auf das Umformpotential der vorliegenden Technologie nimmt, jeweils materialspezifisch ein. Die höchste Härte ist damit nicht zwangsläufig für eine Maximalausprägung der Schlagdistanz zu finden, so wie es infolge einer erhöhten plastischen Deformation erwartet werden könnte. Zusammenfassend muss hierdurch auf die Forderung nach einer in Bezug auf den jeweils vorliegenden Werkstoff spezifisch durchzuführenden Optimierung des Schlagdistanzwertes verwiesen werden.

Im Gegensatz dazu kann für unterschiedliche, planüberfräste Materialien im Falle einer möglichst optimalen Glättung (mittels MHP-Bearbeitung mit vergleichsweise geringem Einschlagabstand) im Allgemeinen ein geringer Wert der Schlagdistanz  $t$  als vorteilhaft angeführt werden. Diese Aussage muss allerdings für Oberflächen höherer Ausgangsrauheit und für den Fall eines höheren Einschlagabstandes teils relativiert werden, da hier über eine Erhöhung des Schlagdistanzwertes, insbesondere für Werkzeuge geringeren Durchmessers, ein höheres Glättungspotential realisiert werden kann (siehe Kapitel 6.2.2). Eine derartige Erhöhung der Schlagdistanz ist letztlich auch für verhältnismäßig raue Materialien einer hohen Ausgangshärte erforderlich, deren Topographie durch deutlich

ausgeprägte Fräsriefenstrukturen gekennzeichnet ist. Für eine möglichst optimale Glättung dieser Strukturen sollte zudem eine annähernd orthogonale Schlagführung angestrebt sowie ein Vorschubrichtungswinkel  $\varphi \neq 0^\circ$  zwischen MHP- und Fräsvorschubrichtung vorgesehen werden. Durch die dargestellten Untersuchungen konnten damit maßgebliche Einflussparameter für ein möglichst optimales Glättungsergebnis identifiziert werden. Durch eine zweckmäßige Wahl dieser Parameter kann jedoch im Allgemeinen von einem sehr hohen Glättungspotential der vorliegenden Technologie ausgegangen werden.

Ein ähnlich hohes Potential konnte in Kapitel 6.3 auch in Bezug auf die Einbringung von Druckeigenspannungen identifiziert werden. Wie die dargestellten Untersuchungen zeigen, kann bereits nach einer einmaligen MHP-Bearbeitung von deutlich ausgeprägten Druckspannungen ausgegangen werden. Die Beträge der eingebrachten Spannungen zeigen dabei eine deutliche Abhängigkeit zur Vorschubrichtung des MHP-Prozesses (siehe Kapitel 6.3.1). Die Ursache kann hier in der richtungsbezogenen Materialdeformation im Zuge des bahnweisen MHP-Prozesses gefunden werden, welche sich letztlich auch in einer deutlich vorschubrichtungsbezogenen Ausprägung der an MHP-bearbeiteten Oberflächen zu messenden Rauheitskennwerten äußert.

Zusammenfassend kann damit für die vorliegende Technologie ein hohes Glättungspotential gefunden werden, welches mit einer deutlichen Einbringung von Druckeigenspannungen und einer definierten Steigerung der Oberflächenhärte einhergeht. Die anhand der obigen Abschnitte dieses Kapitels dargestellten Untersuchungsergebnisse erlauben dabei eine genauere Abschätzung der erreichbaren Oberflächen- und Materialmodifikation für unterschiedliche Werkstoffe und erlauben die Ableitung optimierter Parametereinstellungen. Um die technologischen Potentiale der betrachteten Technologie auch in Hinblick auf verbreitete Oberflächenverfestigungsverfahren wie dem Kugelstrahlen bewerten zu können, wurde in Kapitel 6.4 die Almenintensität des MHP-Prozesses ermittelt. Dem Kapitel können dabei die Intensitätskennwerte für unterschiedliche Prozessparameterkombinationen einer MHP-Behandlungen entnommen werden.

## 7 Untersuchungen zu erweiterten Anwendungsmöglichkeiten

### 7.1 Funktionelle Oberflächenstrukturierung

#### 7.1.1 Motivation und Untersuchungsansatz

Die gezielte Strukturierung von technischen Oberflächen und deren damit einhergehende Funktionalisierung gewinnt in einer großen Bandbreite von Anwendungsfeldern zunehmend mehr und mehr an Bedeutung. Hierbei liefert oftmals die Natur den Anstoß und dient als Vorbild für das Lösen technischer Problemstellungen. Die Abstraktion und Übertragung derartiger aus der Biologie bekannter Vorbilder auf technische Lösungsansätze prägte dabei den Begriff „*Bionik*“. In VID 6221 [59] wird ein Überblick funktionaler, bionischer Oberflächen gegeben, deren Eigenschaften von der Reibungsreduzierung innerhalb körpernaher Grenzschichten in der Fluidodynamik (Riblet- oder Haifischhaut-Effekt) über die Optimierung von Festkörperreibung bis hin zur Erzeugung selbst oder leicht zu reinigender Oberflächen mit hydrophoben Eigenschaften (Lotus Effekt<sup>®</sup>) reichen. Obwohl neben der Oberflächenstrukturierung auch die mechanischen Werkstoffeigenschaften für die optimale Umsetzung derartiger Effekte nicht außeracht gelassen werden dürfen, kann dennoch die Forderung nach neuen, kostengünstigen Lösungsansätzen zur gezielten Gestaltung der Oberflächentopographie auch großflächiger metallischer Bauteile abgeleitet werden.

Anhand der im Zuge dieses Kapitels erläuterten Untersuchungen soll analysiert werden, ob die Technologie des Schlagverdichtens unter Verwendung von funktionell formgestalteten Werkzeugspitzen die Möglichkeit bietet, eine gezielte Oberflächenstrukturierung im Mikrobereich zu erzeugen.

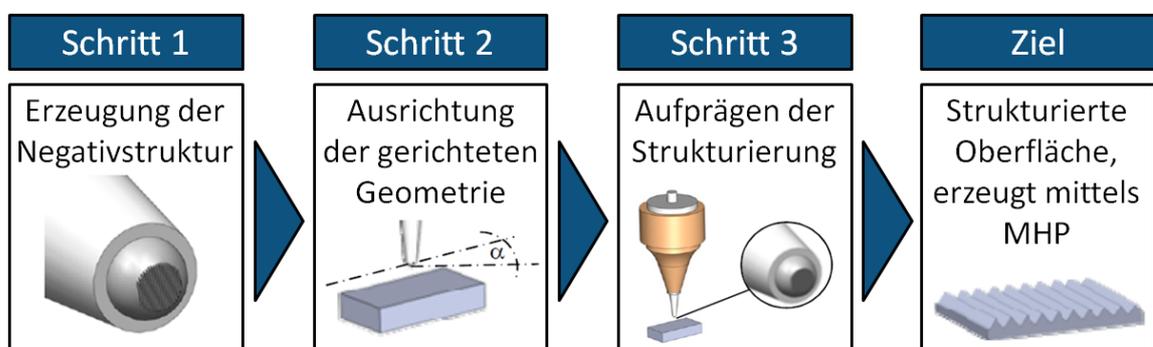


Abbildung 73: Ansatz zur gezielten Strukturierung von Oberflächen (vgl. [60])

Abbildung 73 zeigt den dabei gewählten Ansatz, im Zuge dessen zunächst die Negativform der letztlich am Werkstück zu erstellenden Struktur auf der Hartmetallkugelspitze des Schlagwerkzeugs erzeugt wird. Durch die Verwendung des so präparierten Werkzeugs soll die Geometrie in weiterer Folge durch die gezielten Schläge im Zuge des MHP-Prozesses auf die Werkstückoberfläche übertragen (aufgeprägt) werden.

Neben der funktionellen Eignung des dargestellten Ansatzes soll zudem insbesondere die Möglichkeit der Strukturierung größerer sowie unebener Oberflächen untersucht werden. Des Weiteren muss geklärt werden, ob durch die Anwendung des angestrebten Verfahrens auch eine über den Einzeleinschlag hinausgehende, fortlaufende Erzeugung zusammenhängender Strukturierungen gewährleistet werden kann. In einem solchen Fall soll das Werkzeug vor der Bearbeitung, wie in Abbildung 73 unter Schritt 2 dargestellt, zunächst in Richtung der Vorschubgeschwindigkeit des Bearbeitungsprozesses ausgerichtet werden, um eine einzeleinschlagübergreifende Struktur auf der Werkstückoberfläche zu erstellen (siehe Kapitel 7.1.4).

### **7.1.2 Untersuchung der funktionellen Eignung**

Um die grundsätzliche Eignung der Methode zu prüfen, wurde in einem ersten Schritt versucht, eine definierte Struktur mit verhältnismäßig großzügigen Abmaßen auf der Oberfläche einer Probe zu erzeugen. Als Versuchsgeometrie wurde hierfür ein gleichschenkliges Dreieck mit einer angestrebten Seitenlänge von 0,2mm gewählt.

Für die zweckmäßige Gestaltung der Halbkugelspitze des Schlagwerkzeugs aus Vollhartmetall (K40FF) mit 88% Wolframkarbid (WC) und 12% Kobalt (Co) Anteil wurden gängige Fertigungsverfahren in Betracht gezogen, welche sich für die Erstellung möglichst feiner Kavitäten eignen. Im Speziellen wurden dabei die Technologie des 3D-Laserabtrags, das Mikro-EDM (Electric Discharge Machining)-Verfahren sowie die am Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik zur Verfügung stehende  $\mu$ PECM-Technologie (Elektrochemisches Mikroerodieren mit ultrakurzen Spannungspulsen) analysiert.

Das  $\mu$ PECM-Verfahren zeigt dabei grundsätzlich ein hohes Potential in Hinblick auf die Erstellung äußerst feiner, hochpräziser Kavitäten. Der Materialabtrag beruht, wie auch bei anderen elektrochemischen Abtragverfahren, auf der anodischen Auflösung des Werkstückmaterials aufgrund von Ladungsaustauschvorgängen während einer Elektrolyse. Durch die Verwendung von Spannungspulsen mit einer Dauer im Bereich von einigen Nanosekunden kann der Arbeitsspalt zwischen dem kathodischen Elektroden-Werkzeug und dem anodischen Werkstück sehr gering

gehalten werden ( $<1\mu\text{m}$ ), wodurch sich eine hohe Fertigungspräzision ergibt (vgl. [61]). Die Bearbeitung von hartmetallischen Werkstoffen wurde jedoch zum Zeitpunkt der Analyse als äußerst problematisch bewertet, da kein Elektrolyt gefunden werden konnte, der mit ausreichender Sicherheit sowohl den WC-Hartstoff als auch das Bindemetall Kobalt des zu strukturierenden Werkzeugs in gleichem Maße lösen würde.

Im Gegensatz dazu konnte die Technologie des 3D-Laserabtrags grundsätzlich für den Abtrag schwierig zu bearbeitender Werkstoffe in Betracht gezogen werden. Der Abtrag basiert hier auf der Umsetzung der elektromagnetischen Energie eines Laserstrahls (Laserpuls) in Wärme, wodurch es zu einem Schmelz- bzw. Sublimationsabtrag kommt. Für den Formabtrag von geometrisch bestimmten Strukturen, welcher im Falle der Verwendung gepulster Festkörperlaser als Sublimationsabtrag bezeichnet wird, kommen in der industriellen Anwendung heute üblicherweise gepulste Nd:YAG-Laser mit Pulsdauern von wenigen 100ns und Leistungen bis zu einigen 100W zum Einsatz (vgl. [62] S.264ff, [63] S.25). Eine derartige Anlage des Typs DML 40 SI wurde in Hinblick auf deren Eignung für die zweckmäßige Gestaltung von Schlagwerkzeugen näher betrachtet. Die Maschine stellt durch einen gütegeschalteten (Q-Switch) Nd:YAG-Festkörperlaser mit Durchschnittsleistung von mindestens 100W fokussierte Laserpulse mit Fokusedurchmesser von ca.  $30\mu\text{m}$  und einer minimalen Pulsdauer von 90ns (Pulsfrequenzbereich von 4 bis 30kHz) zur Verfügung (vgl. [64], [65]). Diese Pulse können im Zuge eines schreibenden Abtragverfahrens, welches eine schichtweise Kavitätserstellung durch sukzessiven Flächenabtrag mit bahweise aneinandergereihten Laserpulsen bezeichnet, für die Strukturierung des Bauteils genutzt werden. Dadurch kann zur Gänze auf Elektroden verzichtet werden, wodurch sich für die durchzuführende MHP-Werkzeuggestaltung eine Vielzahl an Variationsmöglichkeiten ergeben würde. Es ist allerdings bekannt, dass aufgrund des Beugungslimits des fokussierten Laserstrahls bei Strukturen mit hohem Aspektverhältnis (Verhältnis der Strukturtiefe zu deren Breite) und kleinen Kavitäten Probleme auftreten können (vgl. [66] S.1).

Im Vergleich dazu zeichnet sich das dritte in Betracht gezogene Bearbeitungsverfahren, die funkenerosive Mikrobearbeitung neben höheren Abtragraten durch ein weitaus höheres zu erreichendes Aspektverhältnis aus (vgl. [67]). Zudem ist der Prozess, solange das Werkstückmaterial elektrisch leitfähig ist, weitgehend vom zu bearbeiteten Material unabhängig und gilt insbesondere für die Bearbeitung von WC-Co-Hartmetallen als bestens geeignet (vgl. [68]). Diese spezielle Eignung, in Kombination mit der Möglichkeit der Erstellung feinsten Kavitäten mit hohem Aspektverhältnis, welches insbesondere für die Erstellung des

in Kapitel 7.1.4 beschriebenen Werkzeugs ein wesentliches Kriterium darstellt, bot die Grundlage für die Wahl dieses Fertigungsverfahrens für die Formgestaltung der im Zuge der Versuche zu erstellenden Werkzeuge.

Die verwendete 3D-Mikro-EDM-Maschine SX-200 (SARIX) ist in Abbildung 74a dargestellt und bietet zum einen die Möglichkeit der Mikrobahnerosion und zum anderen können Kavitäten mittels Senken abgerichteter Elektroden erstellt werden. Bei der Mikrobahnerosion, welche für die Erstellung des in Kapitel 7.1.4 dargestellten MHP-Werkzeugs zum Einsatz kam, wird das Material NC-gestützt ebenwise in einzelnen Bahnen durch eine rotierende, zylindrische Elektrode abgetragen. Dadurch können komplexe Strukturen mit geometrisch einfachen und standardisierten Elektroden hergestellt werden (siehe Abbildung 74b oben) (vgl. [67]).

Für die Erstellung des Stößels mit dreieckförmiger Kavität, welche zunächst zwecks Überprüfung der funktionellen Eignung angestrebt wurde, wurde die Möglichkeit des funkenerosiven Senkens genutzt. Ausgangspunkt für die Werkzeugherstellung bildete ein MHP-Werkzeug mit Halbkugelspitze des Durchmessers  $D=5\text{mm}$ , welche zunächst plan abgerichtet wurde. Auf diese Weise wurde auf der Spitze eine kreisförmige, plane Fläche mit einem Durchmesser von etwa  $0,6\text{mm}$  erzeugt.

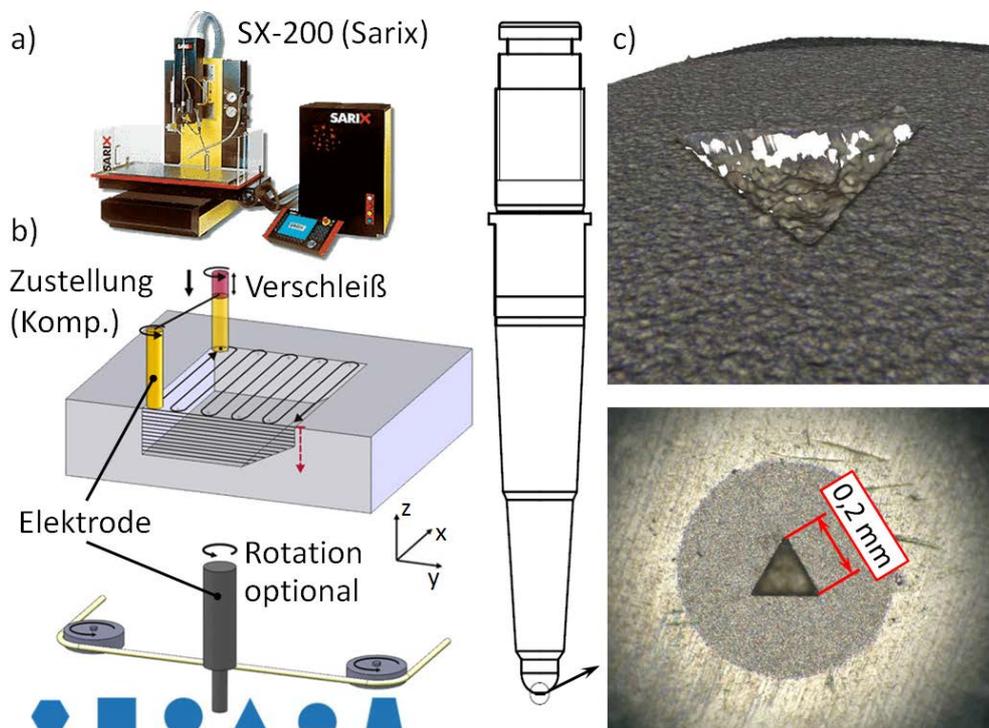


Abbildung 74: Werkzeuggestaltung mittels Mikro-EDM-Verfahren: a) SX-200 (Sarix) b) Illustration der EDM-Mikrobahnerosion (oben), Elektrodenabrichteprozess (unten) (vgl. [69]) c) Formgestaltete MHP-Werkzeugspitze

In einem nächsten Schritt wurde eine geeignete dreieckförmige Elektrode generiert. Dabei wird, wie in Abbildung 74b unten dargestellt, durch Zustellung eines Stabelektrodenrohlings in Richtung eines negativ gepolten Drahtes, der durch diese Polung im Zuge des Abrichtprozesses als Werkzeug dient, ein definierter Abtrag an der Elektrode erzeugt. Durch die Verwendung unterschiedlicher Zustellstrategien (mit bzw. ohne Rotation der Elektrode) können dabei neben einem dreieckigen Querschnitt auch weitere, unterschiedliche Elektrodenquerschnitte erzeugt werden.

Die abgerichtete Elektrode wurde in der Mitte der planen Spitzenfläche bis auf eine Tiefe von  $30\mu\text{m}$  in das MHP-Werkzeug gesenkt. Abbildung 74c zeigt die resultierende Werkzeuggeometrie anhand einer InfiniteFocus (Alicona)-Topographiemessung (oben) und einer mittels 20-facher Vergrößerung erstellten SMZ 1500 (Nikon)-Mikroskopaufnahme (unten).

Der so formgestaltete Stößel wurde im Zuge des Versuchs für die Bearbeitung einer AlMgSi 0,5 (3.3206) Probe eingesetzt. Einzelne Versuchsfelder wurden dabei bearbeitet und das Strukturierungsergebnis unter der Verwendung eines Stereomikroskops SMZ 1500 (Nikon) bewertet. Nach einigen Einstellungsvariationen ließ sich unter der Verwendung des in Tabelle 28 gegebenen Parametersatzes ein deutliches Strukturierungsergebnis erzielen, welches in Abbildung 75 dargestellt ist.

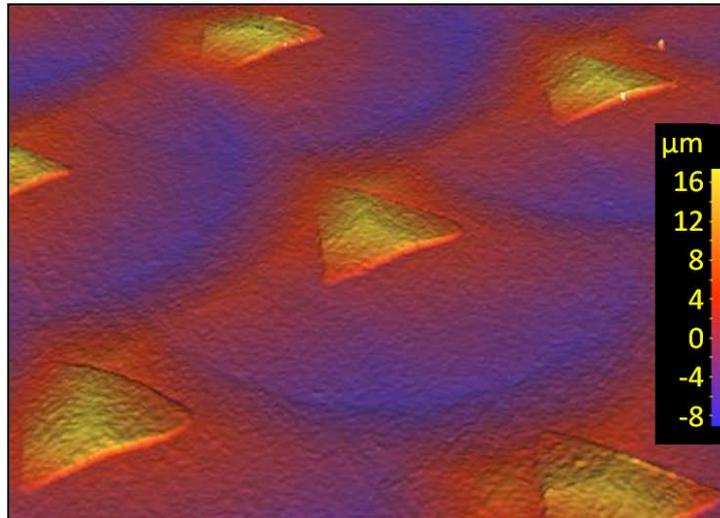
Die Abbildung zeigt die resultierende Werkstückoberfläche anhand einer, mittels 20-fach Objektiv erstellten IFM-Oberflächentopographiemessung. Die erzeugten Dreieckstrukturen sind hierbei deutlich zu erkennen und weisen eine maximale Höhe von etwas mehr als  $10\mu\text{m}$  auf. Der Abstand zwischen den einzelnen Dreiecken wurde mit etwa  $500\mu\text{m}$  gemessen und entspricht damit dem durch Vorschub und Frequenz bestimmten Abstand zwischen den Einzeleinschlägen in Vorschubrichtung (Distanzwert  $f$ ). Normal auf diese definiert der mit  $0,5\text{mm}$  gewählte Bahnversatz den Abstand der erzeugten Dreiecke, deren Öffnungswinkel sowie Seitenlänge sowohl an der Werkstückoberfläche als auch am Werkzeug bestimmt wurden.

*Tabelle 28: Parametersatz für die Strukturierung*

Parameter	Einheit	Wert
Durchmesser $D$	mm	5mm (strukturiert)
Bahnabstand $s$	mm	0,5
Frequenz $F$	Hz	200
Vorschubgeschwindigkeit $v$	mm/min	6000
Abstand zw. den Einzeleinschlägen $f$	mm	0,5

Erläuterung der Prozessparameter siehe Kapitel 4.2.

### InfiniteFocus-Messdatensatz



### Distanzmessung zwischen zwei Strukturen

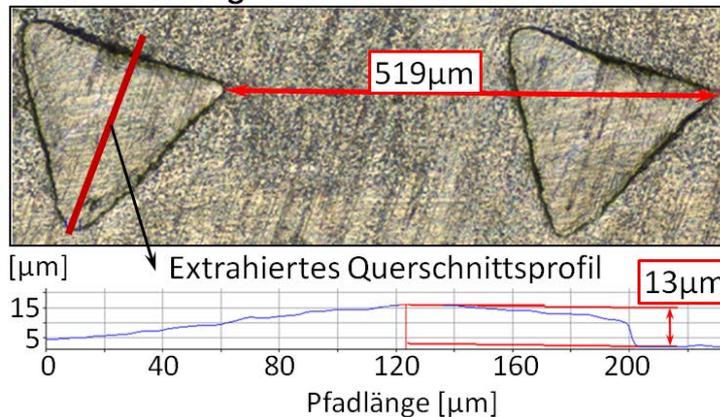


Abbildung 75: Oberflächentopographie nach der Strukturierung mit Dreieck-Werkzeugschneide (vgl. [37])

Die Geometriemerkmale können dabei in beiden Fällen als gleich angesehen werden, wodurch die genaue Übertragung der Negativkontur des Stößels auf die Werkstückoberfläche gezeigt werden kann.

Damit konnte im Zuge der Untersuchung gezeigt werden, dass die grundsätzliche Möglichkeit der Strukturierung metallischer Werkstückoberflächen unter Nutzung formgestalteter MHP-Werkzeuge besteht. Zudem konnte im Zuge einer Analyse unterschiedlicher technologischer Möglichkeiten das Mikro-EDM-Verfahren als geeignetes Fertigungsverfahren für die zweckmäßige Strukturierung von Schlagwerkzeugen aus Vollhartmetall identifiziert werden.

Aus diesem Grund wurde die Mikro-EDM-Technologie auch für die Generierung der Werkzeuge der Folgeuntersuchungen eingesetzt, wobei hierbei zunächst die Möglichkeiten der Erzeugung deutlich feinerer Strukturierungen betrachtet werden soll.

### 7.1.3 Erzeugung von Mikrostrukturierungen

Um die Möglichkeit der Erzeugung kleinster Strukturen zu erproben, wurde eine Elektrode des geringsten, kommerziell erhältlichen Durchmessers von  $40\mu\text{m}$  genutzt, um die Spitze eines MHP-Werkzeugs zu gestalten. Hierfür wurde zunächst die Halbkugelspitze eines Stößels mit acht Millimeter Kugelspitze plan abgetragen. Mittels funkenerosivem Senken wurde in weiterer Folge ein quadratisches Feld zylindrischer Kavitäten (Bohrungen) auf der nach dem Abrichten resultierenden ebenen Fläche erstellt. Wie in Abbildung 76 dargestellt, welche das Ergebnis der Werkzeugerstellung anhand von Messungen des InfiniteFocus (Alicona) Messsystems und einer SMZ 1500 (Nikon) Mikroskopaufnahme zeigt, konnten dabei Kavitäten eines Durchmessers von etwas über  $40\mu\text{m}$  in einem jeweiligen Abstand von etwa  $60\mu\text{m}$  erstellt werden. Die Tiefe dieser erodierten Einzellöcher konnte anhand eines extrahierten Schnittprofils mit etwa  $55\mu\text{m}$  bestimmt werden.

Dieses formgestaltete Werkzeug wurde im Zuge der Untersuchung für die Bearbeitung von Versuchsfeldern (Abmessungen:  $25\times 15\text{mm}$ ) auf einer Probe des Werkstoffs AlMgSi 0,5 eingesetzt. Das hierdurch jeweils erzeugte Strukturierungsergebnis wurde mittels Stereomikroskop SMZ 1500 (Nikon) bewertet. Dabei wurden die Prozessparameter, welche in Tabelle 30 gegeben sind, fortlaufend angepasst und optimiert. Bei der Erstellung der ersten Felder wurde zudem versucht, den Strukturierungsprozess durch einen PTFE-Trockenschmierstoff (Loctite 8192) zu unterstützen, welcher vor der eigentlichen Strukturierung auf die für die Bearbeitung vorgesehene Oberfläche aufgebracht wurde.

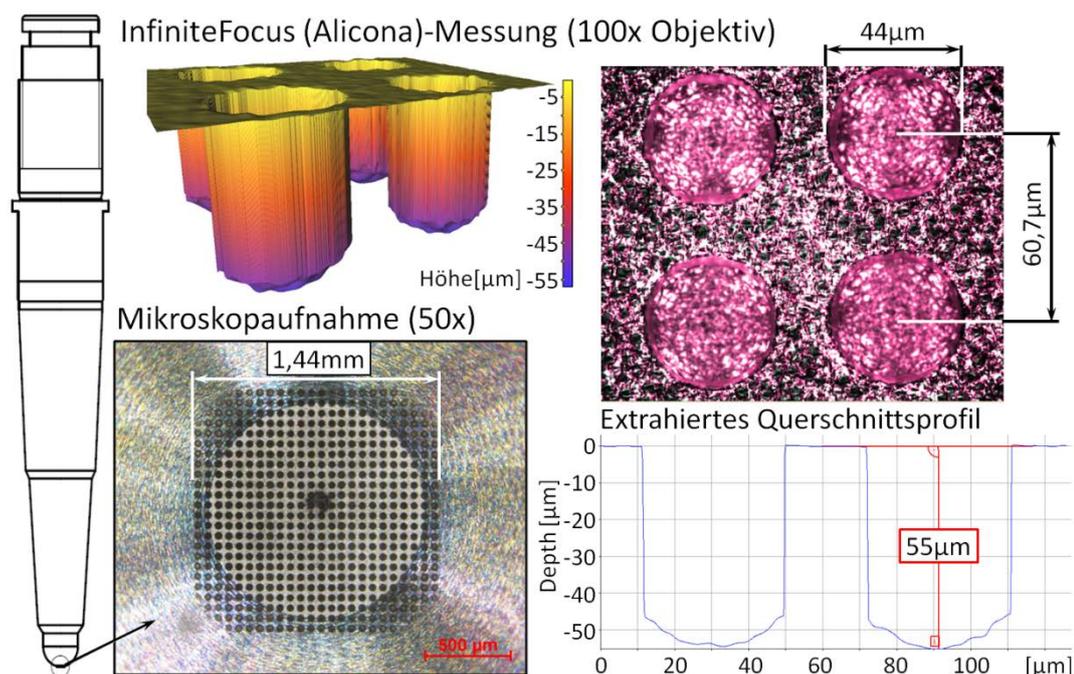


Abbildung 76: Werkzeug für die Erstellung von Mikrostrukturierungen (vgl. [37])

Tabelle 29: MHP-Parameter für das Mikrostrukturieren

MHP-Parameter	s [mm]	t [mm]	F [Hz]	I [%]	v [mm/min]
Versuchsfeld 1	0,4	0,4	200	100	4800
Versuchsfeld 2	1	0,4	200	100	7200
Versuchsfeld 3	1	0,3	100	90	6000
Versuchsfeld 4	1	0,2	100	100	6000
Versuchsfeld 5	1	0,3	100	100	6000
Versuchsfeld 6	1	0,8	200	100	7200
Versuchsfeld 7	1	0,8	150	100	7200

Erläuterung der MHP-Parameter siehe Kapitel 4.2.

Wie jedoch anhand von Abbildung 77 gezeigt, führte dieses Vorgehen zu einem deutlichen Verkleben (Verstopfen) der auf dem Stößel aufgetragenen Strukturen. Die Verunreinigungen führten dabei in naheliegender Weise auch zu einer deutlichen Beeinflussung des Strukturierungsergebnisses. Aus diesem Grund wurde letztlich auf die Anwendung von Schmierstoff verzichtet, wodurch die Problematik des Verstopfens der Stößelstruktur deutlich gemindert werden konnte, jedoch nicht komplett zu unterbinden war.

Durch die fortlaufende Anpassung der Prozessparameter (siehe Tabelle 30), wie einer Erhöhung der Schlagenergie durch eine Steigerung der Schlagdistanz  $t$ , konnte letztlich ein deutliches Strukturierungsergebnis auf der behandelten Oberfläche des untersuchten Aluminiumwerkstoffs erreicht werden.

### Verstopfen der auf den Stößel aufgetragenen Strukturen (SMZ 1500)

Nach der Bearbeitung der Oberfläche mit aufgetragenem Trockenschmierstoff



Nach Reinigung in Ultraschallbad (Wasser mit 2% EM-80; 10min)

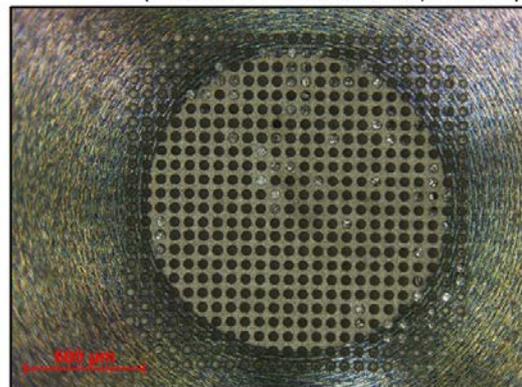


Abbildung 77: Verstopfen der Stößelstruktur durch Verwendung von Trockenschmierstoff

### Strukturierungsergebnis zweier Versuchsfelder (SMZ 1500 Mikroskop)

Versuchsfeld 6 in 40-facher Vergrößerung    Versuchsfeld 7 in 30-facher Vergrößerung

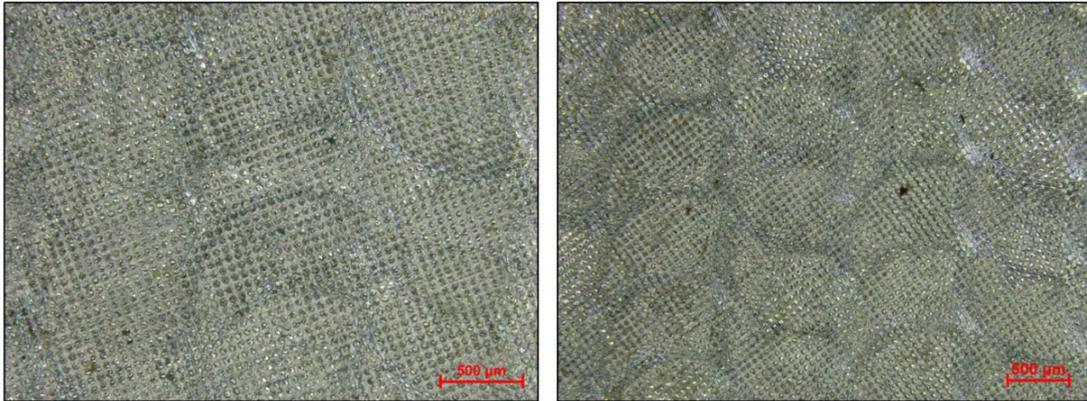


Abbildung 78: Flächendeckende Strukturierung durch Erhöhung der Schlagdistanz

Die behandelte Oberfläche ist dabei, wie in Abbildung 78 gezeigt, flächendeckend mit zapfenförmigen Materialerhebungen überzogen. An den dargestellten Feldern wurden auch die Dimensionen der aufgetragenen Strukturen mittels InfiniteFocus-Messungen (erstellt in der Mitte des Versuchsfeldes) bestimmt. Die messtechnische Erfassung der Strukturdimensionen ist am Beispiel des Versuchsfeldes 6 in Abbildung 79 dargestellt. Wie die Abbildung zeigt, konnte der Durchmesser der auf der Werkzeugspitze erzeugten Bohrungen von etwa  $40\mu\text{m}$  (siehe Abbildung 76) direkt auf die zylindrischen Zapfenstrukturen übertragen werden. Die an der Oberflächenstrukturierung gemessene, maximale Zapfenhöhe liegt mit etwa  $20\mu\text{m}$  jedoch deutlich unter der auf dem Stößel realisierten Lochtiefe von  $\sim 50\mu\text{m}$ . Diese Abweichung zeigt, dass die Lochstrukturen des Werkzeugs nicht zur Gänze auf die Oberfläche abgeprägt werden konnten.

Um zu prüfen, ob dieser Effekt in eindeutiger Weise auf ein sukzessives Verstopfen der Werkzeugstruktur zurückgeführt werden kann, wurden die Dimensionen der erzeugten Strukturen in der Mitte der ersten sowie letzten Bearbeitungsbahn ermittelt und einander gegenübergestellt. Im Zuge dieses Vergleichs konnte jedoch keine eindeutige Veränderung des Strukturierungsergebnisses erkannt werden, welche auf eine fortlaufende Verstopfung des strukturierenden Werkzeugs im Zuge der Bearbeitung hindeuten würde.

Es sei zudem angemerkt, dass die in Abbildung 79 dargestellte Zapfenstruktur in etwa eine mittlere Ausprägung der auf der Oberfläche erzeugten Erhebungen repräsentiert, welche an der Mehrheit der erzeugten Strukturen gemessen werden kann. Es können jedoch sowohl am Feldanfang als auch an dessen Ende teils deutlich besser beziehungsweise weniger deutlich ausgeprägte Zylinderstrukturen gefunden werden.

### Auswertung Strukturierungsergebnis (Versuchsfeld 6)

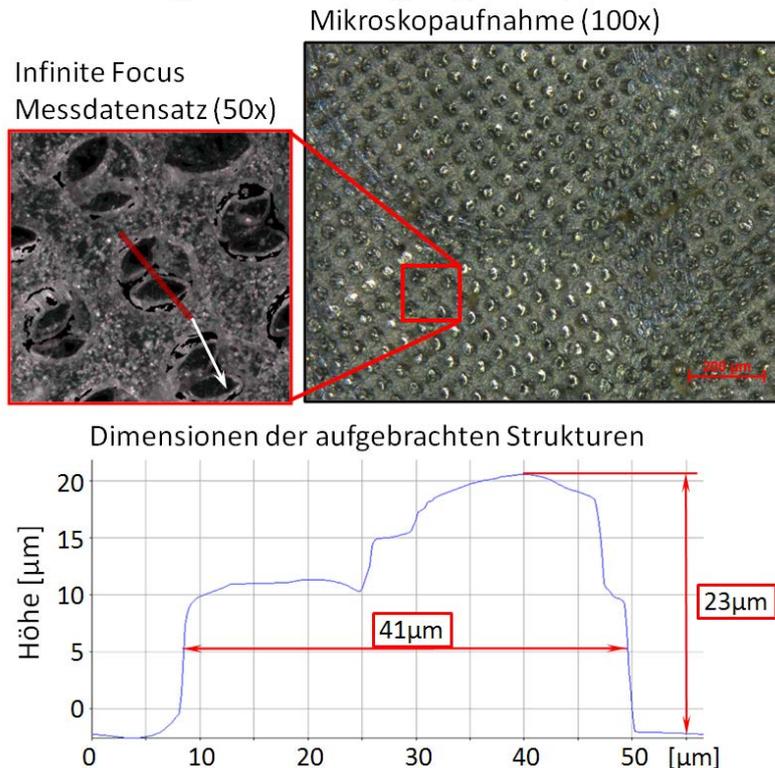


Abbildung 79: Erfassung der Strukturdimensionen für das Versuchsfeld 6 (vgl. [37])

Wie anhand der Untersuchung gezeigt werden konnte, ist die Umsetzung eines definierten Strukturierungsergebnisses auch für feine Strukturen auf dem untersuchten Aluminiumlegierungswerkstoff grundsätzlich möglich. Die Problematik des Verklebens der abgeschlossenen Lochstrukturen auf dem eingesetzten Werkzeug ist jedoch in Hinblick auf eine etwaige industrielle Anwendung kritisch zu bewerten.

Obgleich dieser Effekt deutlich durch den Verzicht auf Schmiermittel gemindert werden konnte, wurde auch im Zuge der letzten beiden Versuchsfelder ein teilweises Auffüllen der Bohrungen durch Werkstückmaterial beobachtet. Aufgrund dieser Tatsache ist eine wirtschaftliche Strukturierung großflächiger Bauteile in Bezug auf die Aufrechterhaltung der Einsatzfähigkeit des strukturierenden Werkzeugs mit Herausforderungen verbunden.

Für weiterführende Untersuchungen wurde aus diesem Grund von geschlossenen Strukturen abgegangen und auch die Übertragbarkeit der mit dem vorliegenden Werkzeug für die untersuchte Aluminiumlegierung gezeigten Ergebnisse auf andere Werkstückmaterialien nicht näher beleuchtet. Eine derartige Betrachtung soll jedoch anhand der im Folgenden dargestellten Untersuchung zur Erzeugung zusammenhängender Strukturen erfolgen.

### 7.1.4 Erzeugung zusammenhängender Strukturen

Anhand der im Folgenden beschriebenen, experimentellen Untersuchungen soll die Möglichkeit der Erstellung schlagabdruckübergreifender Strukturen analysiert werden. Es wird hierbei versucht, eine rippenförmige Struktur auf der Werkstückoberfläche zu erstellen. Die einzelnen Rippen sollen dabei über die gesamte Strukturierungsfläche miteinander verbunden sein.

Wie auch bei den vorangegangenen Untersuchungen wurde für die Generierung eines hierfür geeignet erscheinenden MHP-Werkzeugs die Mikro-EDM-Technologie genutzt. Auf einem Stößel mit Spitzenkugeldurchmesser von acht Millimeter wurden nach dem Abrichten einer ebenen Fläche (Flächendurchmesser 1,34mm) einzelne Nuten erzeugt.

Abbildung 80 zeigt die Spitze des formgestalteten Werkzeugs und gibt anhand einer Oberflächenmessung des InfiniteFocus-Messsystems die Dimensionen der erzeugten Struktur wieder. Die einzelnen Nuten einer Tiefe von etwa  $70\mu\text{m}$  haben dabei einen jeweiligen Abstand von etwa  $150\mu\text{m}$  zueinander und wurden mittels einer Elektrode eines Durchmessers von  $40\mu\text{m}$  erstellt.

Als Probenwerkstoff wurde für erste Versuche zunächst wieder auf die Aluminiumlegierung AlMgSi 0,5 zurückgegriffen. Die Wahl wurde dabei in Bezug darauf getroffen, dass auf diesem Werkstoff in den vorangegangenen Untersuchungen bereits deutliche Strukturierungsergebnisse realisiert werden konnten. Da im Zuge der Versuche zusammenhängende Stege auf der Oberfläche erzeugt werden sollten, mussten die auf dem Werkzeug aufgetragenen Nuten in Richtung des späteren MHP-Vorschubs ausgerichtet werden.

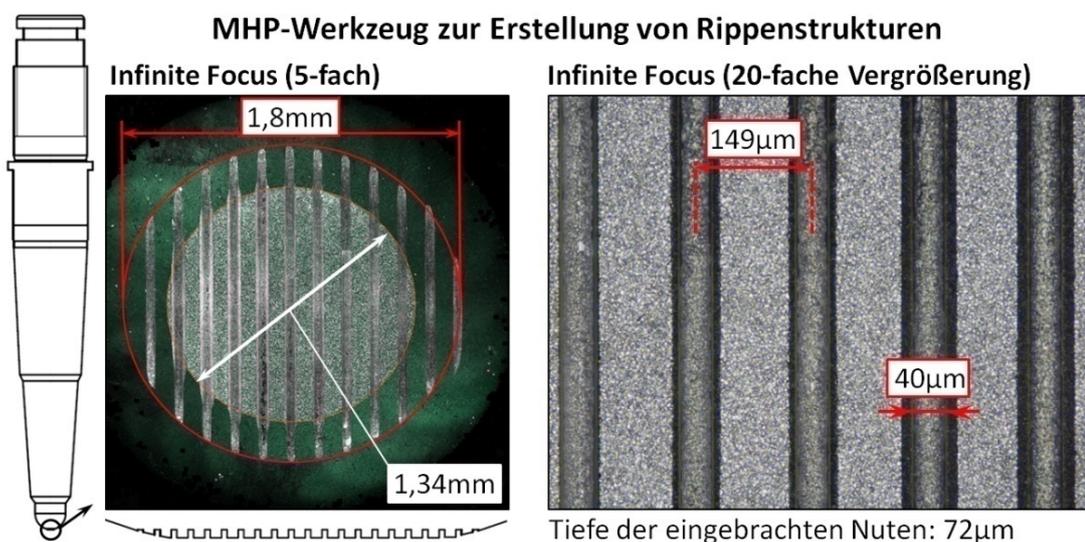


Abbildung 80: Werkzeugspitze mit aufgetragenen Nuten

Dabei wurde der MHP-Aktuator mittels einer Spannzange in der SK40-Aufnahme der Maschinenspindel des verwendeten Bearbeitungszentrums VF3 (HAAS) gespannt. Aufgrund der Tatsache, dass diese Maschine keine Möglichkeit bietet die Spindel während der Bearbeitung gegen Verdrehung zu sperren, wurde der Aktuator zusätzlich durch zwei, mit Muttern gekonterte Schrauben gegen den Spindelkasten verspannt. Bevor dabei die maximale Spannkraft aufgebracht wurde, konnte der Aktuator noch fein ausgerichtet werden. Mittels einer Lupe wurde hierbei versucht, die genaue Richtung der Nuten zu bestimmen und diese mit der späteren Verfahrbewegungsrichtung in Übereinstimmung zu bringen.

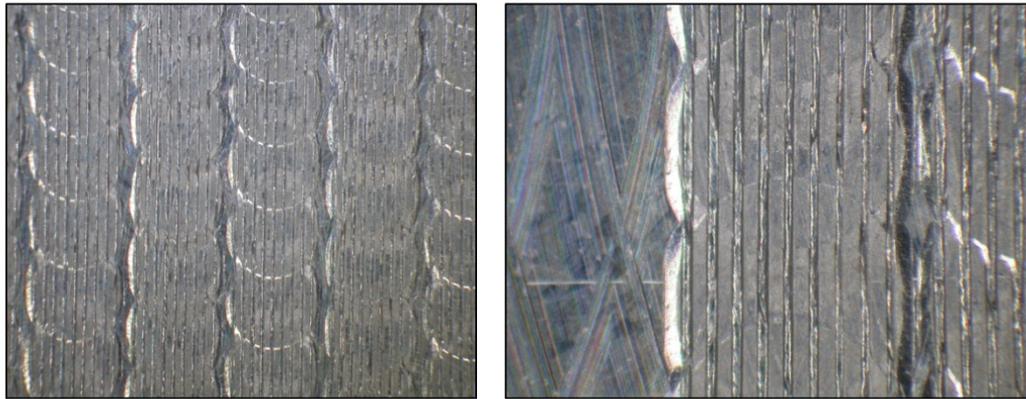
Mit dem so ausgerichteten und gegen Verdrehung fixierten Werkzeug wurden unter Verwendung der in Tabelle 30 gelisteten Parametersätze Versuchsfelder (Länge=25mm, Breite=15mm) auf der Oberfläche der Probe bearbeitet. Zwischen den einzelnen Versuchen wurde die jeweils erzeugte Strukturierung durch die Betrachtung im Mikroskop bewertet, um die Parameter des Strukturierungsprozesses fortlaufend zu optimieren. Wie anhand der Tabelle ersichtlich ist, wurde zunächst ein Bahnabstand von  $s=1,5\text{mm}$  gewählt und auch der Abstand zwischen den einzelnen Schlägen in Vorschubrichtung (Distanzwert  $f$ ) durch die zweckmäßige Wahl von Schlagfrequenz und Vorschubgeschwindigkeit auf diesen Wert gesetzt. Durch die Vorgabe dieser Parameter wurde versucht, die einzelnen Einschläge (beziehungsweise deren plastische Abdrücke auf der Oberfläche) in jenem Bereich zu überlappen, in welchem die auf dem Stößel aufgebrachten Nuten in der kugeligen, ursprünglichen Werkzeugform auslaufen (siehe Abbildung 80, Durchmesser des gesamten Nutenbereichs 1,8mm; Auslaufen der Nuten in der kugeligen Werkzeugform ab einem Durchmesser von 1,34mm).

*Tabelle 30: MHP-Parameter der Strukturierungsversuche zur Erstellung zusammenhängender Strukturen auf AlMgSi 0,5*

<b>MHP-Parameter</b>	<b>s [mm]</b>	<b>f [mm]</b>	<b>F [Hz]</b>	<b>v [mm/min]</b>	<b>l [%]</b>	<b>t [mm]</b>
Versuchsfeld 1	1,5	1,5	100	9000	100	0,1
Versuchsfeld 2	1,5	1,5	100	9000	100	0,2
Versuchsfeld 3	1,5	1,5	100	9000	100	0,3
Versuchsfeld 4	1,5	1,5	100	9000	80	0,2
Versuchsfeld 5	0,7	1,5	100	9000	80	0,2
Versuchsfeld 6	0,7	1,5	100	9000	100	0,2
Versuchsfeld 7	0,7	0,7	200	8400	80	0,25
Versuchsfeld 8	0,7	0,7	200	8400	90	0,2

Erläuterung der MHP-Parameter siehe Kapitel 4.2.

### Betrachtung des zweiten Versuchsfeldes ( $s=f=1,5\text{mm}$ )



Feldmitte (15-fache Vergrößerung)

Feldrand (40-fache Vergrößerung)

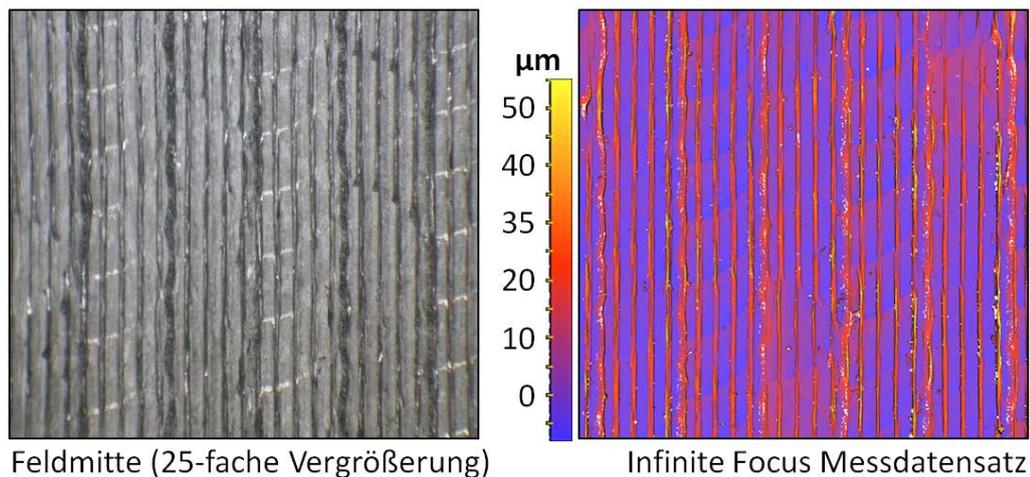
Abbildung 81: Strukturierungsergebnis des zweiten Versuchsfeldes (AlMgSi 0,5)

Wie anhand von Abbildung 81 mittels zweier Aufnahmen der Oberfläche des zweiten Versuchsfeldes dargestellt, konnte hierdurch auch eine deutliche Strukturierung des untersuchten Aluminiumlegierungswerkstoffes erreicht werden. Die im Zuge der Bearbeitung erzeugten Stege schließen dabei, wie insbesondere anhand der Aufnahme in 40-facher Vergrößerung zu erkennen, im jeweiligen Übergangsbereich der Einschlagabdrücke nahtlos aneinander an. Durch die ob des hohen Bahnversatzwertes bedingte, deutliche Abgrenzung der einzelnen Bearbeitungsbahnen zueinander, wird jedoch das Gesamtbild des Strukturierungsergebnisses durch ausgeprägte Übergangsbereiche zwischen den jeweiligen Bahnen beeinträchtigt.

Aus diesem Grund wurde durch eine Reduzierung der Einschlagabstände (zunächst ab Versuchsfeld 5 über eine Reduzierung des Bahnversatzes  $s$ , ab Feld 7 zusätzlich über eine Reduzierung des Distanzwertes  $f$ ) versucht, das Strukturierungsergebnis zu vereinheitlichen.

Abbildung 82 stellt am Beispiel des siebenten Versuchsfeldes das Ergebnis dieser Bemühungen dar, wobei durch die Reduktion der Einschlagabstände eine flächendeckende und weitgehend einheitliche Strukturierung erzeugt werden konnte. Die Abgrenzung der einzelnen Bahnen ist dabei nach wie vor erkennbar. Die Übergangsbereiche beeinträchtigen allerdings das Gesamtbild in geringerem Maße. Dies wird besonders anhand der Falschfarbendarstellung des gezeigten InfiniteFocus-Messdatensatzes ersichtlich.

### Betrachtung des siebenten Versuchsfeldes ( $s=f=0,7\text{mm}$ )



Feldmitte (25-fache Vergrößerung)

Infinite Focus Messdatensatz

Abbildung 82: Strukturierte Oberfläche des siebten Versuchsfeldes: Mikroskopaufnahme und IFM-Messung illustriert in Falschfarben

Für das hier gezeigte Versuchsfeld (Feld 7) wurden zudem, wie in Abbildung 83 dargestellt, die Abmessungen der auf der Oberfläche erzeugten Strukturen anhand eines Profilschnittes normal zu den Rippen ermittelt. Das für die Bewertung herangezogene Profil wurde dabei auf Basis einer InfiniteFocus-Messung mittels eines Objektivs 20-facher Vergrößerung extrahiert.

Es ist ersichtlich, dass sowohl der Rippenabstand als auch zum größten Teil die Rippenbreite (einzelne Rippen sind hier breiter) sehr gut vom Werkzeug auf die Werkstückoberfläche übertragen werden konnten (vergleiche Abbildung 80).

### Oberflächentopographiemessung des Versuchsfeldes sieben

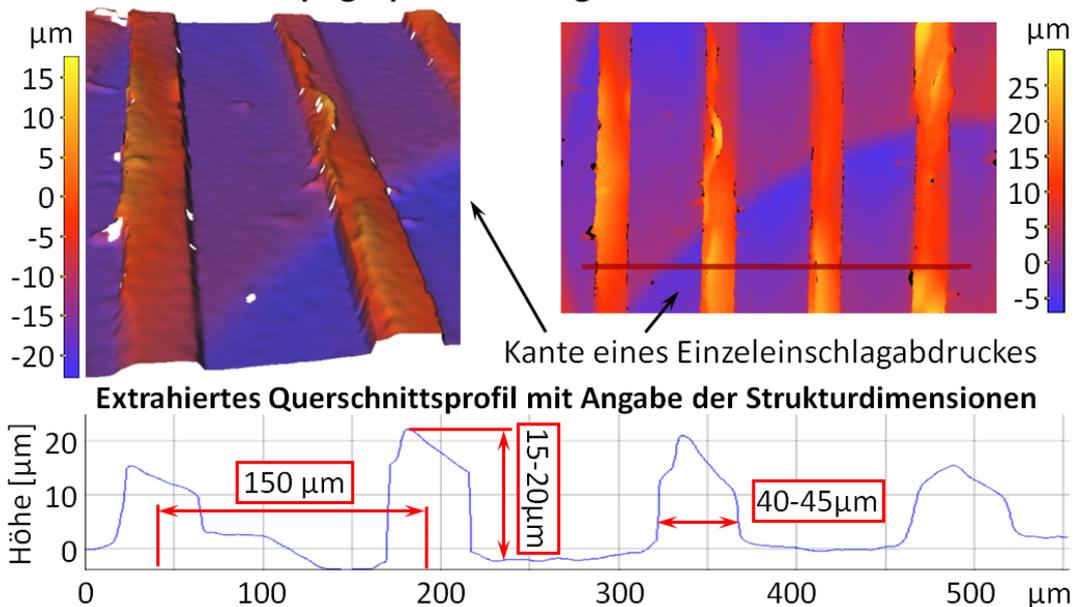
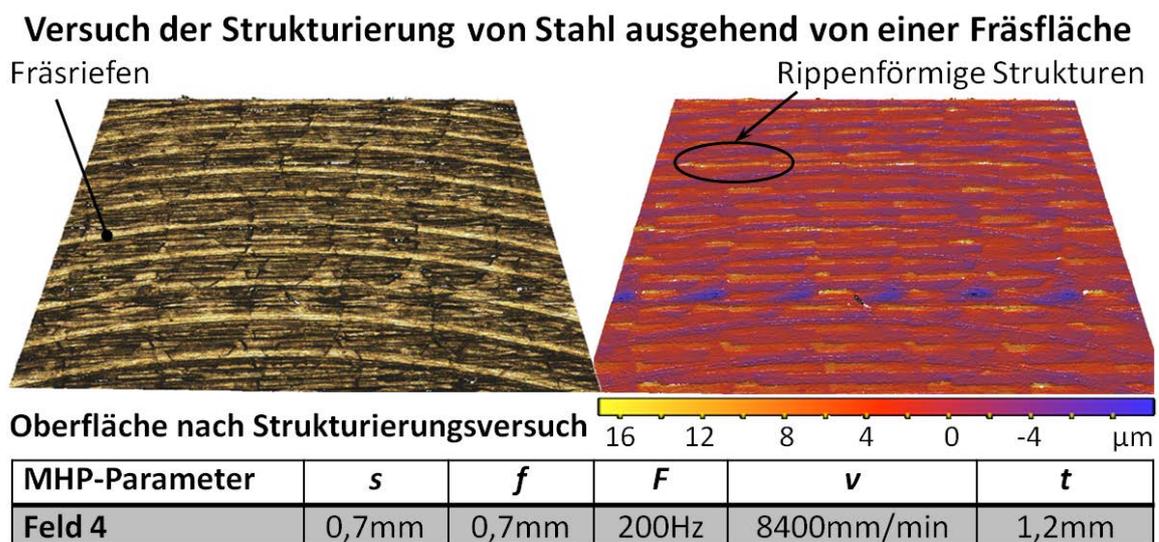


Abbildung 83: Oberflächenmessdatensätze des strukturierten Versuchsfelds 7 mit extrahiertem Querschnittsprofil

Die Höhe der aufgeprägten Strukturen liegt allerdings mit etwa 15-20 $\mu\text{m}$  deutlich unterhalb der Tiefe der auf der Werkzeugspitze eingebrachten Nuten (Nutentiefe etwa 70 $\mu\text{m}$ ). Anhand der dargestellten InfiniteFocus-Messdatensätze wird zudem noch einmal der einzeleinschlagübergreifende, nahtlose Anschluss der rippenförmigen Strukturierung ersichtlich. Die Übergänge einzelner Einschlagabdrücke sowie die hier unverändert fortlaufenden Rippen sind dabei anhand der Falschfarbendarstellung gut zu erkennen.

Infolge des Erreichens dieses angestrebten Strukturierungsergebnats sollte im Zuge von weiteren Untersuchungen geklärt werden, ob ein ähnliches Ergebnis auch für einen deutlich härteren Werkstoff erreicht werden kann. Hierzu wurde das anhand von Abbildung 80 dargestellte Werkzeug für die Bearbeitung von Versuchsfeldern auf dem rost- und säurebeständigen Stahlwerkstoff X3 CrNiMo 13-4 (1.4313) eingesetzt. Wie dabei im Zuge erster Strukturierungsversuche ersichtlich wurde, ist in nachvollziehbarer Weise für die Bearbeitung von Stahlwerkstoffen eine weitaus höhere Schlagkraft (gesteigert durch eine Erhöhung der Schlagdistanz  $t$ ) erforderlich. Erst über eine sukzessive Erhöhung des Schlagdistanzwertes auf  $t=1,2\text{mm}$  konnte dabei für den vorliegenden Werkstoff ein gewisser Strukturierungseffekt erzielt werden.

Abbildung 84 zeigt die Oberflächentopographie einer mit dem darunter gegebenen Parametersatz strukturierten Oberfläche (dargestellt in Real- und Falschfarben). Die Betrachtung zeigt, dass selbst nach erfolgter MHP-Strukturierung die Riefen der vorangegangenen Fräsbearbeitung das Topographiebild deutlich dominieren.



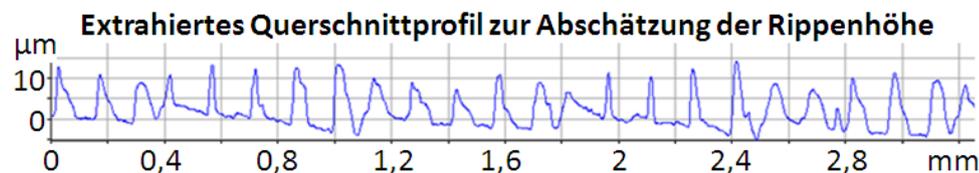
*Abbildung 84: Strukturierung von X3 CrNiMo 13-4 (1.4313) Stahl ohne vorangegangene Glättung der Oberfläche*

Hierdurch kann festgehalten werden, dass im Gegensatz zum im Vorfeld untersuchten Aluminiumwerkstoff, für welchen keine Beeinflussung des Strukturierungsergebnisses durch das vor der Bearbeitung vorliegende Fräsbild erkannt werden konnte (siehe z.B.: Abbildung 81), eine Strukturierung des Stahlwerkstoffes lediglich auf verhältnismäßig glatten Oberflächenbereichen erfolgen kann.

Im Zuge weiterer Untersuchungen wurden daher die zu strukturierenden Oberflächenbereiche vorbearbeitet (geglättet), wobei zum einen teilweise eine schleiftechnische Bearbeitung, zum anderen teilweise eine auf Oberflächenglättung optimierte MHP-Bearbeitung angewendet wurde. Auf diese Weise konnte das Strukturierungsergebnis deutlich verbessert werden, wobei beide angewendeten Vorbearbeitungsverfahren zu ähnlichen Resultaten führten.

Abbildung 85 zeigt ein nach erfolgter MHP-Vorbearbeitung (-Glättung) erreichtes Resultat. Die MHP-Parameter der Vorbearbeitung sind dabei neben jenen des eigentlichen Strukturierungsschrittes im unteren Teil der Abbildung angeführt. Wie ersichtlich, konnte durch die erfolgte Vorbehandlung der Einfluss von Fräsriefen auf das Gesamtergebnis deutlich reduziert (eliminiert) werden. Die auf der Oberfläche erzeugten Rippen sind allerdings durch eine unzureichende Werkzeugausrichtung beeinflusst.

### Strukturierung von Stahl ausgehend von MHP-geglätteter Fläche



MHP-Parameter	$s$	$f$	$F$	$v$	$t$
<b>Strukturierung</b>	0,7mm	0,7mm	200Hz	8400mm/min	1,2mm
<b>Vorbearbeitung der Versuchsfläche</b>					
<b>Kugel<math>\varnothing</math> = 10mm</b>	0,1mm	0,1mm	200Hz	1200mm/min	0,8mm

Abbildung 85: Strukturierung von Stahl ausgehend von einer MHP-geglätteten Oberfläche

Eine in Bezug auf die Verfahrrichtung vorliegende Schrägstellung der auf dem MHP-Werkzeug erzeugten Nuten hat hierbei dazu geführt, dass die einzelnen Strukturen durch nachfolgende Schläge deformiert wurden. Da diese Deformationen im Falle einer zureichenden Werkzeugausrichtung nicht zu erwarten sind, kann auch für den vorliegenden Stahlwerkstoff durchaus von einer deutlichen Strukturierung infolge des dargestellten Ansatzes gesprochen werden. Die Breite der Strukturen liegt dabei in Regionen in welchen diese nicht durch die unzureichende Werkzeugausrichtung beeinflusst sind im Größenordnungsbereich der vorangegangenen Versuche. Die Höhe der erzeugten Rippenstrukturen liegt jedoch mit etwa 10-12µm deutlich unterhalb der auf Aluminium realisierten Ergebnisse.

Die Umsetzung der hier anhand ebener Flächen gezeigten Ergebnisse soll anhand des Folgekapitels auch für unebene Werkstückoberflächen untersucht werden, wobei auch eine weitere Optimierung des Werkzeugausrichtungsprozesses erfolgen soll.

#### **7.1.5 Strukturierung unebener Oberflächen**

Bei der Umsetzung der betrachteten Methode zur Oberflächenstrukturierung unter Nutzung der MHP-Technologie auf reale Anwendungsfelder der Industrie kann die Strukturierung ebener Flächen lediglich als erste grundsätzliche Betrachtung gesehen werden. Für die Bearbeitung einer realen Bauteilgeometrie ist zudem zu klären, ob eine Strukturierung unebener Fläche durch den vorgeschlagenen Ansatz realisiert werden kann.

Aus diesem Grund wurde aus dem Werkstoff AlMgSi 0,5 eine Versuchsprobe angefertigt (siehe Abbildung 86), deren Querschnitt durch eine kreisrunde, konvexe Erhebung mit Radius 20mm in Probenmitte definiert ist, welche über konkave Verrundungen mit Radius 15mm an den Rändern der Probe jeweils in eine Ebene übergeht. Auf diese wellige Oberfläche sollte im Folgenden unter Verwendung des in Kapitel 7.1.4 beschriebenen Stößels eine zusammenhängende Rippenstruktur aufgebracht werden. Anhand der Beurteilung des Strukturierungsergebnisses in den Übergängen der Werkstückgeometrie soll dadurch eine Aussage über die Möglichkeit der Strukturierung unebener Bauteiloberflächen speziell für konvexe und konkave Rundungen gegeben werden (siehe Abbildung 86a).

Dem dargestellten Versuchsansatz folgend wurden unter Verwendung der durch Tabelle 31 gegebenen Parametereinstellungen fünf Versuchsfelder einer Breite von jeweils 10mm auf der unebenen Probenoberfläche erstellt. Der MHP-Aktuator wurde dafür auf dem 5-achsigen Bearbeitungszentrum Hermle C20U gespannt.

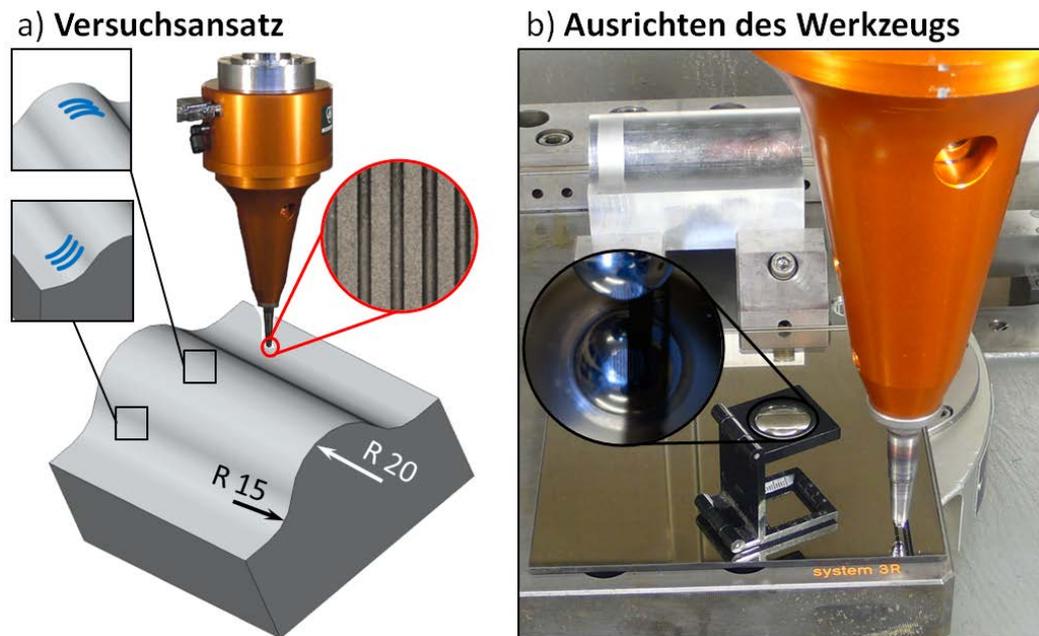


Abbildung 86: Versuch zur Strukturierung unebener Oberflächen: a) Versuchsansatz zur Erstellung rippenförmiger Strukturen auf einer unebenen Fläche (vgl. [60])  
b) Ausrichten des Werkzeugs mittel Spiegel

Das Werkzeug wurde dann durch die Kombination der drei translatorischen Achsen sowie der um die x-Achse drehenden rotatorischen A-Achse der Maschine in vierachsiger Bewegung derart geführt, dass über die gesamte Bearbeitungsbahn ein orthogonales Auftreffen des Werkzeugs auf die Oberfläche realisiert werden konnte.

Da in Bezug auf die notwendige Ausrichtung des MHP-Werkzeuges im Zuge der vorangegangenen Untersuchungen ein deutliches Optimierungspotential erkannt werden konnte, wurde diese hier neben der bereits zuvor verwendeten Lupe durch die Verwendung eines Spiegels unterstützt.

Tabelle 31: MHP-Parameter zur Strukturierung unebener Oberflächen

Parameter-setting	s [mm]	t [mm]	F [Hz]	I [%]	v* [mm/min]
Versuchsfeld 1	0,5	0,3	200	100	~2000(6000)
Versuchsfeld 2	0,3	0,3	200	100	~2000(3600)
Versuchsfeld 3	0,3	0,4	200	100	~2000(6000)
Versuchsfeld 4	0,7	0,3	150	100	~2000(8400)
Versuchsfeld 5	0,3	0,4	150	100	~2000(6000)

\*... die im Maschinenprogramm vorgegebene Vorschubgeschwindigkeit (jeweils in Klammer angeführt), konnte durch die Maschine ob der geforderten Richtungswechsel nicht erreicht werden. Die reale Vorschubgeschwindigkeit lag in den Versuchen einheitlich bei etwa 2000mm/min.

Wie in Abbildung 86b dargestellt, konnte dabei das Werkzeug direkt über die Spiegelfläche verfahren und anhand von Linien, die in Richtung der späteren Verfahrrichtung (y-Achse) ausgerichtet wurden, positioniert werden. Auf diese Weise konnten im Vergleich zum bisher verfolgten Ansatz, bei welchem durch eine von unten erfolgende Blickrichtung auf die weit vom Werkstück abgehobene Stößelspitze eine Orientierung an den Maschinenachsen teilweise nur sehr schwer möglich war, Ausrichtungsfehler deutlich minimiert werden.

Zudem wurde die Fixierung und Ausrichtung des Werkzeugs dadurch erleichtert, dass das Aktuatorssystem an der verwendeten Werkzeugmaschine über eine eigens erstellte Vorrichtung gespannt wurde. Der Aktuator wurde dabei zunächst mit einer Trägerplatte verbunden, welche über Langlöcher (angeordnet am Umfang der kreisrunden Platte) mit einer fix mit dem Spindelkasten verbunden Aufnahme verschraubt wurde. Vor dem finalen Festziehen dieser Schrauben konnte damit über die Langlochverbindungen eine im Zuge der Stößelausrichtung erforderliche, genaue Verdrehung des Werkzeugs ermöglicht werden. Im Anschluss wurde der Aktuator durch Festziehen der Schrauben entkoppelt von der Maschinenspindel gegen Verdrehung fixiert. Auf diese Weise wurde, wie anhand von Abbildung 87 im Zuge der Betrachtung des ebenen Probereiches gezeigt, für sämtliche Versuche eine genaue Ausrichtung des Werkzeuges erreicht. Die deutlichsten Strukturen wurden hierbei an den Versuchsfeldern 2 und 3 unter Vorgabe eines Bahnversatzes von  $s=0,3\text{mm}$  sowie einer Schlagfrequenzeinstellung von  $F=200\text{Hz}$  erzielt.

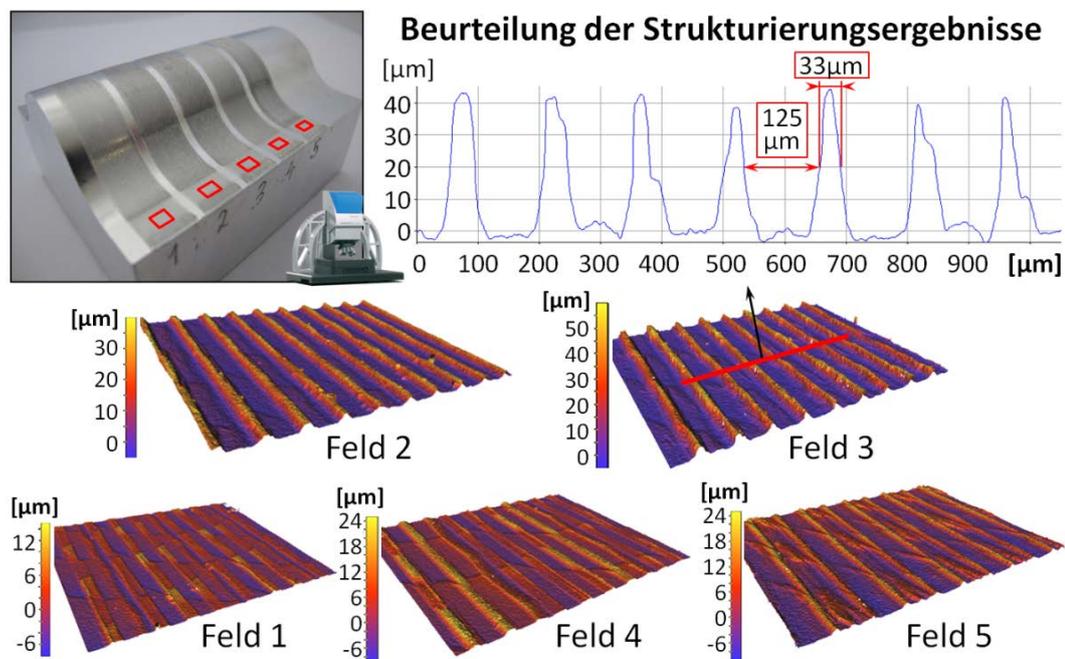


Abbildung 87: Bewertung der einzelnen Strukturierungsergebnisse mittels dem 3D-Oberflächenmesssystem InfiniteFocus (Alicona)

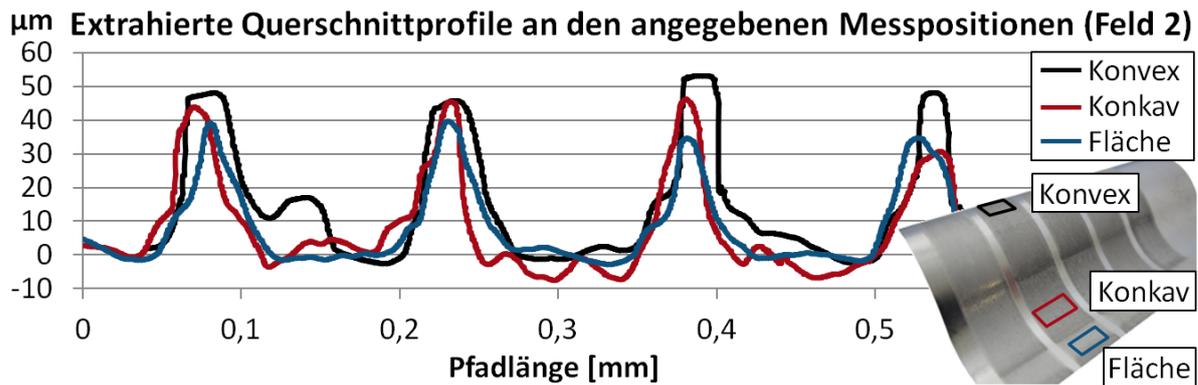


Abbildung 88: Beurteilung der Gleichmäßigkeit der erzeugten Strukturen

Im Zuge eines Vergleichs des am ebenen, am konkaven sowie am konvexen Probenbereich vorliegenden Ergebnisses kann zudem eine über die gesamte Werkstückgeometrie weitgehend gleichmäßig vorliegende Strukturierung erkannt werden. Abbildung 88 zeigt dies am Beispiel der Überlagerung von Schnittprofilen, die am konvexen, konkaven und ebenen Probenbereichen des zweiten Versuchsfeldes extrahiert wurden. Anhand der Untersuchung erscheint damit die dargestellte Strukturierungsmethode als durchaus geeignet für die Bearbeitung der hier untersuchten, unebenen Bauteiloberfläche.

#### 7.1.6 MHP-Strukturierung großflächiger Bereiche

Anhand der oben dargestellten Untersuchungen konnte die Strukturierung metallischer Oberflächen mittels formgestalteter MHP-Werkzeuge gezeigt werden. In Hinblick auf einen wirtschaftlichen Einsatz dieser Methode muss jedoch auch die Strukturierung größerer, die Abmessungen der bisher betrachteten Versuchsfelder übersteigender, Flächenbereiche betrachtet werden. Dabei ist insbesondere die Frage zu klären, ob ein einheitliches Strukturierungsergebnis maßgeblich durch ein etwaiges Verkleben der auf dem MHP-Werkzeug aufgetragenen Strukturen sowie dessen Verschleiß beeinflusst ist.

Aus diesem Grund wurden unter Verwendung eines Vertikalspindel-Bearbeitungszentrums VF3 (HAAS) Untersuchungen durchgeführt, wobei die Maschine durch Achsverfahrwege von 1016x508x635mm (X-, Y-, Z-Achse) die Bearbeitung verhältnismäßig großflächiger Bauteile erlaubt. Für eine erste Betrachtung großflächigerer Bearbeitungen sowie des hierbei vorliegenden Strukturierungsergebnisses wurden unter Verwendung des in Abbildung 80 dargestellten Werkzeuges auf einem AlMgSi 0,5 (3.3206)-Flachmaterial (710x70x10mm) Oberflächenbereiche einer Länge von 700mm durch die Aufbringung länglicher Rippen strukturiert.

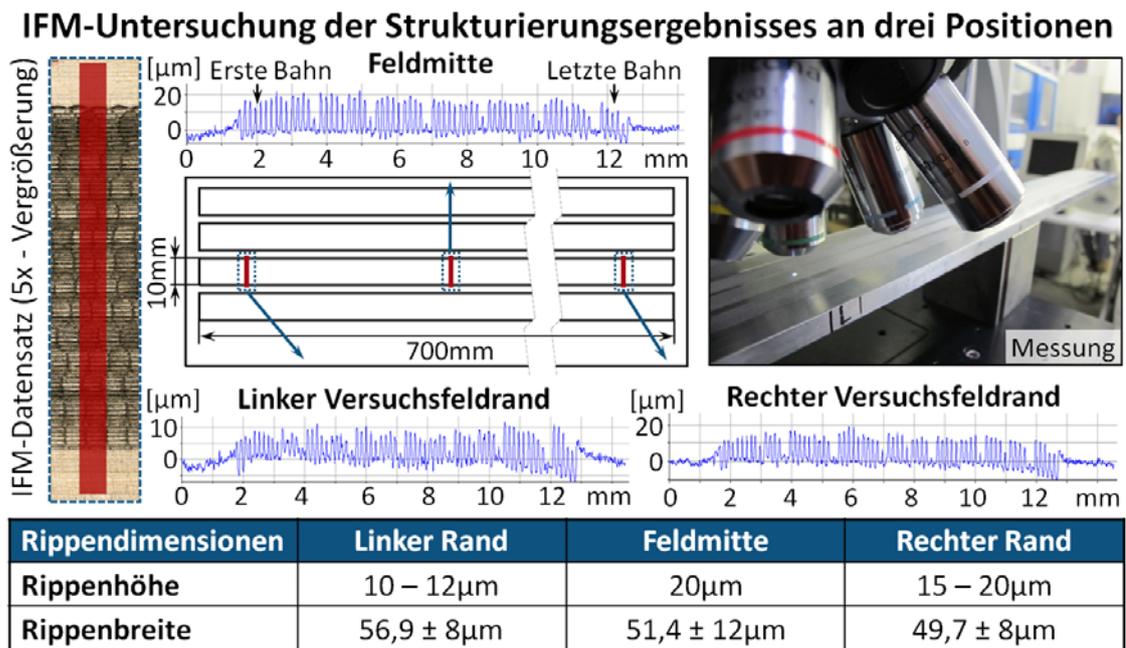


Abbildung 89: Bewertung der erzeugten Strukturierung (vgl. [60])

Die Breite der einzelnen Versuchsfelder wurde mit etwas über 10mm derart gewählt, dass im Zuge der späteren Auswertung mit dem InfiFocus-Messsystem eine Aufnahme der gesamten Feldbreite ermöglicht werden konnte. Auf diese Weise sollte insbesondere durch den Vergleich der ersten sowie letzten Bearbeitungsbahn geklärt werden, ob eine Änderung des Strukturierungsergebnisses infolge einer möglicherweise auftretenden, zunehmenden Verunreinigung des strukturierenden Werkzeuges zu verzeichnen ist.

Das Ergebnis der vorliegenden Betrachtung ist in Abbildung 89 dargestellt, welche einander drei an unterschiedlichen Versuchsfeldbereichen (rechter und linker Feldrand sowie Feldmitte) extrahierte Querschnittsprofile gegenüberstellt. Das dargestellte Versuchsfeld wurde unter Vorgabe einer Frequenz von  $F=200\text{Hz}$  mit einer Vorschubgeschwindigkeit von  $v=8000\text{mm/min}$  bearbeitet, wobei die einzelnen Bearbeitungsbahnen in einem jeweiligen Bahnabstand von  $s=0,8\text{mm}$  gesetzt wurden. Für die Schlagdistanz wurde dabei ein Wert von  $t=0,4\text{mm}$  gewählt und der Intensitätswert auf  $I=100\%$  eingestellt.

Wie anhand der dargestellten Profilschnitte ersichtlich, konnte im Zuge des Versuches keine signifikante Änderung des Strukturierungsergebnisses über den hier untersuchten Fahrweg von 9,1m (13 Bahnen einer Länge von jeweils 700mm) und unter Verwendung des vorliegenden Werkzeuges festgestellt werden. Insbesondere der Vergleich der ersten zur letzten Bearbeitungsbahn, welche jeweils den linken (erste Bahn) sowie rechten (letzte Bahn) Randbereich der gezeigten

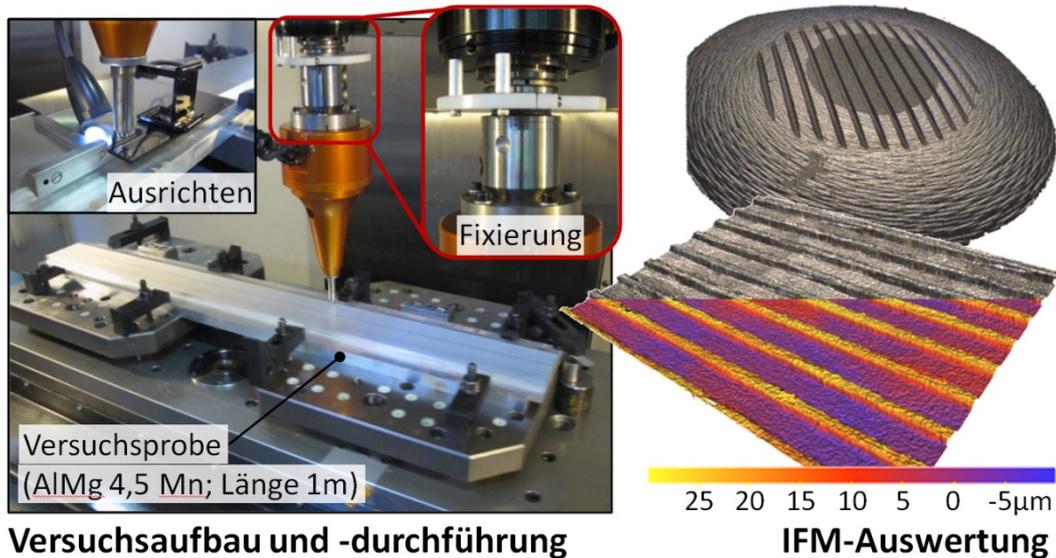
Profilschnitte bilden, zeigt dabei keine über die betrachtete Feldlänge einheitliche, sukzessive Reduzierung der Rippenhöhen.

In Bezug auf die jeweilige Feldposition (linker Rand, rechter Rand, Feldmitte) wurden hingegen an den hier vorliegenden Strukturen deutlich unterschiedliche Höhenabmessungen ermittelt (siehe Tabelle, Abbildung 89). Die unterschiedliche Ausprägung kann dabei auf eine Unebenheit der Versuchsprobenoberfläche zurückgeführt werden, die im Vorfeld der Untersuchung mittels einer über den zu strukturierenden Bereich verfahrenen Messuhr ermittelt und dokumentiert wurde. Aufgrund der bereits geringen Probenstärke wurde trotz der erkannten Unebenheit davon abgesehen, die zu strukturierende Oberfläche vor der MHP-Behandlung zu überfräsen. Im Zuge der Betrachtung der Messergebnisse muss jedoch in diesem Zusammenhang eine Verringerung beziehungsweise Erhöhung der letztlich effektiv vorliegenden Schlagdistanz berücksichtigt werden.

Unter diesem Gesichtspunkt können insbesondere die verhältnismäßig geringen Rippenhöhen am linken Versuchsfeldrand (10-12 $\mu$ m) durch das Vorliegen einer mit etwa 0,15mm gemessenen, positiven Abweichung des Feldbereichs zur Z-Null-Ebene erklärt werden. Die vorliegende Abweichung mindert hier den vorgegebenen Schlagdistanzwert von  $t=0,4$ mm auf  $t_{eff}=0,25$ mm, wodurch wie in Kapitel 5.1.1 ausgeführt über einen geringeren Beschleunigungsweg des Werkzeugs für diesen Bereich eine geringere Materialumformung resultiert.

Damit kann festgehalten werden, dass für die Generierung eines einheitlichen Strukturierungsergebnisses die genaue Kenntnis der Bauteilgeometrie vorausgesetzt werden muss, auf Basis derer die Führung des Werkzeugs unter Einhaltung eines konstanten Schlagdistanzwertes realisiert werden kann.

Für ein einheitliches Strukturierungsergebnis sowie eine wirtschaftliche Anwendung der vorgeschlagenen Methode ist des Weiteren der Verschleiß des zweckmäßig strukturierten MHP-Werkzeuges zu betrachten. Eine derartige Betrachtung kann anhand des in Abbildung 90 illustrierten Versuchs gegeben werden, im Zuge dessen Platten des Werkstoffs AlMg 4,5 Mn (3.3547) mit einer jeweiligen Länge von 1m mit einschlagübergreifenden Rippenformen MHP-strukturiert wurden. Wie in der Darstellung des Versuchsaufbaus ersichtlich, wurde die notwendige Ausrichtung des Werkzeugs auch hier, wie in Kapitel 7.1.5 erläutert, durch die Nutzung eines Spiegels unterstützt. Die eingestellte und fixierte Position wurde zudem vor der Bearbeitung großflächiger Versuchsfelder jeweils anhand von Testfeldern (20x10mm) überprüft, welche auf einer kleineren Aluminiumprobe (AlMgSi 0,5) bearbeitet und unter dem Mikroskop bewertet wurden.



**Versuchsaufbau und -durchführung** **IFM-Auswertung**  
 Abbildung 90: Untersuchung der Auswirkung von Werkzeugverschleiß und -verunreinigung auf das Strukturierungsergebnis

Um ein Verdrehen des MHP-Aktuators ausschließen zu können, welche die zu erzeugenden gerichteten Strukturen deutlich beeinflussen würde, wurde die Maschinenspindel durch eine Vorrichtung fixiert, die geklemmt an der Werkzeugaufnahme (Flächenspannfutter) über zwei Schrauben fest mit dem Spindelkasten verbunden wurde. Durch den vorliegenden Versuchsaufbau konnte somit eine Bearbeitung von Versuchsfeldflächen einer Länge von etwa einem Meter (995mm) mit einem in Vorschubrichtung ausgerichteten und gegen Verdrehung fixierten Werkzeug realisiert werden.

Wie im rechten Teil der Abbildung 90 anhand zweier Beispiele dargestellt, konnte somit durch eine fortlaufende Begutachtung des Werkzeugs sowie der mit diesem erzeugten Oberflächentextur (jeweils unter Zuhilfenahme des InfiniteFocus-Messsystems) die Auswirkung von Werkzeugverschleiß sowie -verschmutzung auf das Strukturierungsergebnis betrachtet werden.

Dabei wurde nach einiger Zeit für das im Zuge der vorangegangenen Untersuchungen bereits für die Strukturierung von Stahl und Aluminiumoberflächen eingesetzte Werkzeug (siehe Abbildung 80) ein sukzessives Ausbrechen der aufgetragenen Rippen beobachtet. Hierbei kam es zunächst zum Verschleiß der äußersten Rippe, wobei nach weiterem Einsatz auch das Ausbrechen der zweiten und letztlich der dritten Rippe erkannt werden konnte (siehe Abbildung 91a). Dieses sich sukzessive vom Randbereich zur Spitzenmitte ausbreitende Verschleißbild legte den Schluss nahe, dass der Werkzeugverschleiß maßgeblich durch Querkräfte beeinflusst sein könnte, die infolge des Versatzes zwischen den einzelnen Bearbeitungsbahnen auf die Werkzeugspitze einwirken dürften.

### Versatzstrategie zur Reduzierung des Werkzeugverschleißes

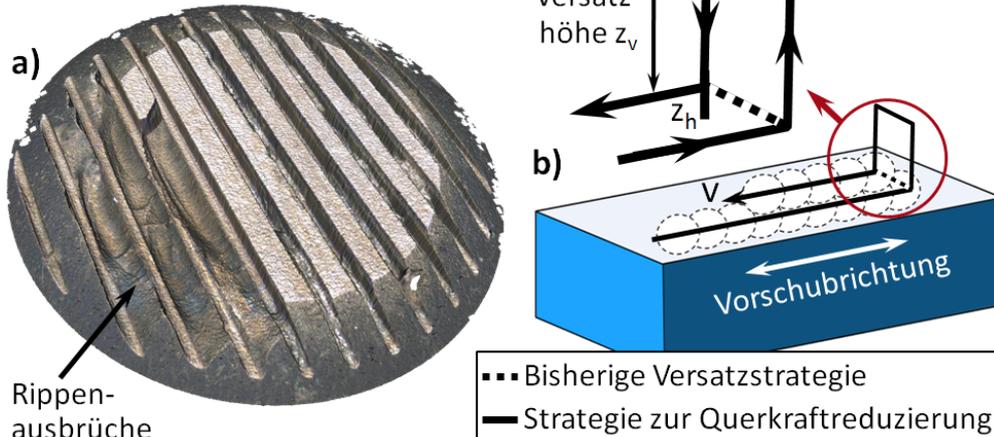


Abbildung 91: Strategieoptimierung zur Verschleißminderung: a) IFM-Messung (5x-Objektiv) des verschlissenen Werkzeuges b) Strategieanpassung zur Vermeidung von Querkräften

In Bezug auf die für die Führung der vorliegenden Strukturierungswerkzeuge genutzten Maschinenprogramme konnte hierdurch ein erhebliches Optimierungspotential in der zweckmäßigen Gestaltung des Bahnversatzbereichs erkannt werden (siehe Abbildung 91b). Um eine Querkraftwirkung zu unterbinden, wurde dabei das Werkzeug für dessen Versatz zur nachfolgenden Bearbeitungsbahn zunächst von der Materialoberfläche abgehoben. Nach erfolgtem Bahnwechsel wurde über ein neuerliches Anfahren der Zündhöhe  $z_h$  der Prozess erneut gestartet. Dabei konnte eine programmierte Verweildauer von einer Sekunde im Zuge der Untersuchungen als zweckmäßig für die Sicherstellung der Wiederaufnahme des Schlagprozesses erkannt werden. Nach dieser Verweilzeit kann das Werkzeug erneut auf die jeweilige Schlagdistanz verfahren und für die Strukturierung einer weiteren Bahn genutzt werden.

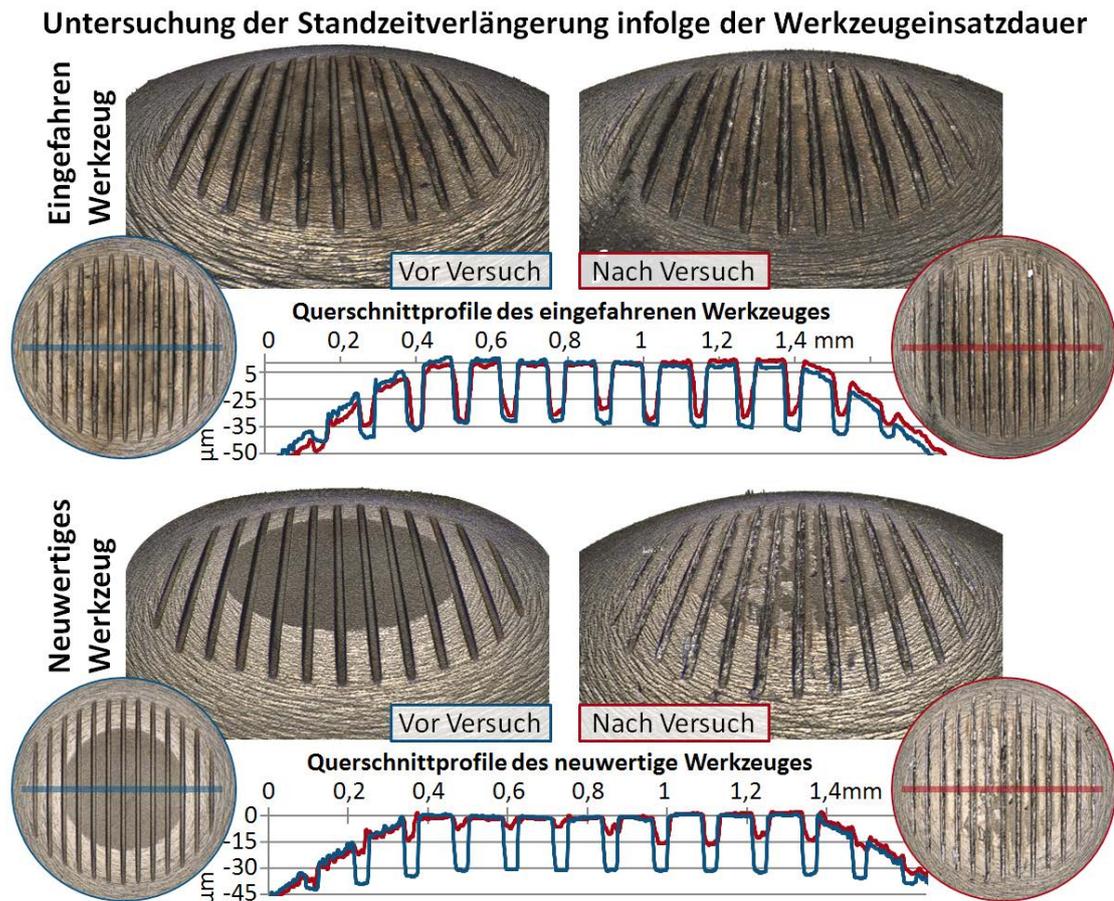
Eine derart optimierte Bearbeitungsstrategie wurde unter Verwendung eines wiederum unter Nutzung der Mikro-EDM-Technologie neu angefertigten Werkzeuges erprobt. Um für dieses Werkzeug eine zusätzliche Erhöhung der Standzeit zu erreichen, wurde die Tiefe der im Abstand von  $125\mu\text{m}$  auf die plan abgetragene Werkzeugspitze (Planflächendurchmesser  $1\text{mm}$ ) eingebrachten,  $40\mu\text{m}$  breiten Nuten mit lediglich  $35\mu\text{m}$  gewählt.

Im Zuge der Versuche wurden zunächst die Prozessparameter mit  $I=100\%$ ;  $t=0,7\text{mm}$ ;  $F=200\text{Hz}$ ;  $v=8400\text{mm/min}$  und  $s=0,755\text{mm}$  in Hinblick auf ein für das vorliegende Werkzeug möglichst deutlich ausgeprägtes und einheitliches Strukturierungsbild optimiert. Im Folgenden wurden auf insgesamt acht Testplatten Feldbereiche der Abmessungen  $995 \times 85\text{mm}$  strukturiert, wobei ein Bahnwechsel

jeweils mittels Versatzhöhe  $z_v=5\text{mm}$  und Zündhöhe  $z_h=0,15\text{mm}$  (Verweildauer eine Sekunde) erfolgte. Die Bearbeitung wurde in regelmäßigen Abständen (nach jeweils zehn verfahrenen Bahnen) unterbrochen, um das Werkzeug mittels einer Lupe grob zu begutachten und dieses gegebenenfalls in einem Ultraschallbecken (Emmi-5, EMAG Technologies) zu reinigen. Um hierbei ein mit der Notwendigkeit einer neuerlichen Ausrichtung des Werkzeuges verbundenes Ausspannen des Stößels zu vermeiden, erfolgte die Reinigung direkt in der Maschine. Das Strukturierungsergebnis an den einzelnen Probefeldern ( $995\times 85\text{mm}$ ) wurde im jeweiligen Anschluss an deren Erstellung unter Zuhilfenahme des InfiniteFocus-Messsystems untersucht, mit welchem auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten Aufnahmen des Werkzeugs erstellt wurden.

Anhand dieser Betrachtungen konnte gezeigt werden, dass grundsätzlich die Möglichkeit der Erstellung großflächiger und weitgehend einheitlicher Strukturierungen durch den dargestellten Ansatz gegeben ist. Die zu strukturierenden Bereiche müssen hierfür zunächst zur Gänze von etwaigen Verunreinigungen sowie Fetten und Ölen befreit werden, die zu einem Verstopfen der Werkzeugstrukturen führen können. Für die vorliegenden Versuche wurden dazu alle Testplatten mittels einer Vlies-Fächerschleifwalze (Vliesausführung: Mittel) gesäubert. Dadurch konnten die Verunreinigung des Werkzeuges in einem vertretbaren Maß gehalten werden. Dennoch wurden im Zuge der ersten Strukturierungen deutliche Verstopfungen des zu diesem Zeitpunkt neuwertig vorliegenden Werkzeuges erkannt. Diese führten auch zu einer Reduzierung der Höhe der auf der Oberfläche erzeugten Strukturierungen. Ausgehend von einer Rippenhöhe von etwa  $25\text{-}30\mu\text{m}$  am Beginn einer Bearbeitung, wurde die Höhe der Rippen nach zehn Bearbeitungsbahnen nur noch mit  $\sim 20\mu\text{m}$  gemessen.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen konnte jedoch ein Rückgang der Verunreinigungsneigung des Werkzeuges beobachtet werden. Dabei konnten nach einer gewissen Einsatzdauer des Stößels auch nach mehreren Bahnen keine nennenswerten Anhaftungen von Material an den Strukturen festgestellt werden. Um diesen Effekt des Einflusses der vorangehenden Einsatzdauer des Werkzeuges auf dessen Standzeit (hier auf die Zeitspanne bezogen, in der das MHP-Werkzeug unter vertretbarer Verunreinigung seine strukturierende Aufgabe erfüllen kann) nachzuvollziehen zu können, wurde erneut ein MHP-Stößel mit annähernd identer Form (Planflächendurchmesser  $\sim 1\text{mm}$ ; Nutenbreite  $\sim 40\mu\text{m}$ ; Nutentiefe  $\sim 30\mu\text{m}$ ; Nutenabstand  $125\mu\text{m}$ ) gestaltet und dem bisher verwendeten Werkzeug in einem Vergleichsversuch gegenübergestellt. Beide Werkzeuge wurden hierzu zunächst im Ultraschallbad gereinigt, mittels InfiniteFocus vermessen und für die Bearbeitung von zwanzig Bahnen einer jeweiligen Länge von  $960\text{mm}$  (Gesamtlänge  $19,2\text{m}$ ) genutzt.



Anhand von im direkten Anschluss an diesen Einsatz (ohne Zwischenreinigung) erstellten IFM-Messungen konnte damit die werkzeugspezifische Verunreinigung untersucht werden. Der in Abbildung 92 für beide Werkzeuge gegebene Vergleich zeigt im Fall des neu strukturierten Stößels eine deutliche Verstopfung der auf diesem aufgetragenen Strukturen (unten dargestellt). Die Nuten auf dem bereits zuvor eingesetzten (eingefahrenen) Werkzeug zeigen hingegen nur sehr geringfügige Anhaftungen von Werkstückmaterial. Dieser hier gezeigte Effekt dürfte auf eine zunehmende Oberflächenglättung der mittels Mikro-EDM erstellten Strukturen (Nuten) zurückzuführen sein. Die Tendenz des Anhaftens von Material dürfte dabei für die, durch Ihren Einsatz zunehmend glatter werdenden Strukturflächen zurückgehen. Auf diese Weise kann für bereits eingefahrene MHP-Strukturierungswerkzeuge mit einer Erhöhung der Standzeit und damit einhergehend einer Verlängerung der für eine einheitliche Strukturierung erforderlichen Reinigungsintervalle gerechnet werden.

Zudem konnten an dem im Zuge der Untersuchung eingesetzten Werkzeug auch nach Untersuchungsende und damit nach der Strukturierung einer Gesamtfläche von etwa  $0,7\text{m}^2$  keine erheblichen Verschleißerscheinungen festgestellt werden.

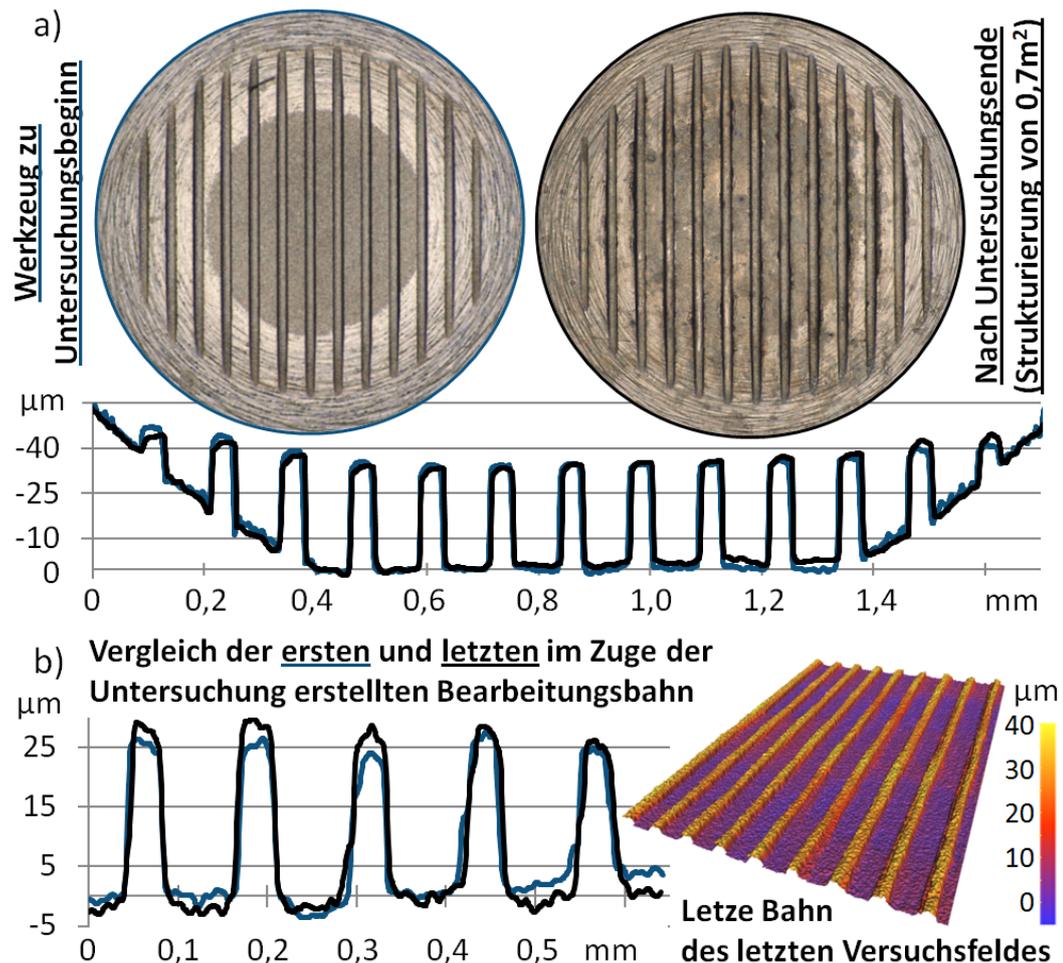


Abbildung 93: Messtechnische Analyse: a) Vergleich des Werkzeuges vor sowie nach der Untersuchung b) Querschnittsprofile extrahiert in der Mitte der ersten sowie letzten Bearbeitungsbahn

Auch ein Ausbrechen der auf der Werkzeugspitze erzeugten Rippen wurde nicht beobachtet (siehe Abbildung 93a). Da die bearbeitete Gesamtfläche dabei jene Fläche deutlich übersteigt, für welche an dem in Abbildung 91a gezeigten Werkzeug bereits ein deutlicher Verschleiß ersichtlich wurde, kann auf eine positive Auswirkung der erfolgten Bahnführungsstrategieanpassung sowie der Reduzierung der Nuttiefe geschlossen werden. Eine Strukturierung mittels formgestalteten MHP-Werkzeugen kann damit durchaus auch auf größeren Flächenbereichen erfolgen, wobei unter den oben genannten Bedingungen (z.B.: Reinigung des Werkzeuges in einsatzdauerabhängigen, regelmäßigen Intervallen; Einhaltung der Schlagdistanz) auch weitgehend einheitliche Oberflächentexturen erzeugt werden können (in erster Linie einheitliche Höhe der Rippen, Breite von  $\sim 40\mu\text{m}$  und Abstand von  $\sim 125\mu\text{m}$  durch Stößelform bestimmt). Abbildung 93b zeigt dies beispielhaft am Vergleich zweier Profilschnitte, die in der Mitte der ersten sowie letzten im Zuge der Untersuchung mit dem darüber dargestellten Werkzeug erstellten Bearbeitungsbahn extrahiert wurden.

## 7.2 Einbetten von Beschichtungsmaterialien

### 7.2.1 Motivation und Untersuchungsansatz

Im Bestreben die Anwendungsfelder der vorliegenden Technologie durch neue Methoden und Verfahrensansätze zu erweitern, soll im Zuge des folgenden Kapitels geklärt werden, ob eine mechanische Einbettung unterschiedlicher Beschichtungsmaterialien unter Verwendung des MHP-Prozesses realisiert werden kann.

Abbildung 94 zeigt den hierbei verfolgten Ansatz, welcher über die Nutzung der vorliegenden Technologie die Erzeugung homogener und widerstandsfähiger Beschichtungen verfolgt.

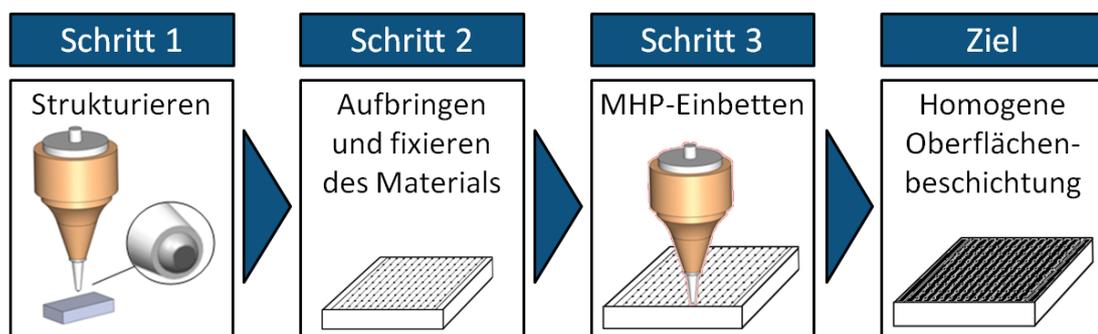


Abbildung 94: Ansatz für die mechanische Einbettung von Beschichtungsmaterialien mittels MHP

Das Beschichtungsmaterial soll dabei zunächst auf die zu beschichtenden Oberflächenbereiche aufgebracht werden. Durch die, infolge der MHP-Behandlung resultierende, mechanische Umformung dieser Flächenbereiche soll der Beschichtungsstoff in weiterer Folge in das Grundmaterial eingebracht und mit diesem fest verbunden werden.

Hierfür ist durch eine gewisse Fixierung des Beschichtungsstoffes im Zuge der Erstaufbringung auf der Oberfläche sicherzustellen, dass dieser zum Zeitpunkt der Werkzeugeinschläge im ausreichenden Maße an den jeweiligen Wirkstellen, den Kontaktpunkten zwischen MHP-Werkzeug und Werkstückoberfläche, zur Verfügung steht.

Anhand der im Folgenden dargestellten experimentellen Untersuchungen sollen daher unterschiedliche Klebe- und Schmierstoffe in Bezug auf deren Eignung für eine erste Aufbringung des Beschichtungswerkstoffes betrachtet werden. Zudem soll geklärt werden, ob der Einbettungsprozess über eine zweckmäßige Vorstrukturierung der Oberfläche unterstützt werden kann.

## 7.2.2 Untersuchung der funktionellen Eignung

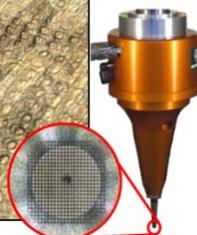
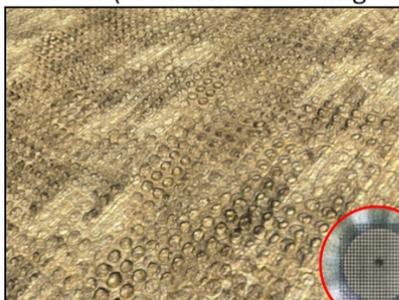
Um die grundsätzliche Eignung des im vorangegangenen Kapitelabschnitts erläuterten Ansatzes zu untersuchen, wurde für eine erste Betrachtung mit der Kupferlegierung CuZn39Pb3 (2.0401) ein verhältnismäßig weicher Probenwerkstoff gewählt. Die Probenoberfläche sollte unter der Verwendung der Technologie des Schlagverdichtens mit einer verschleißhemmenden Hartschicht aus Wolframcarbit beschichtet werden. Zur Umsetzung dieses Ziels wurden anhand von drei Proben unterschiedliche Ansätze untersucht, um das Beschichtungsmaterial, welches in Form von Wolframcarbitpulver mit einer Korngröße von  $0,8\mu\text{m}$  zur Verfügung stand, einzubetten.

Bei den ersten beiden Proben wurde hierbei versucht, durch eine zweckmäßige Vorstrukturierung der zu beschichtenden Oberfläche den späteren Einbettungsprozess zu unterstützen. Probe 1 wurde dabei unter Verwendung des in Kapitel 7.1.3 beschriebenen Schlagwerkzeugs vorstrukturiert (siehe Abbildung 95). Es wurde erwartet, dass sich das Beschichtungsmaterial zwischen den auf diese Weise erzeugten Zapfenstrukturen sammeln würde. Die Zapfen sollte im folgenden Einbettungsschritt unter der Verwendung eines zylindrischen Stößels mit Durchmesser 8mm über dem pulverförmigen Hartstoff verformt werden, um diesen möglichst tief in das Grundmaterial einzubringen.

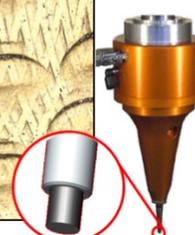
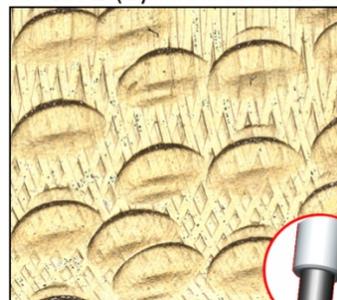
Ein ähnlicher Ansatz wurde auch bei der Vorstrukturierung von Versuchsprobe 2 verfolgt. Durch die Verwendung eines, in Bezug auf die Schlagrichtung leicht schräggestellten, zylindrischen Schlagwerkzeugs mit Durchmesser 3mm wurden dabei, wie in Abbildung 95 dargestellt, definierte Kerben auf der Oberfläche erzeugt. Das WC-Pulver sollte sich in diesen Vertiefungen sammeln und der Grundwerkstoff infolge der nachfolgenden MHP-Bearbeitung über den somit vorliegenden Hartstoffreservoirs umgeformt werden.

### Oberflächentopografien nach erfolgter Vorstrukturierung (10x IFM-Messungen)

**Probe 1** (Stößel mit Bohrungen)



**Probe 2** (Zylinderstößel D3)



**Probe 3** (gefräst)

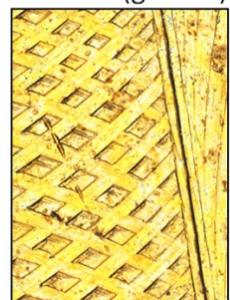


Abbildung 95: Probenoberflächentopographie vor der Beschichtung

Die Oberfläche der dritten Probe wurde hingegen vor dem Einbettungsversuch nicht gezielt vorstrukturiert und sollte als Referenz dienen. Die Ausgangstopographie dieser Probe ist damit durch die formgebende Fräsbearbeitung und die hierdurch resultierenden Riefenstrukturen bestimmt (siehe Abbildung 95, rechts).

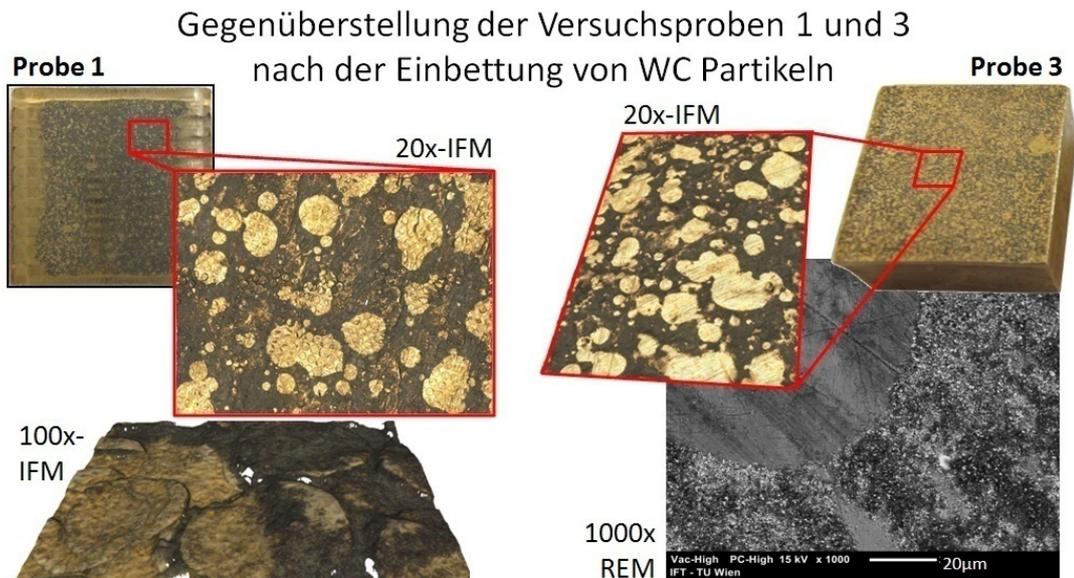
Das pulverförmige Beschichtungsmaterial wurde nun durch die Verwendung eines Sprühklebers (Tesa) auf die zu bearbeitende Oberfläche aufgebracht. Die Probenoberflächen wurden dazu mit dem Kleber besprüht und in WC-Pulver getaucht. Im Anschluss wurden die Proben in zwei MHP-Schritten unter Verwendung der in Tabelle 32 gegebenen Prozessparameter bearbeitet. Die Vorschubrichtung der zweiten Bearbeitung wurde dabei normal auf die erste gewählt. Tabelle 32 können zudem auch die Parametersätze der jeweiligen Vorstrukturierungsschritte entnommen werden.

Abbildung 96 zeigt das Versuchsergebnis anhand der Oberflächen der Proben 1 und 3, an welchen durch den beschriebenen Prozess eine gewisse Anhaftung von Hartpartikeln erreicht werden konnte. Auf der Oberfläche der Probe 2 konnte hingegen keine WC-Schicht festgestellt werden.

Die in der Abbildung dargestellten Aufnahmen wurden nach einer intensiven Probenreinigung mittels Ultraschallbad erstellt. Auf diese Weise kann gezeigt werden, dass auf den Probenoberflächen dauerhaft Hartpartikel aufgebracht werden konnten. Die erzeugten Schichten liegen dabei jedoch nicht homogen über die jeweiligen Probenoberflächen vor. So sind Bereiche mit deutlicher Hartstoffanhaftung durch fleckenförmige Gebiete unterbrochen, auf welchen sich keine Hartpartikel finden lassen.

*Tabelle 32: MHP-Parameter der Einbettungs- und Vorstrukturierungsprozesse*

-	<b>D</b> [mm]	<b>F</b> [Hz]	<b>I</b> [%]	<b>s</b> [mm]	<b>t</b> [mm]	<b>v</b> [mm/min]
<u>Probe 1:</u>						
Vorbearbeitung	Einzellochst.	200	100	1	0,8	7200
Einbettungsprozess	Zylinder D8	150	100	0,2	1,5	3000
<u>Probe 2:</u>						
Vorbearbeitung 1	Zylinder D3	100	100	3,1	0,8	18600
Vorbearbeitung 2	Zylinder D3	100	100	1,5	1	9000
Einbettungsprozess	10	200	100	0,2	0,8	2400
<u>Probe 3:</u>						
Einbettungsprozess	10	200	100	0,2	0,8	2400



*Abbildung 96: Darstellung der Versuchsproben 1 und 3:  
Oberflächentopographiemessungen des InfiniteFocus (IFM)-Messsystems und  
Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahme*

Es liegt dabei die Vermutung nahe, dass sich der verwendete Sprühklebstoff vor dem Tauchen in das Beschichtungsmaterial an gewissen Stellen der Probenoberfläche tropfenförmig angesammelt hat. Das inhomogene Beschichtungsergebnis dürfte daher auf eine ungleichmäßige Haftung der WC-Partikel vor dem Einbettungsprozess zurückzuführen sein.

Der direkte Vergleich der resultierenden Oberflächen der vorstrukturierten Probe 1 sowie der ohne Vorstrukturierung beschichteten Probe 3 zeigt jedoch, dass die erreichten Ergebnisse durchaus miteinander vergleichbar sind. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Vorstrukturierung der Oberfläche mit den hier gewählten Strategien keine deutliche Verbesserung des Einbettungsergebnisses bedingt.

Obgleich es im Zuge dieser ersten Untersuchung nicht gelungen ist, eine homogene Einbettung der verwendeten Wolframkarbid-Partikel zu realisieren, konnte dennoch ein bedingtes Beschichtungsergebnis erreicht werden. Aus diesem Grund erschien eine weiterführende Untersuchung der dargestellten Methode grundsätzlich gerechtfertigt. Im Folgenden wurde hierbei zunächst wiederum die Einbettung von Hartstoffen anhand unterschiedlicher Grundmaterialien betrachtet. Durch eine Erweiterung der möglichen Ansätze für eine erste Bereitstellung der Beschichtungspartikel auf der Oberfläche wurde dabei, wie im nachfolgenden Kapitel erläutert, die Umsetzung einer homogenen Hartstoffschicht angestrebt.

### 7.2.3 Experimentelle Untersuchung zur Einbettung von Hartstoffen

Um die Möglichkeit der Erzeugung homogener Beschichtungen näher zu untersuchen, wurden fünf Versuchsreihen an Proben unterschiedlicher Materialien mit den jeweiligen Abmessungen von 25x20x8mm durchgeführt. Es wurde dabei neben dem im Zuge der vorangegangenen Versuche verwendeten Werkstoff CuZn39Pb3 (2.0401) auch Proben der Aluminiumlegierung AlMgSi 0,5 (3.3206) sowie Stahlproben des rostbeständigen Stahls X5CrNi18-10 (1.4301) verwendet. Zudem sollte anhand der Untersuchung die Auswirkung der Ausgangskorngröße des zur Einbettung verwendeten Pulvermaterials näher beleuchtet werden. Zu diesem Zweck wurden drei Wolframkarbid-Pulver unterschiedlicher Korngröße (WC 0,8µm; WC 2-4µm sowie WC-W<sub>2</sub>C 45-90µm) in den Versuche betrachtet.

Im Zuge einzelner Versuchsreihen wurden jeweils Proben der drei betrachteten Werkstoffe (Probenserie) unter Verwendung einer einheitlichen Beschichtungsstrategie bearbeitet. Auf eine Vorstrukturierung der Oberflächen wurde aufgrund der Erkenntnisse aus der vorangegangenen Untersuchung (siehe Kapitel 7.2.2) verzichtet. Die Parametergrundeinstellungen, welche im Zuge aller angewandten Versuchsstrategien Verwendung fanden, sind in Tabelle 33 dargestellt.

Daneben zeigt Tabelle 34 die in den Versuchen variierten Faktoren. Wie ersichtlich, wurden die einzelnen Proben im Zuge der Einbettungsversuche mehrmals bearbeitet. Dabei wurde unter anderem jeweils die Vorschubrichtung des MHP-Prozesses geändert. Die in der Tabelle verwendete Vorschubrichtungsangabe ist hierbei in Bezug auf die Probenabmessungen zu sehen. Eine Ausrichtung des Vorschubes parallel zur Probenlängsseite wird somit mit „Längs“ bezeichnet. Die Ausrichtung parallel zur Probenquerseite trägt die Bezeichnung „Quer“.

Im Zuge der Bearbeitung der Probenserie 1 wurde zunächst der Ansatz verfolgt, eine homogene Hartstoffschicht durch die Kombination zweier Pulver unterschiedlicher Korngröße zu erreichen. Hierfür wurden mittels einer Sprühkleberschicht (Tesa) und durch Tauchen in ein WC-W<sub>2</sub>C 45-90µm-Pulverbad zunächst Hartpartikel mit verhältnismäßig großer Korngröße auf die Versuchsfläche aufgebracht.

Tabelle 33: MHP-Parametergrundeinstellungen

-	D [mm]	F [Hz]	I [%]	s [mm]	t [mm]
Parameterwert	8	200	100	0,2	0,8

Erläuterung der Prozessparameter siehe Kapitel 4.2.

Tabelle 34: Variierte Parameter der einzelnen Probenserien

Serie	Schritt	Korngröße WC-Partikel	Fixiermittel	v [mm/min]	Vorschub-Richtung
1	1	45-90µm	Sprühkleber	1200	Längs
	2	2-4µm	Öl	2400	Quer
	3			1200	Längs
2	1	45-90µm	WD-40	2400	Längs
	2		Öl		Quer
3	1	45-90µm	Öl	2400	Längs
	2				Quer
4	1	2-4µm	Öl	2400	Längs
	2				Quer
5	1	0,8µm	Öl	2400	Längs
	2				Quer

Nach einem ersten Schlagverdichtungsschritt wurden weitere WC-Partikel mit 4-5µm Korndurchmesser in einer Suspension in Mineralöl (46 [mm<sup>2</sup>/s]/40°C) auf derselben Oberfläche bereitgestellt und durch zweimalige Bearbeitung das Ziel verfolgt, die feinkörnigen Partikel zwischen den grobkörnigen einzubetten. Anhand von Versuchsreihe 2 wurde durch die Verwendung eines Multifunktionsöls (WD-40 Aerosol) als erster Fixierstoff versucht, die Einbettung grobkörniger Partikel zu unterstützen. Im Zuge eines zweiten Bearbeitungsschrittes wurde dasselbe Pulver vor der MHP-Bearbeitung durch eine Suspension in Mineralöl auf die Oberfläche aufgebracht.

Abbildung 97a zeigt die im Zuge der Versuche erstellten Proben. Es ist dabei ersichtlich, dass bereits anhand dieser ersten Versuchsreihen eine optisch weitgehend einheitliche und homogene Wolframkarbidschicht auf der Oberfläche der jeweiligen Probenmaterialien erzeugt werden konnte. Diese homogene Bedeckung wurde jedoch hauptsächlich im Zuge des zweiten beziehungsweise zweiten und dritten Bearbeitungsschrittes unter Verwendung von Öl erreicht.

Die Anwendung von Fixierstoffen wie Sprühkleber und Multifunktionsöl führte im Zuge der ersten Bearbeitungsschritte jeweils nur zu mäßigen Beschichtungserfolgen. Diese Tatsache ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass das Hartstoffpulver zum Teil durch den zeilenweisen MHP-Prozess von der Probenoberfläche verdrängt wurde (siehe Abbildung 97b).

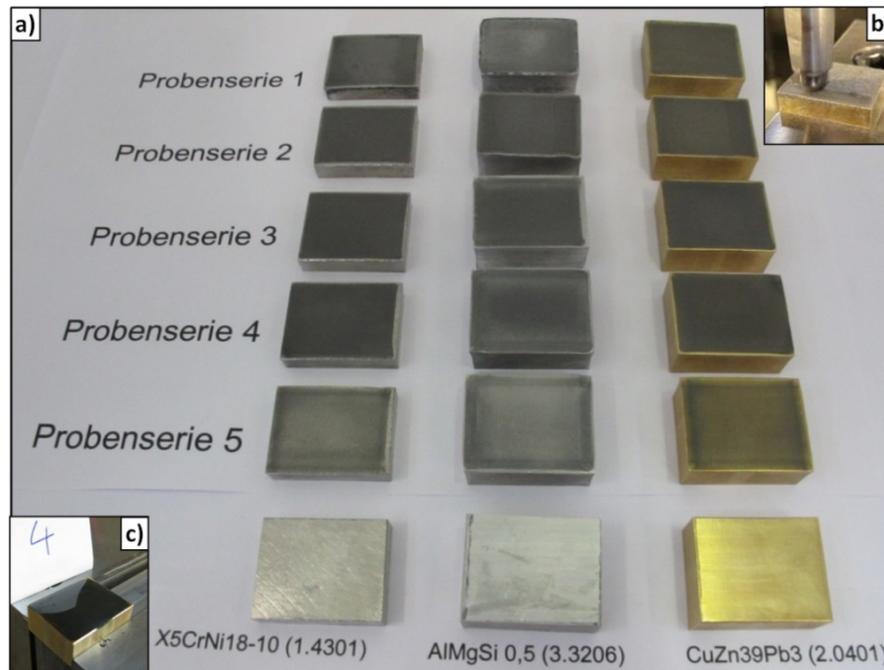


Abbildung 97: Versuche zur Einbettung von Hartstoffen: a) Beschichtete Proben und unbeschichtete Referenzen (vorne) b) Einbettung von mit Sprühkleber fixierten WC-Partikeln c) Probenpräparation der Versuchsreihe 3-5: Suspension WC in Öl

Aus diesem Grund wurde bei der Erstellung der Probenserien 3 bis 5 gänzlich auf die Verwendung von Fixiermitteln für eine erste Aufbringung der Partikel verzichtet. Das WC-Pulver wurde, wie in Abbildung 97c dargestellt, in einer Ölsuspension auf der Probenoberfläche bereitgestellt und durch zweimalige MHP-Bearbeitung mit dieser verbunden. Die Prozessparameter der Bearbeitungsschritte wurden dabei für die einzelnen Serien konstant gehalten, wodurch lediglich die Korngröße der verwendeten WC-Pulver im Zuge dieser drei Versuchsreihen variiert wurde.

Wie anhand von Abbildung 97a ersichtlich ist, konnte durch dieses Vorgehen optisch keine maßgebliche Verschlechterung des Beschichtungsergebnisses festgestellt werden. Es kann im Gegenteil gezeigt werden, dass die Verwendung von Öl als Medium zu optisch homogeneren und gleichmäßigeren Schichten führt. Dieses Resultat ist insbesondere für die Umlegung der beschriebenen Methode auf spätere Anwendungsfelder von Bedeutung, da der Prozess durch den Wegfall besonderer Fixiermittel deutlich vereinfacht werden konnte.

Für die weitere Analyse der erzeugten Oberflächenbeschichtungen wurde daher speziell auf die Proben der Probenserie 3 bis 5 fokussiert, anhand derer der Einfluss der Ausgangskorngröße des Beschichtungsmaterials in Bezug auf die jeweiligen Versuchswerkstoffe betrachtet werden kann. Um eine Änderung der Probenmasse durch das Einbringen der Schichtstoffe beurteilen zu können, wurde das Gewicht der einzelnen Versuchsproben vor sowie nach dem Versuch erfasst. Es kam dabei eine

Talent TE3102S Präzisionswaage der Firma Sartorius mit einer Wiederholgenauigkeit von 0,01g zum Einsatz. Die Messung nach dem Versuch wurde im direkten Anschluss an die jeweilige Probenreinigung (Ultraschallbad in Wasser mit 2% EM-80 Ultraschallkonzentrat) durchgeführt.

Bei einem Vergleich der Differenzmassen zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Ausgangskorngröße in Bezug auf die Massenänderung. Dieser Zusammenhang ist für die einzelnen Materialien in Abbildung 98 durch die Gegenüberstellung der Massendifferenz vor und nach dem Versuch bezogen auf jeweils  $1\text{cm}^2$  der Versuchsfläche dargestellt.

Wie ersichtlich, kommt es beim Einsatz der Pulver geringer beziehungsweise mittlerer Korngröße zu keiner signifikanten Steigerung der Probenmasse infolge der Einbettung des Beschichtungsstoffes. Die Verwendung eines Pulvers hoher Korngröße führt jedoch zu einer materialspezifischen Gewichtserhöhung durch die eingebrachten Hartstoffe. Diese Steigerung der Probenmasse ist im Falle der untersuchten Aluminiumlegierung mit  $0,04 \pm 0,004\text{g/cm}^2$  am höchsten ausgeprägt. Bei der untersuchten Kupferlegierungsprobe kann bei der Anwendung desselben Pulvers eine Zunahme von  $0,022 \pm 0,004\text{g/cm}^2$  verzeichnet werden. Die geringste Steigerung ist letztlich mit  $0,008 \pm 0,004\text{g/cm}^2$  am betrachteten Stahlwerkstoff festzustellen. Der Materialeinfluss dürfte hiermit in naheliegender Weise auf die Härte und Festigkeitseigenschaften des jeweils vorliegenden Versuchsmaterials zurückzuführen sein, wobei es durchaus naheliegend ist, dass der jeweilige, auf das eingebrachte Beschichtungsmaterial zurückzuführende Massenanstieg im Falle härterer und festerer Materialien geringer ausfällt.

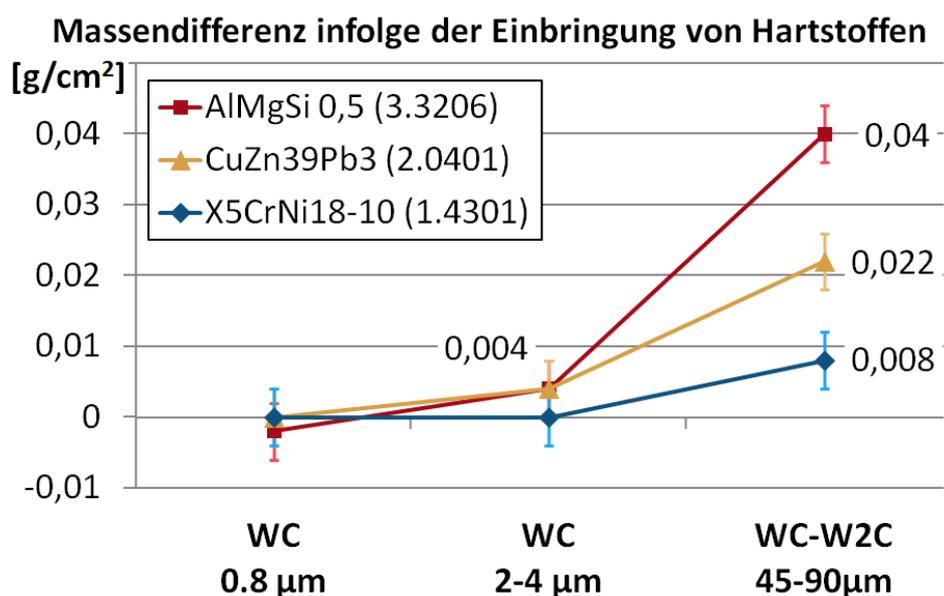


Abbildung 98: Massendifferenz pro  $\text{cm}^2$  Beschichtungsfläche (Serie 3-5)

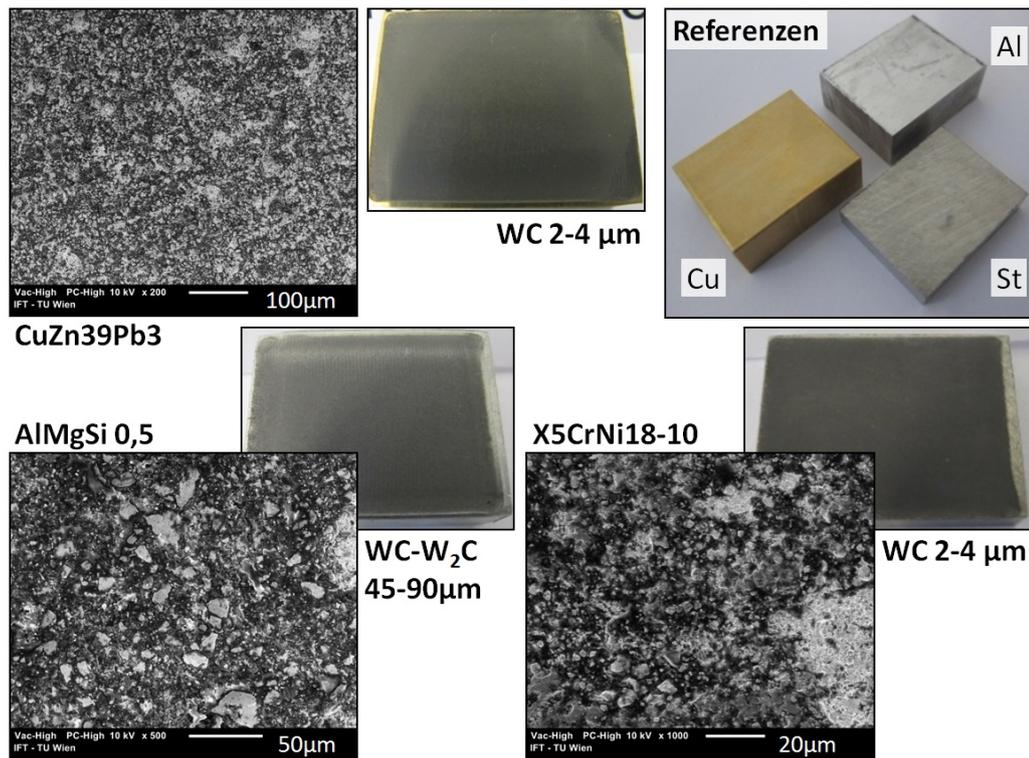


Abbildung 99: REM-Aufnahmen der Beschichtungsergebnisse

Zur näheren Begutachtung der erzeugten Schichten wurden unter Verwendung eines Rasterelektronenmikroskops des Typs JCM-5000 NeoScope (Jeol) Aufnahmen der einzelnen Versuchsprobenoberflächen erstellt. Wie anhand von Abbildung 99 durch die Darstellung einzelner Beispiele veranschaulicht wird, zeigten sich dabei auch infolge unterschiedlicher Vergrößerungen durchaus homogene Hartstoffschichten an den behandelten Proben. Aus diesem Grund kann anhand der dargestellten Untersuchung die grundsätzliche Eignung des vorliegenden Ansatzes zur mechanischen Beschichtung von Oberflächen für die dargestellten Werkstoffe sowie die untersuchten WC-Pulver erkannt werden. Die Ergebnisse sind dabei, wie oben erläutert, in erster Linie auf die Bereitstellung der Beschichtungspartikel in Form einer Öl-WC-Suspension zurückzuführen. Diese Suspension kann in verhältnismäßig einfacher Weise auf der Probenoberfläche zur Verfügung gestellt werden. Zudem ist es denkbar, über eine punktuelle Aufbringung der Beschichtungsmaterialien letztlich auch eine gezielte Beschichtung einzelner, abgegrenzter Bauteilbereiche zu erreichen.

In Hinblick auf das Beschichten großer Flächenbereiche ist allerdings auch auf einen deutlichen Verschleiß des verwendeten MHP-Werkzeugs zu verweisen. Abbildung 100 zeigt hierzu das bei den Untersuchungen eingesetzte Werkzeug. Die deutlich erkennbare Spitzenabnutzung wird durch Rundheitsmessungen dargestellt. Die Messungen zeigen die deutliche Abplattung der Kugel anhand einer negativen radialen Abweichung der vorliegenden Schnittprofile.

## Analyse der Werkzeugspitze nach den Versuchen zum Einbetten von Hartstoffen

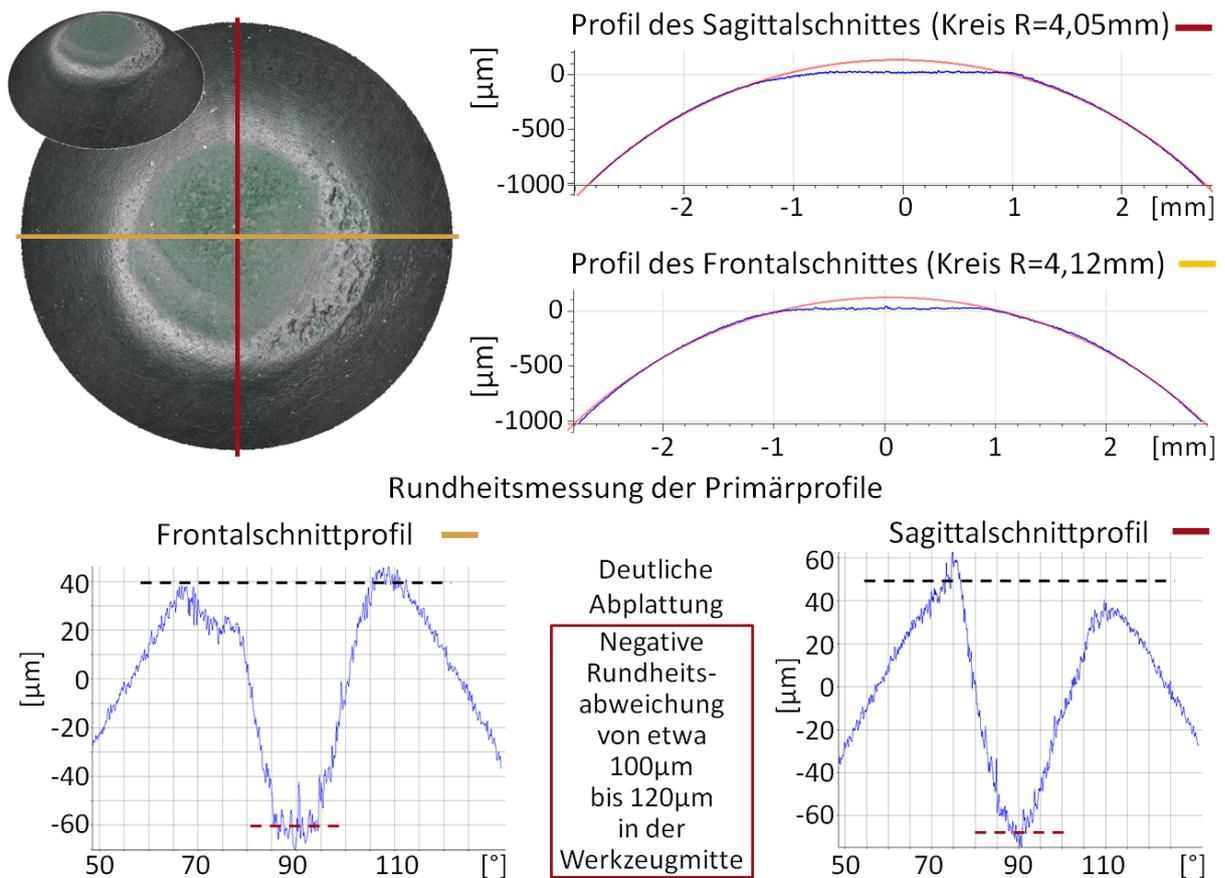


Abbildung 100: Werkzeugverschleißanalyse nach den Untersuchungen zum Einbetten von Hartstoffen

Die Abweichung wird dabei zu einem anhand der kleinsten Fehlerquadrate in das Schnittprofil eingepassten Referenzkreis ermittelt und beträgt im vorliegenden Fall etwa 0,1 bis 0,12mm. Der dargestellte Verschleiß ist allerdings dadurch zu relativieren, dass im Verlauf der dargestellten Untersuchungen keine Verschlechterung des Beschichtungsergebnisses infolge der Änderung der Spitzengeometrie erkannt werden konnte. Hierdurch ist davon auszugehen, dass die Abnutzung eines rein für die Erzeugung von Hartstoffschichten eingesetzten Werkzeugs in gewissen Grenzen weitgehend toleriert werden kann.

#### 7.2.4 Einbettung von Hartstoffen in hochlegiertem Kaltarbeitsstahl

Im Folgenden wird die in den vorangegangenen Versuchen zur Erstellung einer weitgehend homogenen Hartschicht herangezogene Methode anhand des Kaltarbeitsstahls X155CrVMo12 (1.2379) erprobt, welcher insbesondere im Werkzeug- und Formenbau weitreichende Verwendung findet. Dabei werden neben einer näheren Betrachtung der Oberflächentopographie und -rauheit auch Verschleißmessungen dargestellt, die im Zuge des, die Grundlage dieser Arbeit bildenden Forschungsprojekts (siehe Vorwort) durchgeführt wurden. Anhand dieser

in [5] veröffentlichten Ergebnisse lässt sich letztlich die Eignung der im Zuge dieser Arbeit mittels MHP erzeugten Hartstoffbeschichtungen in Bezug auf eine Verschleißreduzierung der behandelten Oberflächen zeigen.

Für die Erstellung der in Abbildung 101a gezeigten hartstoffbeschichteten Proben wurde auf die in Kapitel 7.2.3 für Probenserie 3 und 4 dargestellte Vorgehensweise zurückgegriffen. Die Proben wurden auch hier durch zweimalige Bearbeitung (Prozessparameter siehe Tabelle 33) erstellt, wobei der einzubettende Hartstoff vor der Bearbeitung in einer Suspension in Öl ( $46 \text{ [mm}^2/\text{s]}/40^\circ\text{C}$ ) auf dem Material zur Verfügung gestellt wurde (siehe Tabelle 34). Im Anschluss an die Beschichtung wurden die gezeigten Proben mittels Ultraschallbad (Wasser mit 2% EM-80 Ultraschallkonzentrat) gereinigt.

Neben diesen, anhand der verwendeten Hartstoffpartikel mit WC 2-4 $\mu\text{m}$  und WC-W<sub>2</sub>C 45-90 $\mu\text{m}$  bezeichneten Proben werden zudem zwei Referenzproben betrachtet. Die mit MHP bezeichnete Referenz wurde dabei mit identen Parametern jedoch ohne Vorliegen einer Hartstoff-Öl-Suspension zweimalig MHP-bearbeitet. Zudem wird eine gefräste Referenzprobe (Ref.) untersucht, deren Oberfläche den Ausgangszustand aller übrigen Versuchsproben wiedergibt (siehe Abbildung 101a).

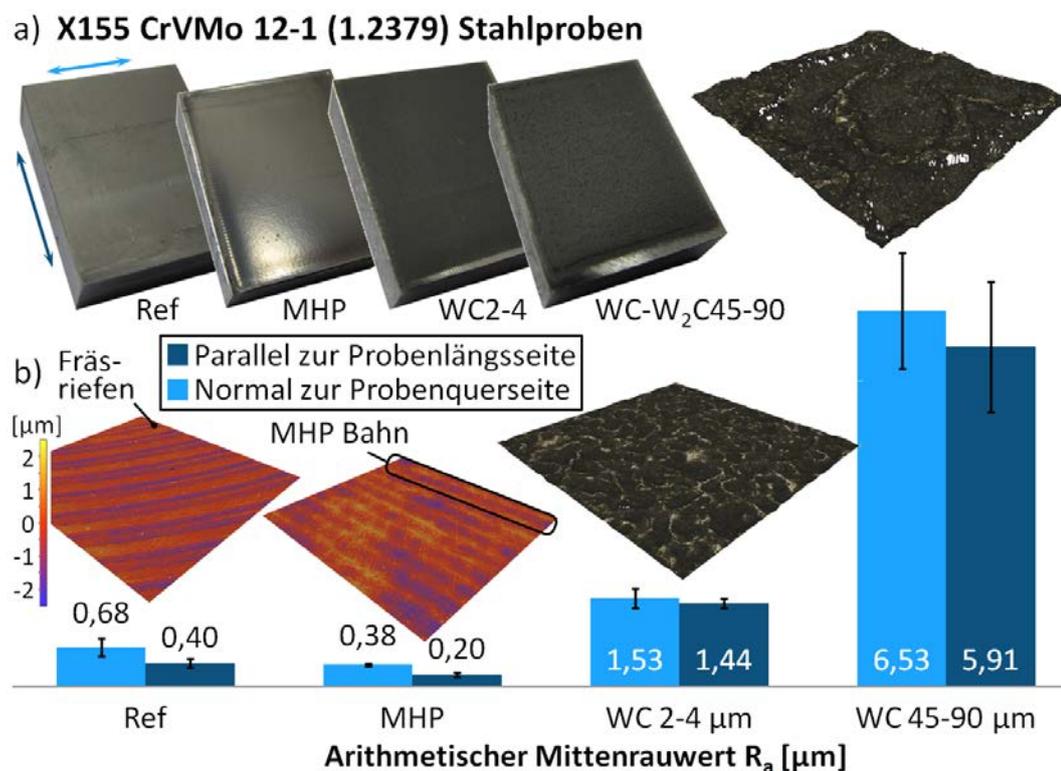


Abbildung 101: Untersuchung an 1.2379: a) Versuchsproben b) Richtungsbezogene Oberflächenrauheit und IFM-Aufnahmen der Referenzen (20x-Objektiv) und der Proben mit eingebetteten Hartstoffen (50x-Objektiv) (vgl. [5])

Abbildung 101b zeigt anhand des Vergleichs der Oberflächentopographien sowie der in unterschiedlichen Richtungen gemessenen arithmetischen Mittenrauheitswerte eine Gegenüberstellung der jeweiligen Probenoberflächen. Es ist ersichtlich, dass für die unter Verwendung von Hartstoffpartikeln bearbeiteten Proben auf eine signifikante Erhöhung der Oberflächenrauheit verwiesen werden kann. Dabei zeigt sich auch ein deutlicher Einfluss der Ausgangskorngröße des verwendeten WC-Pulvers. Eine höhere Pulverkorngröße resultiert dabei in einer deutlich höheren Oberflächenrauheit.

Anhand der in obiger Abbildung dargestellten Topographiemessungen kann an den hartstoffbeschichteten Proben (Realfarbendarstellung, 50x-Objektiv) eine kraterartige Oberfläche, teils durchzogen von grabenförmigen Vertiefungen, erkannt werden. Im Falle der höheren Ausgangskorngröße des Beschichtungsmaterials (WC-W<sub>2</sub>C 45-90µm) stellt sich diese Zerklüftung der Oberfläche deutlich massiver ausgeprägt dar. Wie anhand der Betrachtung der rein MHP-bearbeiteten Probe gezeigt werden kann (siehe entsprechende Topographiemessung in Abbildung 101b; Falschfarbendarstellung, 20x-Objektiv), wird hingegen ohne Vorliegen von Hartstoffen eine Glättung der Ausgangsoberfläche erreicht. Die an der gefrästen Referenzprobe deutlich ersichtlichen Fräsriefen sind dabei nicht mehr zu erkennen. Wie bereits anhand der vorangegangenen Kapitel thematisiert, können ob der verbleibenden MHP-Bearbeitungsbahnen deutlich richtungsbezogene Rauheitswerte gemessen werden.

Die hohe Oberflächenrauheit der über die Verwendung der MHP-Technologie erzeugten Beschichtungen kann auch anhand der im rechten Teil der Abbildung 102 dargestellten REM-Aufnahme der mittels WC-W<sub>2</sub>C 45-90µm beschichteten Probe erahnt werden. Die aus [5] entnommenen Aufnahmen zeigen jedoch auch für den hier betrachteten Werkstoff eine homogene und flächendeckende Oberflächenschicht. Wie in der im rechten Teil der Abbildung dargestellten Aufnahme des Profilschnittes durch die mittels WC-Pulver einer Korngröße von 2-4µm beschichteten Probe ersichtlich, sind die Körner dabei in etwa bis zur Hälfte ihres Ausgangskorndurchmessers in den Grundwerkstoff (Kaltarbeitsstahl 1.2379) eingebettet.

Um die tribologische Auswirkung der dargestellten Beschichtungen näher betrachten zu können, wurden die Proben unter Verwendung eines Schwing-Reib-Verschleiß-Tribometers (SRV Tribometer) untersucht. Wie in Abbildung 103b dargestellt, wurden dabei die zu untersuchenden Probenoberflächen unter Punktkontakt (Kugel-Scheibe Konfiguration) getestet.

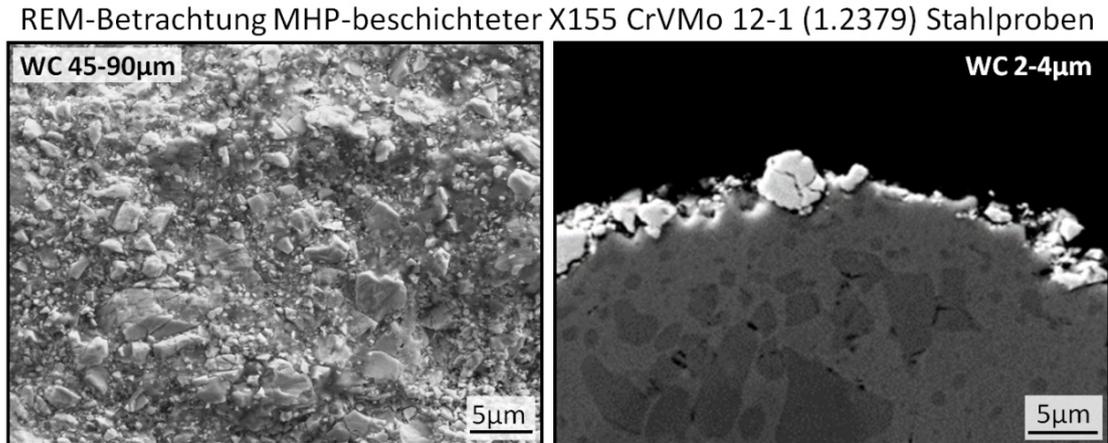


Abbildung 102: REM-Aufnahmen der Oberfläche mit WC-W<sub>2</sub>C 45-90μm (links), Schnittprofil der mit WC 2-4μm beschichteten Probe (rechts) (vgl. [5])

Dabei wurde eine 100Cr6 (1.3505) Stahlkugel des Durchmessers 10mm durchgehend mit einer konstanten Kraft beaufschlagt und in einer oszillierenden Bewegung einer definierten Weglänge (Amplitude: 4mm) und Frequenz (1Hz) über die Oberfläche des Prüfkörpers (der Probe) geführt. Zudem wurde die Kontaktstelle während des Versuchsverlaufs durch die Zuführung von vollsynthetischem, additivfreiem Öl (PAO 8) geschmiert. Für die Bewertung des resultierenden Verschleißes wurden nach einer Gesamtreibstrecke von fünfzig Metern sowohl die an der jeweiligen Probenoberfläche resultierende Verschleißspur als auch der Verschleiß (Verschleißbild und -volumen) am gegen die Probe geriebenen Gegenkörper (100Cr6 Kugel) betrachtet und beurteilt (vgl. [5]).

Abbildung 103a zeigt zunächst das infolge des Kontakts zu den unterschiedlichen Probenoberflächen resultierende Verschleißvolumen der Gegenkörper (100Cr6 Stahlkugeln) und stellt anhand zweier Mikroskopaufnahmen die hier typischen Verschleißbilder dar. Wie ersichtlich, stellt sich im direkten Vergleich zu den in Kontakt mit den nicht beschichteten Referenzen gebrachten Gegenkörpern an den gegen die hartstoffbeschichteten Probenoberflächen zum Einsatz gebrachten Kugeln ein signifikant höherer Verschleiß ein. Das höchste Verschleißvolumen ist dabei an jenem Gegenkörper zu messen, welcher im Zuge der Versuche in Kontakt mit der mittels WC-Pulver der größten Ausgangskorngröße (45-90μm) beschichteten Oberfläche gebracht wurde. Diese Tatsache kann in einen gewissen Zusammenhang mit den im Vorfeld gemessenen Rauheitswerten gesetzt werden. Der höchste Verschleiß am Gegenkörper tritt dabei für jene Fläche in Erscheinung, an welcher die höchsten Rauheitskennwerte ermittelt wurden.

Die hohe Rauheit dieser Probe (WC 45-90μm) ist auch anhand der in Abbildung 103c dargestellten Topographiemessungen ersichtlich.

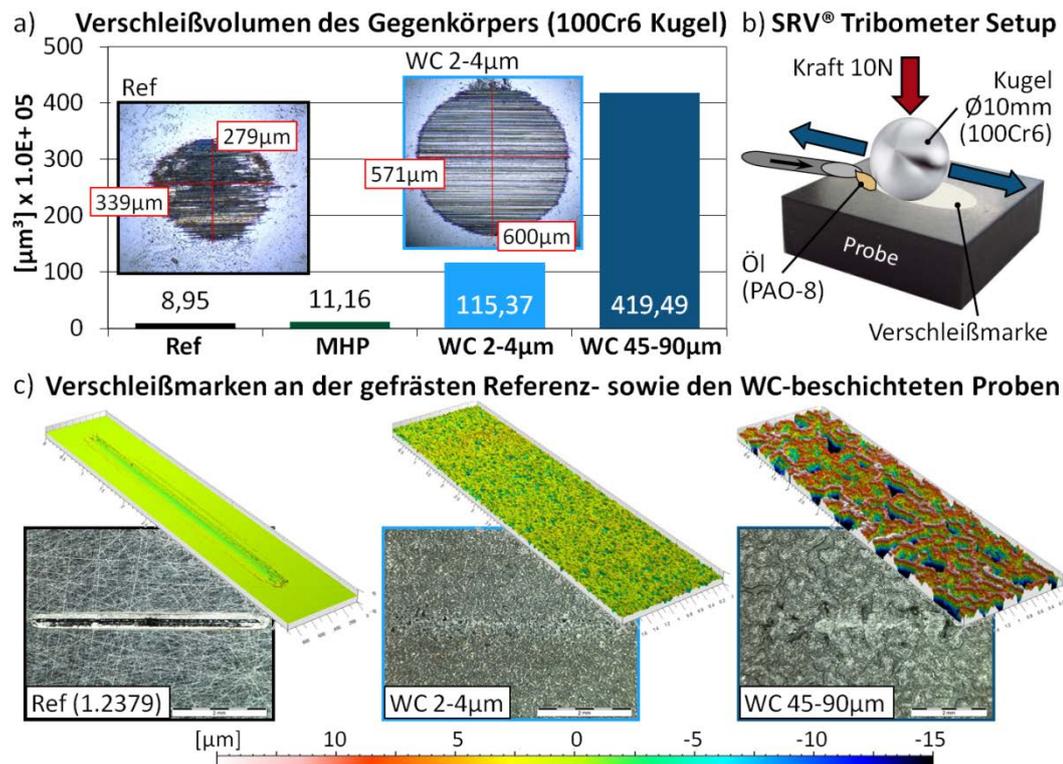


Abbildung 103: Tribologische Untersuchung: a) Verschleißvolumen des Gegenkörpers b) Versuchsaufbau c) Verschleißregionen an den beschichteten Proben und der Referenz (vgl. [5])

Die Abbildung zeigt die an den jeweiligen Versuchsproben nach dem Tribometer-Versuch vorliegenden Verschleißbereiche. Im Gegensatz zur unbeschichteten Referenzoberfläche kann für die MHP-beschichteten Proben hier keine ausgeprägte Verschleißspur infolge des tribologischen Kontakts identifiziert werden.

Hierdurch zeigt sich unter den gegebenen Versuchsbedingungen für den betrachteten Werkstoff infolge der MHP-Beschichtung mittels Hartstoffen durchaus eine Reduktion des Oberflächenverschleißes. Im Zuge einer Verschleißoptimierung ist dabei jedoch auch der gezeigte, erhöhte Verschleiß der mit diesen Oberflächen in Kontakt tretenden Gegenkörper zu berücksichtigen (vgl. [5]).

### 7.2.5 Einbetten von Schmiermittel

Neben der Beschichtung mittels Hartstoffen wurde anhand eines im Folgenden dargestellten Kurzversuchs auch die Möglichkeit der Einbettung von Schmiermittel untersucht. Es wurde dabei anhand von Proben der Aluminiumlegierung AlMgSi 0,5 (3.3206) sowie Stahlproben der Werkstoffe X5CrNi18-10 (1.4301) und X155CrVMo 12-1 (1.2379) die Eignung zur Einbringung des Festschmierstoffs Molybdändisulfid ( $\text{MoS}_2$ ) in die Probenoberflächen untersucht. Der in Pulverform

vorliegende Schmierstoff wurde in einer Suspension in Öl auf die jeweilige Probenoberfläche aufgebracht. Dabei wurde ein Bettbahnöl der Marke Mobil, Vectra 2 (ISO VG 68) verwendet. Die anschließende MHP-Bearbeitung wurde entsprechend der in Kapitel 7.2.3 für die Probenserien 3-5 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Im Anschluss an den jeweiligen Versuch erfolgte eine Reinigung der Probe im Ultraschallbad (Wasser mit 2% EM-80 Konzentrat).

Abbildung 104 stellt anhand von IFM-Messungen die jeweilige Ausgangsoberfläche (Referenz) jener nach dem Beschichtungsversuch und der durchgeführten Probenreinigung ( $\text{MoS}_2$ ) gegenüber. Hierbei kann infolge des untersuchten Ansatzes und unter Verwendung des vorliegenden Festschmierstoffs keine flächendeckende, homogene Oberflächenbeschichtung erkannt werden. An den Probenoberflächen sämtlicher Materialien kam es jedoch infolge der Versuche zur Entstehung von Poren. Dabei könnte die in Realfarbendarstellung ersichtliche dunkle Färbung der Porenbereiche auf das Vorliegen von  $\text{MoS}_2$ -Partikeln hinweisen. Die hier gezeigten Aufnahmen sind jedoch nur bedingt geeignet, ein derartiges Ergebnis nachzuweisen. Im Zuge der gezeigten Betrachtung kann daher nicht mit Sicherheit von der Erreichung einer Schmierstoffeinbringung in die Oberfläche beziehungsweise einer Anlagerung von  $\text{MoS}_2$ -Partikeln gesprochen werden.

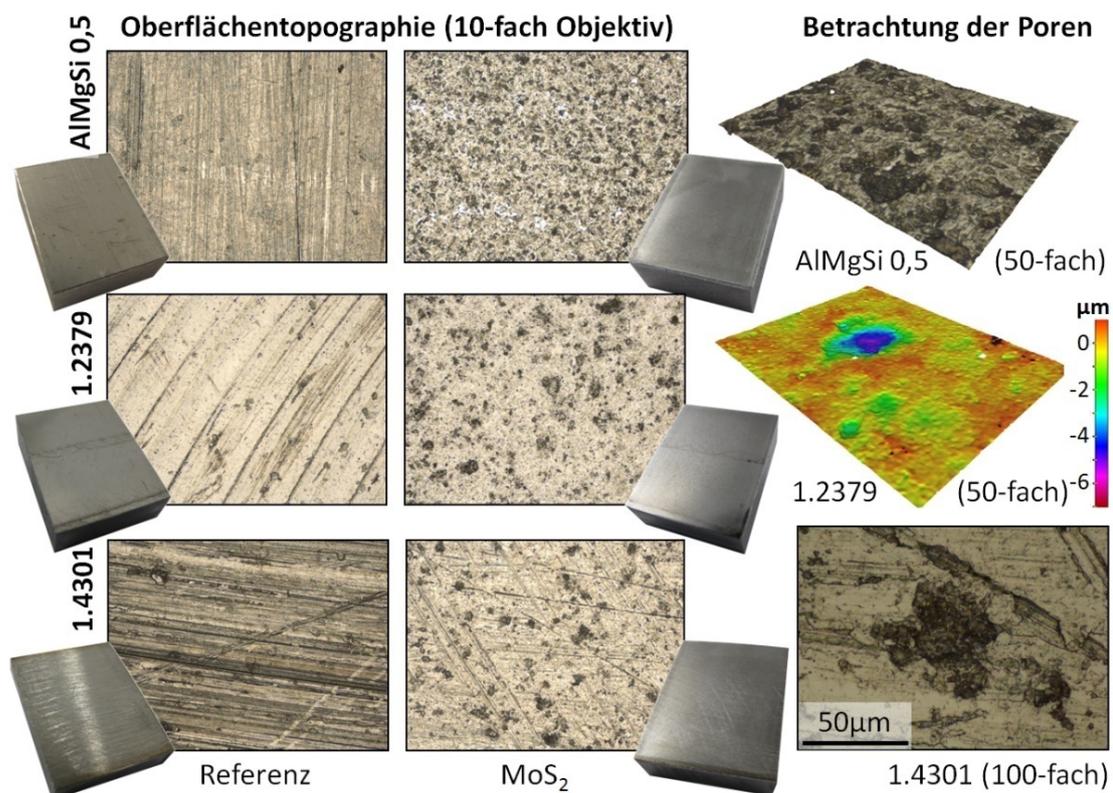


Abbildung 104: Gegenüberstellung der Oberflächentopographien vor und nach dem Versuch der Einbringung von  $\text{MoS}_2$ -Festschmierstoff

Es kann lediglich die Tatsache festgehalten werden, dass die für die Einbettung von Hartstoffen gefundene Vorgehensweise der Beschichtung mittels MHP nicht im direkten Maße auf den Festschmierstoff MoS<sub>2</sub> übertragen werden kann. Im Zuge von weiterführenden Untersuchungen müsste damit erneut über die Betrachtung des Einflusses einer Vorstrukturierung der Oberfläche beziehungsweise auch über die nähere Untersuchung unterschiedlicher Bereitstellungsmethoden des einzubettenden Materials an der Wirkstelle eine Verbesserung der Resultate herbeigeführt werden.

### **7.3 Diskussion der Untersuchungsergebnisse**

Anhand des gegenständlichen Kapitels wurde durch zwei unterschiedliche Ansätze versucht, das Anwendungsspektrum der betrachteten Technologie in Hinblick auf eine gezielte, automatisierbare Funktionalisierung metallischer Bauteiloberflächen zu erweitern.

Dabei konnte durch den Ansatz der Oberflächenstrukturierung mittels formgestalteten MHP-Werkzeugen, insbesondere anhand von Aluminiumlegierungswerkstoffen (AlMgSi 0,5; AlMg 4,5 Mn), die grundsätzliche Möglichkeit der Erstellung definierter, flächendeckender Strukturen gezeigt werden. Obgleich diese Ergebnisse nur bedingt auf härtere Materialien übertragbar sind (siehe Betrachtung des Werkstoffes X3 CrNiMo 13-4; Kapitel 7.1.4), könnte der dargestellte Ansatz für eine NC-gesteuerte gezielte Generierung funktionalisierter (strukturierter) Oberflächenbereiche auf weicheren Werkstoffen zum Einsatz gebracht werden. Eine derartige Funktionalisierung kann dabei auch auf unebenen Bauteilbereichen erfolgen (siehe Kapitel 7.1.5). Zudem kann die vorgeschlagene Methode durchaus für die Bearbeitung größerer Werkstückoberflächen in Betracht gezogen werden. In regelmäßigen, werkzeugeinsatzdauerabhängigen Intervallen muss dabei eine Reinigung des Werkzeuges erfolgen. Unter optimierter Bahnführung kann aber der Werkzeugverschleiß in einem vertretbaren Maß gehalten und ein einheitliches Strukturierungsergebnis erzielt werden (siehe Kapitel 7.1.6). Damit könnte der gezeigte Ansatz letztlich durch eine Vielzahl an denkbaren Varianten der Formgestaltung der strukturierenden MHP-Werkzeuge (unter den hierbei vorliegenden technologischen Beschränkungen; siehe z.B.: Kapitel 7.1.2) weitreichende Möglichkeiten für die Strukturierung von Oberflächen bieten.

Die angestrebte Funktionalität der erzeugten Strukturierungen muss jedoch für jeden Anwendungsfall spezifisch betrachtet werden. Im Zuge des, die Grundlage dieser Arbeit bildenden, Forschungsprojekts (siehe Vorwort) wurden derartige Betrachtungen in Hinblick auf die Reduzierung von Strömungsverlusten infolge der MHP-Strukturierung von Oberflächen durchgeführt. Unter Verwendung eines eigens konstruierten Prüfstandes wurden dabei die, in Kapitel 7.1.4 bis 7.1.6 dargestellten,

rippenförmigen, einschlagübergreifenden Strukturen in Hinblick auf ihre strömungstechnische Relevanz zur Generierung des, als Riblet- bzw. Haifischhaut-bekanntes, reibungsverlustreduzierenden Effekts untersucht (vgl. [60]).

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde neben der Möglichkeit der Oberflächenstrukturierung durch die betrachtete Technologie auch deren Eignung für die mechanische Einbettung von Beschichtungsmaterialien betrachtet (siehe Kapitel 7.2). Durch die Bereitstellung von in Öl suspendierter Hartstoffpartikel auf der in weiterer Folge MHP-bearbeiteten Oberfläche wurde die Erstellung weitgehend homogener Hartschichten für unterschiedliche Grundmaterialien gezeigt. Die dargestellte Methode könnte dabei durch die Tatsache, dass auf eine aufwendige Vorstrukturierung der zu behandelten Flächen verzichtet werden kann (in den Versuchen wurde letztlich von plangefrästen Werkstückoberflächen ausgegangen) und sich unter vertretbarem Aufwand reproduzierbare Ergebnisse realisieren lassen, durchaus das Potential für eine Erweiterung des Anwendungsgebietes der MHP-Technologie eröffnen. Durch den NC-gesteuerten Prozess stellt sich der gezeigte Ansatz insbesondere für eine gezielte Beschichtung einzelner, begrenzter und genau definierter Bauteilbereiche als durchaus geeignet dar. Die dargestellte Methode könnte zudem verhältnismäßig einfach in eine bestehende Prozesskette integriert werden.

Es ist jedoch anzumerken, dass ein effektiver Verschleißschutz der gezeigten Schichten ob der geringen Schichtdicke (siehe Abbildung 102) wohl lediglich für geringe bis mittlere Beanspruchungen zu erwarten ist. Zudem weisen tribometrische Verschleißuntersuchungen darauf hin, dass an den in Kontakt zu den behandelten Flächen tretenden Gegenkörpern ein signifikant erhöhter Verschleiß zu erwarten ist (vgl. [5]). Konkrete Anwendungsfälle müssten damit bei tribologischen Kontakten gefunden werden, für welche der Verschleiß des Gegenkörpers vernachlässigt werden kann beziehungsweise im Vergleich zum auftretenden Verschleiß an dem durch die Beschichtung geschützten Reibpartner eine untergeordnete Rolle spielt.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit widmete sich anhand unterschiedlicher Ansätze der Erweiterung des Anwendungsgebietes der MHP-Technologie, welche anhand von Kapitel 2.2 als direkte, deterministische Oberflächenbehandlung klassifiziert wurde.

Dabei wurde zunächst die Wirkungsweise des vorliegenden Verfahrens für potentielle Anwender dargestellt. Durch die in Kapitel 5 gezeigten Untersuchungen des inkrementellen, sukzessiven und gezielt steuerbaren MHP-Prozesses konnte hierbei der Verlauf der Werkstoffumformung aufgezeigt werden, welche ohne Schädigung des Materialgefüges erfolgt. Die ableitbaren Einflüsse gewisser Stellgrößen wie Schlagdistanz (siehe Kapitel 5.1) oder Bahnversatz (siehe Kapitel 5.3) auf die effektiv vorliegende Umformung wurden letztlich anhand von Kapitel 5.5 für die Optimierung von Bahnführungsstrategien genutzt. Die gezeigten Strategien erscheinen dabei durchaus geeignet, scharfkantige, funktionsbedingt zu erhaltende Bauteilgeometrien vor massiver Deformation durch den Modifikationsprozess zu bewahren.

Des Weiteren wurden anhand von Kapitel 6 die technologischen Potentiale des vorliegenden Verfahrens für unterschiedliche, speziell für neue Applikationen relevant erscheinende Werkstoffe betrachtet. Die MHP-Oberflächenmodifikation zeigt dabei ein hohes Glättungsvermögen in Kombination mit einer deutlichen Induktion von Druckeigenstressungen. Die Behandlung geht zudem mit einer betragsmäßig teilweise gering ausgeprägten, jedoch an unterschiedlichen Werkstoffen nachweisbaren Steigerung der Oberflächenhärte einher. Durch den Einsatz des Verfahrens wird damit die Möglichkeit geboten, die Rauheit von Bauteiloberflächen maschinell zu reduzieren sowie deren Randschichteigenschaften in Bezug auf erhöhte Verschleißbeständigkeit zu modifizieren.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit geben dabei für potentielle Anwender die Möglichkeit einer ersten Abschätzung der technologischen Potentiale und zeigen Anhaltspunkte für die Optimierung einzelner Prozessparameter auf. Zudem wurden Charakteristika der vorliegenden Materialmodifikation, wie die Vorschubrichtungsbezogenheit der Oberflächenrauheit und der eingebrachten Druckeigenstressungen näher betrachtet und erläutert (vgl. Kapitel 6.2.3 und Kapitel 6.3.1). Über die in Kapitel 6.4 gegebene Bestimmung und Angabe der MHP-bedingten Almenintensität stellt die vorliegende Arbeit darüber hinaus eine mögliche Bezugsgröße für einen Vergleich der vorliegenden Technologie zu etablierten Strahlprozessen zur Verfügung.

Anhand von Kapitel 7.1 konnte durch experimentelle Untersuchungen die grundsätzliche Möglichkeit der Strukturierung metallischer Bauteiloberflächen mit funktionell formgestalteten MHP-Werkzeugen gezeigt werden. Der dargestellte Ansatz könnte, wie auch anhand von Kapitel 7.3 zusammenfassend dargestellt, durchaus Potential für eine Erweiterung des Anwendungsspektrums der MHP-Technologie bieten. Für einen spezifischen Anwendungsfall müsste jedoch die Umsetzbarkeit der vorwiegend für Aluminiumlegierungen gezeigten Resultate auf den jeweils betrachteten Werkstoff beurteilt werden. Im Zuge einer derartigen Betrachtung ist auch die Intervallspanne zwischen den notwendigen Reinigungen des strukturierenden MHP-Werkzeugs für den vorliegenden Bauteilwerkstoff zu ermitteln. Zudem muss für eine wirtschaftliche Anwendung des Verfahrens eine Methode zur vereinfachten Werkzeugreinigung gefunden werden, welche eine zwar durchaus effektive, jedoch verhältnismäßig aufwendige Reinigung im Ultraschallbad ersetzen kann. Ein möglicher Lösungsansatz kann dabei in einem regelmäßigen, kurzfristigen Einsatz des für die Strukturierung genutzten Werkzeuges auf gehärteten Materialoberflächen gefunden werden. Ansatzpunkte für die Zweckmäßigkeit eines derartigen Vorgehens wurden im Zuge der experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit erkannt. So zeigten sich an einem mit Aluminium verklebten MHP-Strukturierungswerkzeug nach einer kurzfristigen Bearbeitung eines Stahlwerkstoffs deutlich geringere Verunreinigungen.

Durch die Nutzung der MHP-Technologie zur mechanischen Einbringung von Beschichtungsstoffen konnten im Zuge von Kapitel 7.2 weitgehend einheitliche Hartstoffbeschichtungen erzeugt werden. Der erläuterte Ansatz stellt ob der für verschiedene Grundmaterialien gezeigten, reproduzierbaren und verhältnismäßig einfach zu erreichenden Einbettung von Wolframkarbiden eine weitere Möglichkeit der Anwendung der vorliegenden Technologie dar. Wie bereits in Kapitel 7.3 angemerkt, ist hierbei jedoch die geringe Dicke der erreichten Beschichtungen zu berücksichtigen. Die für Hartstoffe gezeigten Ergebnisse konnten zudem nicht im direkten Maße auf den Festschmierstoff  $\text{MoS}_2$  übertragen werden. Weiterführende Untersuchungen zur Optimierung der Einbettungsstrategie müssten daher für dieses beziehungsweise ähnliche Beschichtungsmaterialien erfolgen.

Zusammenfassend konnten anhand der vorliegenden Arbeit weitreichende Anwendungspotentiale für die betrachtete MHP-Technologie gefunden werden, welche durch neue Einsatzmöglichkeiten erweitert werden konnten. Insbesondere in Bezug auf diese neuen Einsatzgebiete der Technologie scheint eine weiterführende Grundlagenforschung erforderlich, um die hier anhand experimenteller Untersuchungen dargestellten Möglichkeiten auf wirtschaftliche Anwendungen übertragen zu können.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur MFP 3.6 "Tribological effects of structured and densified surfaces" .....	4
Abbildung 2: Prozess des Schlagverdichtens mittels eines elektromagnetischen Aktuatorsystems der Firma accurapuls implementiert auf einem 5-achsigen Bearbeitungszentrum Hermle C20U (vgl. [5]).....	10
Abbildung 3: Vergleich direkter und indirekter Verfahren: a) Wirkungsweise indirekter Verfahren am Beispiel der Laserschockverfestigung [12] b) Darstellung der direkten Oberflächenbehandlung des Festwalzens (vgl. [29]).....	13
Abbildung 4: Einordnung der Technologie des Schlagverdichtens (Machine Hammer Peening) in gängige Verfahren der mechanischen Oberflächenbehandlung (vgl. [13]) .....	14
Abbildung 5: Ideales einfaches kubisches Raumgitter ohne Versetzungen (Mitte), Schraubenversetzung (links) und Stufenversetzung (rechts) (vgl. [14] S.2, 6).....	15
Abbildung 6: Plastische Deformation und Verfestigung: a) Mechanismus von Kaltverfestigung (vgl. [14] S.8, 16) b) Mechanismus der plastischen Deformation (vgl. [14] S.14).....	16
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Deformation im Zuge des Kugel-Ebenen-Kontaktes (vgl. [17] S.9) .....	20
Abbildung 8: Spannungsverteilung in Folge des Kontakts eines kugelförmigen Eindringkörpers mit der Oberfläche (vgl. [18] S.94) .....	22
Abbildung 9: Reduzierung des Zeitbedarfs durch maschinelle Einglättung mittels Festwalzen beziehungsweise Festklopfen (MHP) [27].....	31
Abbildung 10: Illustration der wesentlichen MHP-Prozessparameter .....	37
Abbildung 11: Messprinzip der Fokusvariation (links, [32]) und Illustration der Extrahierung von Schnittprofilen mittels Profilmessung (rechts) .....	40
Abbildung 12: Prozess der MHP-Oberflächenbehandlung und deren Haupteinflussparameter .....	44
Abbildung 13: Messtechnische Auswertung der Einzeleinschlagabdrücke: a) Durchmesserbestimmung anhand von 2D-Bildmessung b) Einschlagtiefenmessung am Querschnittsprofil (vgl. [37]) .....	46
Abbildung 14: Ergebnisse der Einschlagtiefenmessung (linke Skala) sowie der Bestimmung des Einschlagdurchmessers (rechte Skala) .....	47
Abbildung 15: Messtechnische Untersuchung der Schlagwerkzeugspitze Kugelnendurchmesser D=10mm.....	49
Abbildung 16: Untersuchung der Kugelspitze des Werkzeugs D=8mm .....	50
Abbildung 17: Übertragung der Werkzeugtextur auf die Probenoberfläche .....	50
Abbildung 18: Auswertung der Einschlagabdrucktiefe .....	51
Abbildung 19: Gegenüberstellung der Einschlagabdrucktiefen erstellt mittels Kugeldurchmesser D=8mm.....	52

Abbildung 20: Einzeleindrucktiefen in Abhängigkeit des verwendeten Werkzeugdurchmessers .....	54
Abbildung 21: Auswertung der erzeugten Einzelbahnen am Beispiel des Werkstoffs AlMgSi 0,5 (3.3206) .....	55
Abbildung 22: Theoretische Rautiefe des Profilschnittes durch eine Bearbeitungsbahn .....	56
Abbildung 23: Gegenüberstellung der gemessenen Rautiefen für unterschiedliche Werkstoffe und Kugeldurchmesser .....	57
Abbildung 24: Gegenüberstellung der gemessenen und theoretischen Rautiefe für den Werkstoff 1.2379 (D=8mm, t=1mm) .....	59
Abbildung 25: Gegenüberstellung der nach (14) errechneten sowie der gemessenen Rautiefenwerte (Schlagdistanz t=0,6mm) .....	61
Abbildung 26: Untersuchung der bahnrweisen Flächenbearbeitung: a) Probe mit überlagerten Einzelbahnen und Messpositionen für die Profilerstellung b) Profilschnitt durch vier Bearbeitungsbahnen erstellt mit t=0,2-1,2mm c) Überlagerung zweier Profilschnitte zwecks Bestimmung der Materialanteilsflächen (vgl. [13]).....	64
Abbildung 27: Materialanteilsflächen in Abhängigkeit der Schlagdistanz t für die Versuchsfelder s=f=0,1mm und s=f=0,3mm .....	65
Abbildung 28: Bahnversatzabhängige Materialausrichtung unterhalb der Werkzeugspitze anhand des Querschnittsprofils in Prozessrichtung .....	67
Abbildung 29: Übergänge von MHP-bearbeiteter zu unbearbeiteter Fläche: a) Ausbildung des Prozesseinlaufbereichs anhand der Überlagerung der ersten Bearbeitungsbahnen b) Übergangsbereiche eines bearbeiteten Feldes.....	68
Abbildung 30: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Gefügemodifikation im Zuge des Schlagprozesses .....	70
Abbildung 31: Darstellung der Kornstauchung anhand von Gefügaufnahmen.....	71
Abbildung 32: Bildung des Deformationsbereichs anhand von Gefügaufnahmen...	72
Abbildung 33: Überlagerung der Deformationsbereiche einzelner Einschläge.....	74
Abbildung 34: Kantenschutzstrategien: a) Übergangsbereich von MHP-bearbeiteter zu unbearbeiteter Fläche b) Einstellungsoptionen der Kantenschutzfunktion .....	76
Abbildung 35: Messwerte zur Bewertung der Schutzstrategien .....	78
Abbildung 36: Vergleich der Übergangsbereiche ohne und mit Kantenschutz (Strategien 02 und CAM) .....	79
Abbildung 37: Übergangsbereichs ohne Kantenschutz und mit Strategie 05.....	81
Abbildung 38: Querschnittsprofile der Übergangszonen: ohne Kantenschutz, Strategie 13 und CAM-Schutzoption .....	84
Abbildung 39: Prozessbetrachtung der MHP-Technologie .....	85
Abbildung 40: Oberflächenhärte in Abhängigkeit der Schlagdistanz t für den Werkstoff C45E (1.1191).....	89

Abbildung 41: Oberflächenhärte in Abhängigkeit der Schlagdistanz $t$ für den Werkstoff X155 CrVMo 12-1 (1.2379) .....	90
Abbildung 42: Oberflächenhärtewerte der beiden einfach sowie des doppelt bearbeiteten Versuchsfelds und der Referenzfläche.....	92
Abbildung 43: Einfluss von Einschlagabstand ( $s=f$ ) und Kugeldurchmesser $D$ auf den Mittenrauwert gemessen normal auf die Bearbeitungsrichtung (vgl. [37]).....	94
Abbildung 44: Einfluss des Parameters Schlagdistanz $t$ auf die Oberflächenrauheitswerte des Werkstoffs C45E (1.1191) .....	96
Abbildung 45: Einfluss des Parameters Schlagdistanz $t$ auf die Oberflächenrauheitswerte des Werkstoffs X155CrVMo 12-1 (1.2379).....	97
Abbildung 46: Zusammenhang zwischen Oberflächenschnittprofil und Traglastkurve (vgl. [38] S.17).....	98
Abbildung 47: Traglastkurve (Abbott-Firestone-Kurve): a) Vergleich zweier Profile mit identem $R_a$ -Wert (vgl. [39] S.9) b) Illustration und Erläuterung der Kurvenparameter (vgl. [32] S.39) .....	99
Abbildung 48: Traglastkurven der beiden einfach sowie der doppelt bearbeiteten Oberflächen (Werkstoff: 1.4313) .....	100
Abbildung 49: Versuchsprobe mit unterschiedlich vorbearbeiteten Oberflächenbereichen und MHP-Versuchsfeldern variiertes Parameter .....	103
Abbildung 50: Maximale und minimale Ausprägung des Mittenrauwertes $R_a$ gemessen in MHP-Vorschubrichtung.....	104
Abbildung 51: Schlagdistanzeinfluss in Abhängigkeit des Einschlagabstandes .....	106
Abbildung 52: Gegenüberstellung der an Probenbereichen unterschiedlicher Ausgangsrauheit, in Abhängigkeit des Einschlagabstandes ermittelten Rautiefen .....	107
Abbildung 53: Grenze des Prozesspotentials (wellige Oberfläche) sowie technologisch beeinflussbare und unbeeinflussbare Ordnungen der Gestaltabweichung nach DIN 4760 (vgl. [41] S.2).....	108
Abbildung 54: Bearbeitete Versuchsprobe mit Probenfeldern variabler Vorschubgeschwindigkeiten.....	109
Abbildung 55: Oberflächenrauheitswerte $R_a$ und $R_z$ sowie InfiniteFocus-Messungen (10-fach Objektiv) erhoben an den Probenfeldern des Matrixweitenversuchs ....	111
Abbildung 56: Arithmetischer Mittenrauwert $R_a$ sowie InfiniteFocus-Topographiemessungen (10-fach Objektiv) erhoben an den mittels Kugeldurchmesser $D=6\text{mm}$ bearbeiteten Probenfeldern .....	113
Abbildung 57: Vermessen der an den Versuchsfeldern variiertes Vorschubgeschwindigkeiten ( $D=6\text{mm}$ ) verbleibenden Deformationen.....	115
Abbildung 58: Vorschubgeschwindigkeitseinfluss für Kugeldurchmesser $D=10\text{mm}$	116
Abbildung 59: Resultierende Oberflächentopographien aufgrund unterschiedlicher Einzeleinschlaganordnungen (vgl. [37]) .....	117
Abbildung 60: Schlagwinkeleinfluss auf die Oberflächenglättung anhand des Mittenrauwertes $R_a$ (vgl. [5]).....	120

Abbildung 61: Untersuchung der Randbereichstopographie ausgewählter Versuchsfelder .....	121
Abbildung 62: Gemittelte Rautiefen $R_z$ erhoben normal auf die MHP- bzw. Fräsvorschubrichtung (Vorschubrichtungswinkel $\varphi=0^\circ$ ) .....	122
Abbildung 63: Illustration der Probenbearbeitung sowie Darstellung der gemessenen Eigenspannungen an der Oberfläche (vgl. [13]) .....	125
Abbildung 64: Vergleich der Eigenspannungsmessungen basierend auf Röntgendiffraktomerie- und Bohrlochmethode, Versuchsfeld 1 (vgl. [42]) .....	127
Abbildung 65: Betrachtung der Oberflächentopographie, Versuchsfeld 1 .....	128
Abbildung 66: Spezifikation der Versuchsproben mit Härte- und Eigenspannungsausgangszustand (vgl. [43]) .....	129
Abbildung 67: Eigenspannungen gemessen an der Probenoberfläche und ausgewählte Prozessparameter (vgl. [2] S.613) .....	131
Abbildung 68: Maximalwert der eingebrachten Druckeigenspannungen und ausgewählte Prozessparameter (vgl. [2] S.613) .....	132
Abbildung 69: Eigenspannungstiefenprofile der materialabtragenden Prozesse im Vergleich zur MHP-bearbeiteten Probe (vgl. [2] S.612) .....	133
Abbildung 70: Bestimmung der MHP-bedingten Almenintensität .....	135
Abbildung 71: MHP-Almenintensitätswerte in Querrichtung bearbeiteter Teststreifen .....	139
Abbildung 72: MHP-Almenintensitätswerte in Längsrichtung bearbeiteter Teststreifen .....	140
Abbildung 73: Ansatz zur gezielten Strukturierung von Oberflächen (vgl. [60]) .....	143
Abbildung 74: Werkzeuggestaltung mittels Mikro-EDM-Verfahren: a) SX-200 (Sarix) b) Illustration der EDM-Mikrobahnerosion (oben), Elektrodenabrichteprozess (unten) (vgl. [69]) c) Formgestaltete MHP-Werkzeugspitze .....	146
Abbildung 75: Oberflächentopographie nach der Strukturierung mit Dreieck-Werkzeugspitze (vgl. [37]) .....	148
Abbildung 76: Werkzeug für die Erstellung von Mikrostrukturierungen (vgl. [37]) ...	149
Abbildung 77: Verstopfen der Stößelstruktur durch Verwendung von Trockenschmierstoff .....	150
Abbildung 78: Flächendeckende Strukturierung durch Erhöhung der Schlagdistanz .....	151
Abbildung 79: Erfassung der Strukturdimensionen für das Versuchsfeld 6 (vgl. [37]) .....	152
Abbildung 80: Werkzeugspitze mit aufgebrauchten Nuten .....	153
Abbildung 81: Strukturierungsergebnis des zweiten Versuchsfeldes (AlMgSi 0,5)..	155
Abbildung 82: Strukturierte Oberfläche des siebten Versuchsfeldes: Mikroskopaufnahme und IFM-Messung illustriert in Falschfarben .....	156
Abbildung 83: Oberflächenmessdatensätze des strukturierten Versuchsfelds 7 mit extrahiertem Querschnittsprofil .....	156

Abbildung 84: Strukturierung von X3 CrNiMo 13-4 (1.4313) Stahl ohne vorangegangene Glättung der Oberfläche .....	157
Abbildung 85: Strukturierung von Stahl ausgehend von einer MHP-geglätteten Oberfläche.....	158
Abbildung 86: Versuch zur Strukturierung unebener Oberflächen: a) Versuchsansatz zur Erstellung rippenförmiger Strukturen auf einer unebenen Fläche (vgl. [60]) b) Ausrichten des Werkzeugs mittel Spiegel .....	160
Abbildung 87: Bewertung der einzelnen Strukturierungsergebnisse mittels dem 3D-Oberflächenmesssystem InfiniteFocus (Alicona).....	161
Abbildung 88: Beurteilung der Gleichmäßigkeit der erzeugten Strukturen .....	162
Abbildung 89: Bewertung der erzeugten Strukturierung (vgl. [60]) .....	163
Abbildung 90: Untersuchung der Auswirkung von Werkzeugverschleiß und -verunreinigung auf das Strukturierungsergebnis.....	165
Abbildung 91: Strategieoptimierung zur Verschleißminderung: a) IFM-Messung (5x-Objektiv) des verschlissenen Werkzeuges b) Strategieanpassung zur Vermeidung von Querkräften .....	166
Abbildung 92: Werkzeugstandzeit in Abhängigkeit der vorangegangenen Einsatzdauer .....	168
Abbildung 93: Messtechnische Analyse: a) Vergleich des Werkzeuges vor sowie nach der Untersuchung b) Querschnittsprofile extrahiert in der Mitte der ersten sowie letzten Bearbeitungsbahn .....	169
Abbildung 94: Ansatz für die mechanische Einbettung von Beschichtungsmaterialien mittels MHP .....	170
Abbildung 95: Probenoberflächentopographie vor der Beschichtung.....	171
Abbildung 96: Darstellung der Versuchsproben 1 und 3: Oberflächentopographiemessungen des InfiniteFocus (IFM)-Messsystems und Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahme.....	173
Abbildung 97: Versuche zur Einbettung von Hartstoffen: a) Beschichtete Proben und unbeschichtete Referenzen (vorne) b) Einbettung von mit Sprühkleber fixierten WC-Partikeln c) Probenpräparation der Versuchsreihe 3-5: Suspension WC in Öl .....	176
Abbildung 98: Massendifferenz pro cm <sup>2</sup> Beschichtungsfläche (Serie 3-5) .....	177
Abbildung 99: REM-Aufnahmen der Beschichtungsergebnisse .....	178
Abbildung 100: Werkzeugverschleißanalyse nach den Untersuchungen zum Einbetten von Hartstoffen.....	179
Abbildung 101: Untersuchung an 1.2379: a) Versuchsproben b) Richtungsbezogene Oberflächenrauheit und IFM-Aufnahmen der Referenzen (20x-Objektiv) und der Proben mit eingebetteten Hartstoffen (50x-Objektiv) (vgl. [5]).....	180
Abbildung 102: REM-Aufnahmen der Oberfläche mit WC-W <sub>2</sub> C 45-90µm (links), Schnittprofil der mit WC 2-4µm beschichteten Probe (rechts) (vgl. [5]).....	182

Abbildung 103: Tribologische Untersuchung: a) Verschleißvolumen des Gegenkörpers b) Versuchsaufbau c) Verschleißregionen an den beschichteten Proben und der Referenz (vgl. [5]) ..... 183

Abbildung 104: Gegenüberstellung der Oberflächentopographien vor und nach dem Versuch der Einbringung von MoS<sub>2</sub>-Festschmierstoff ..... 184

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Im Zuge der in [24] gegebenen Parameterstudie untersuchte Parameter und deren Ausprägungen (vgl. [24] S.81-82)* .....	27
Tabelle 2: In den gegebenen Literaturstellen betrachtete Werkstoffe .....	33
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung C45E (1.1191)* .....	42
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung X155CrVMo 12-1 (1.2379)* .....	42
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung X3 CrNiMo 13-4 (1.4313)* .....	42
Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung AlMgSi 0,5 (3.3206)* .....	43
Tabelle 7: Untersuchte Werkstoffe und deren Ausgangszustand.....	48
Tabelle 8: Formabweichungsfaktoren der verwendeten Werkzeuge.....	59
Tabelle 9: Prozentuelles Verhältnis der Materialanteilsflächen verschoben gegen und in Prozessrichtung.....	66
Tabelle 10: Parameter für die Erstellung des Ausgangsfeldes .....	77
Tabelle 11: Untersuchte Strategien zur Abklärung des Bahnabstandeinflusses .....	77
Tabelle 12: Anhand der Versuchsfelder der Untersuchung des Bahnversatzeinflusses erhobene Messwerte.....	79
Tabelle 13: Strategien des Kantenschutzes durch Variation von Bahnabstand und Schlagdistanz t.....	80
Tabelle 14: Vergleichswerte der Bahnversatz- und Schlagdistanzvariationsstrategien .....	80
Tabelle 15: Strategien des Kantenschutzes mittels Vorschubrichtungswechsels.....	82
Tabelle 16: Vergleichswerte bei Vorschubrichtungswechsel .....	83
Tabelle 17: Fixierte Parameterwerte der Untersuchungen zur Oberflächenhärteänderung .....	87
Tabelle 18: MHP-Parametersetting des Versuchs der Härteänderung durch Mehrfachbearbeitung anhand von 1.4313 Stahl.....	92
Tabelle 19: Parameter der Fräsoperationen für die Vorbearbeitung der Probenbereiche unterschiedlicher Ausgangsrauheit.....	101
Tabelle 20: Ausgangsrauheitswerte der Probenbereiche aufgrund deren Vorbearbeitung.....	102
Tabelle 21: Parameter der Versuche mit variablen Matrix- und Vorschubwerten....	110
Tabelle 22: Dimensionen der elliptischen Deformationen des Vorschubgeschwindigkeitsversuchs (Kugeldurchmesser 6mm).....	115
Tabelle 23: MHP-Parameter der Schlagwinkeleinflussuntersuchung .....	118
Tabelle 24: MHP-Parametersetting des Versuchs der Beeinflussung des Eigenspannungszustandes .....	124
Tabelle 25: Strategie zur Bearbeitung der 100 Cr 6 Versuchsprobe .....	130

Tabelle 26: Anhand MHP-bearbeiteter A-Teststreifen ermittelte Kennwerte .....	136
Tabelle 27: Prozentuelle Änderung der Bogenhöhe infolge von Mehrfachbearbeitung .....	138
Tabelle 28: Parametersatz für die Strukturierung .....	147
Tabelle 29: MHP-Parameter für das Mikrostrukturieren .....	150
Tabelle 30: MHP-Parameter der Strukturierungsversuche zur Erstellung zusammenhängender Strukturen auf AlMgSi 0,5.....	154
Tabelle 31: MHP-Parameter zur Strukturierung unebener Oberflächen.....	160
Tabelle 32: MHP-Parameter der Einbettungs- und Vorstrukturierungsprozesse.....	172
Tabelle 33: MHP-Parametergrundeinstellungen.....	174
Tabelle 34: Variierte Parameter der einzelnen Probenserien.....	175

**Anhang A – Erhobene Oberflächenrauheitswerte:**

Tabelle A I: Oberflächenrauheit des Versuchs zu Kugeldurchmesser und Einschlagabstandseinfluss.....	I
Tabelle A II: Rauheitswerte des Versuchs zur Mehrfachbearbeitung.....	I
Tabelle A III: Oberflächenrauheitswerte der Schlagdistanzversuche für den Werkstoff C45E (1.1191) ungehärtet.....	II
Tabelle A IV: Oberflächenrauheitswerte der Schlagdistanzversuche für den Werkstoff X155 CrVMo 12-1 (1.2379) ungehärtet.....	II
Tabelle A V: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit geringer Ausgangsrauheit mittels D6mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe .....	III
Tabelle A VI: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit geringer Ausgangsrauheit mittels D8mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe .....	III
Tabelle A VII: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit geringer Ausgangsrauheit mittels D10mm erstellten Versuchsfeldgruppe .....	IV
Tabelle A VIII: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit mittlerer Ausgangsrauheit mittels D6mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe .....	IV
Tabelle A IX: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit mittlerer Ausgangsrauheit mittels D8mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe .....	V
Tabelle A X: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit mittlerer Ausgangsrauheit mittels D10mm erstellten Versuchsfeldgruppe .....	V
Tabelle A XI: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit hoher Ausgangsrauheit mittels D6mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe.....	VI
Tabelle A XII: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit hoher Ausgangsrauheit mittels D8mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe.....	VI
Tabelle A XIII: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit hoher Ausgangsrauheit mittels D10mm erstellten Versuchsfeldgruppe .....	VII
Tabelle A XIV: Oberflächenrauheitswerte der Untersuchung des Matrixabstandeinflusses.....	VII

Tabelle A XV: Richtungsabhängige Oberflächenrauheitswerte der Untersuchung des Einflusses der Vorschubgeschwindigkeit .....	VIII
Tabelle A XVI: Rauheitsmesswerte der Versuche zum Einfluss des Schlagwinkels erhoben an der vorgefrästen, ungehärteten Probe des Werkstoffs X155CrVMo 12-1 (1.2379) .....	IX
Tabelle A XVII: Rauheitsmesswerte der Versuche zum Einfluss des Schlagwinkels erhoben an der vorgefrästen, gehärteten Probe des Werkstoffs X155CrVMo 12-1 (1.2379).....	X

**Anhang B – Erhobene Topographiemesswerte:**

Tabelle B I: Gemessene Einzelabdrucktiefen der Materialien AlMgSi 0,5 und X3 CrNiMo 13 4.....	XI
Tabelle B II: Gemessene Einzelabdrucktiefen für X155 CrVMo 12-1 im gehärteten und ungehärteten Zustand .....	XI
Tabelle B III: Gemessene Einzelabdrucktiefen für den Werkstoff C45E im gehärteten und ungehärteten Zustand .....	XII
Tabelle B IV: Auswertung Einzelbahnen erstellt auf dem Werkstoff AlMgSi 0,5 mittels Schlagdistanz von $t=0,6\text{mm}$ .....	XII
Tabelle B V: Auswertung Einzelbahnen erstellt auf dem Werkstoff C45E mittels Schlagdistanz von $t=0,6\text{mm}$ .....	XIII
Tabelle B VI: Messwerte erhoben an einzelnen Bearbeitungsbahnen erstellt mittel Kugel $D=8\text{mm}$ unter Schlagdistanz $t=1,0\text{mm}$ .....	XIII
Tabelle B VII: Anhand der im Bahnabstand $s=0,1\text{mm}$ überlagerten Einzelbahnen errechnete Differenzflächen .....	XIV
Tabelle B VIII: Anhand der im Bahnabstand $s=0,3\text{mm}$ überlagerten Einzelbahnen errechnete Differenzflächen .....	XV
Tabelle B IX: Anhand der im Bahnabstand $s=0,5\text{mm}$ überlagerten Einzelbahnen errechnete Differenzflächen .....	XVI

## Literaturverzeichnis

- [1] Lehnert, B. (2005) *Dengeln/Die Kunst, Sense und Sichel zu schärfen*, Books on Demand GmbH, Norderstedt, ISBN 3-8334-2586-5.
- [2] Jawahir, I.S., Brinksmeier, E., M'Saoubi, R., Aspinwall, D.K., Outeiro, J.C., Meyer, D., Umbrello, D., Jayal, A.D. (2011) Surface integrity in material removal processes: Recent advances, *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 60/2:603-626.
- [3] Firmenwebsite accurapuls GmbH online unter URL: <http://accurapuls.de/> [18.09.2012].
- [4] Offenlegungsschrift 10 2006 003 004.8 (13.09.2007) Klopfvorrichtung und -verfahren, Deutsches Patent- und Markenamt, München.
- [5] Bleicher, F., Lechner, C., Habersohn, C., Obermair, M., Heindl, F., Rodriguez Ripoll, M. (2013) Improving the tribological characteristics of tool and mould surfaces by machine hammer peening, *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 62/1:239-242.
- [6] Offenlegungsschrift 10 2010 019 547.2 (16.12.2010) Kaltschmiedevorrichtung und Kaltschmiedeverfahren, Deutsches Patent- und Markenamt, München.
- [7] Offenlegungsschrift 10 2009 041 720.6 (06.05.2010) Kaltschmiedevorrichtung, Kaltschmiedeanlage und Verfahren zur Bearbeitung von Metalloberflächen und -werkstücken, Deutsches Patent- und Markenamt, München.
- [8] Cherif, A. (2011) Analyse und Beurteilung gekoppelter thermisch-mechanischer Prozesse zur Randschichtverfestigung, *Forschungsberichte aus dem Institut für Werkstofftechnik–Metallische Werkstoffe der Universität Kassel*, Band 12, kassel university press GmbH, Kassel.
- [9] Schulze, V. (2006) *Modern Mechanical Surface Treatment*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN 978-3-527-31371-6.
- [10] Montross, C.S., Wei, T., Ye, L., Clark, G., Mai, Y-W. (2002) Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review, *International Journal of Fatigue* 24:1021-1036.
- [11] Klocke, F., König, W. (2006<sup>5</sup>) *Fertigungsverfahren 4/Umformen*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-23650-4.
- [12] Tani, G., Orazi, L., Fortunato, A., Ascari, A., Campana, G. (2011) Warm Laser Shock Peening: New developments and process optimization, *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 60/1:219-222.
- [13] Bleicher, F., Lechner, C., Habersohn, C., Kozeschnik, E., Adjassoho, B., Kaminski, H. (2012) Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology, *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 61/1:375-378.
- [14] Bargel, H-J., Schulze, G. (2008<sup>10</sup>) *Werkstoffkunde*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-79296-3.

- [15] Spieß, L., Teichert, G., Schwarzer, R., Behnken, H., Genzel, C. (2009<sup>2</sup>) Moderne Röntgenbeugung/Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker, Vieweg+Teubner/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, ISBN 978-3-8351-0166-1.
- [16] Hertz, H. (1881) Über die Berührung fester elastischer Körper, Journal für die reine und angewandte Mathematik 92:156-171.
- [17] Hermann, I. (2004) Anwendung und Erweiterung der Methode des elastischen Kugeleindruckversuchs zur Bestimmung mechanischer Oberflächeneigenschaften, Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- [18] Johnson, K.L. (1985) Contact mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0 521 34796 3.
- [19] Wied, J. (2006) Machine Polishing of Metal Forming Dies, Master Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [20] Wied, J. (2011) Oberflächenbehandlung von Umformwerkzeugen durch Festklopfen, Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- [21] Wied, J., Scheil, J., Klamser, M., Berger, C. (2011) Impact experiments and finite element simulation of surface roughness reduction by machine hammer peening, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 42/9:827-832.
- [22] Berglund, J., Liljengren, M., Rosén, B-G. (2011) On finishing of pressing die surfaces using machine hammer peening, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 52:115-121.
- [23] Medvedeva, A., Berglund, J., Wied, J., Gunnarsson, S. (2011) Surface characteristics of different tool steels and cast iron after machine hammer peening, Proceedings of the 4th Swedish Production Symposium:212-218.
- [24] Groche, P., Engels, M., Müller, C., Bauer, K. (2009) Optimierung des Abrieb- und Verschleißverhaltens von Werkzeugoberflächen durch Randschichtverfestigung, EFB-Forschungsbericht Nr. 296, EFB Hannover, ISBN 978-3-86776-331-8.
- [25] Groche, P., Engels, M., Müller, C. (2010) WEAR BAHEVIOR OF SHEET METAL FORMING TOOLS MADE FROM NODULAR CAST IRON AFTER MECHANICAL SURFACE TREATMENTS, Transactions of North American Manufacturing Research Institution of SME 38:531-538.
- [26] Groche, P., Engels, M., Müller, C. (2011) Verschleißschutz von Umformwerkzeugen in der Blechumformung durch mechanische Oberflächenverfestigung, Tribologie- und Schmierungstechnik, 58. Jahrgang:5-10.
- [27] Groche, P., Steitz, M. (2011) Prozesskettenverkürzung im Werkzeugbau/Integration von Verfahren der maschinellen Oberflächeneinglättung, wt Werkstattstechnik online Jahrgang 101, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf:655-659.
- [28] Groche, P., Steitz, M. (2011) Prozesskettenverkürzung im Werkzeugbau, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, VDI-Z - Integrierte Produktion 101:22-25.

- [29] Groche, P., Engels, M., Steitz, M., Müller, C., Scheil, J., Heilmaier, M. (2012) Potential of mechanical surface treatment for mould and die production, *International Journal of Materials Research* 103:783-789.
- [30] Groche, P., Steitz, M., Müller, C., Scheil, J. (2012) Einglättung durch Festwalzen und Festklopfen - Handlungsrichtlinien für den effizienten Werkzeug- und Formenbau, *wt Werkstattstechnik online Jahrgang 102*, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf:665-671.
- [31] Pergler, R. (2012) Klopfen fürs perfekte Finish, *Werkzeug & formenbau* 2012/4, Verlag Moderne Industrie, online unter URL: <http://www.werkzeug-formenbau.de/2012/09/klopfen-furs-perfekte-finish/> [20.09.2012].
- [32] Alicona (2013) IF-MeasureSuite Version 4.1/Handbuch DE, Firmenschrift, Alicona Imaging GmbH, Dr.-Auner-Straße 21a, A 8074 Raaba, Graz, Österreich.
- [33] General Electric Company (2007) Krautkramer TIV/Technisches Handbuch und Bedienungsanleitung, Ausgabe 4, Ident-Nr. 28703, Firmenschrift, GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Robert-Bosch-Straße 3,D 50354 Huerth, Deutschland.
- [34] Herzig, N. (2008) Erfassung und Beschreibung des skalierten Fließ-, Verfestigungs- und Versagensverhaltens ausgewählter metallischer Werkstoffe, Dissertation, Technischen Universität Chemnitz.
- [35] ThyssenKrupp (2013) Der Hochdruck-Spezialist/Werkstoff 1.4313 - X 3 CrNiMo 13-4, Firmenschrift, ThyssenKrupp Materials Schweiz AG, Industriestrasse 20, Bronschhofen, CH 9501 Wil, Schweiz, online unter URL: [http://www.thyssenkrupp.ch/documents/Flyer\\_4313\\_WS\\_D.pdf](http://www.thyssenkrupp.ch/documents/Flyer_4313_WS_D.pdf) [11.06.2013].
- [36] Emde, T. (2009) Mechanisches Verhalten metallischer Werkstoffe über weite Bereiche der Dehnung, der Dehnrates und der Temperatur, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [37] Lechner, C., Bleicher, F., Habersohn, C., Bauer, C., Gössinger, S. (2012) The use of machine hammer peening technology for smoothing and structuring of surfaces, *Annals of DAAAM for 2012 & Proceeding of the 23rd International DAAAM Symposium 23/1:331-337*.
- [38] DIN EN ISO 4287 (2010) Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit.
- [39] Jung, S. (2012) Oberflächenbeurteilung/Rauheitsmessung, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart.
- [40] Flores, G. (1992) Grundlagen und Anwendungen des Honens, Vulkan-Verlag, Essen, ISBN 3-8027-2904-8.
- [41] DIN 4760 (1982) Gestaltabweichungen/Begriffe Ordnungssystem.
- [42] Adjassoho, B., Kozeschnik, E., Lechner, C., Bleicher, F., Goessinger, S., Bauer, C. (2012) Induction of residual stresses and increase of surface hardness by machine hammer peening technology, *Annals of DAAAM for 2012 & Proceeding of the 23rd International DAAAM Symposium 23/1:697-703*.

- [43] Brinksmeier, E., Meyer, D. (2011) CIRP-WG "Surface Integrity and Functional Performace of Components" Guideline for the participants of the collaborative work.
- [44] US-Patent 2,350,440 (06.06.1944) Shot Blasting Test, United States Patent Office.
- [45] SAE J442 (2001) Test Strip, Holder, and Gage for Shot Peening.
- [46] Kirk, D. (2007) Peening Intensity Curves, The Shot Peener 21/3:24-30.
- [47] SAE J443 (2010) Procedures for Using Standard Shot Peening Almen Strip.
- [48] Trauth, D., Klocke, F., Schongen, F., Shirobokov, A. (2013) Analyse und Modellierung der Schlagkraft beim elektro-dynamischen Festklopfen zur kraftbasierten Prozessauslegung, UTFScience 2013/III:1-8.
- [49] Paucksch, E., Holsten, S., Linß, M., Tikal, F. (2008<sup>12</sup>) Zerspantechnik/Prozesse, Werkzeuge, Technologien, Vieweg+Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-0279-8.
- [50] Weißbach, W. (2007<sup>16</sup>) Werkstoffkunde/Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-0295-8.
- [51] Kuprin, C. (2013) Verformungsverfestigung bei zyklisch inkrementeller Torsion von Reineisen und dem Stahl 42CrMo4N, Dissertation, Technischen Universität Chemnitz.
- [52] Adjassoho, B., Kozeschnik, E., Lechner, C., Habersohn, C., Bleicher, F., Gössinger, S., Bauer, C., Heindl, F., Tomastik, C., Rodriguez Ripoll, M. (2013) CONTROLLED SURFACE TREATMENT WITH MACHINE HAMMER PEENING, METAL 2013/22<sup>nd</sup> International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, ISBN 978-80-87294-39-0.
- [53] DIN EN ISO 14577 – 1 (2003) Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter.
- [54] Macherauch, E., Zoch, H-W. (2011<sup>11</sup>) Praktikum in Werkstoffkunde, Vieweg+Teubner Verlag/Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-0343-6.
- [55] DIN EN ISO 18265 (2004) Metallische Werkstoffe - Umwertung von Härtewerten.
- [56] VDI-Richtlinie 3137 (1976) Begriffe, Benennungen, Kenngrößen des Umformens, VDI Gesellschaft Produktionstechnik.
- [57] Bühling, L. (2000) Mechanische Charakterisierung von Konstruktionskeramik im oberflächennahen Bereich, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- [58] Peterko, P., Habersohn, C., Lechner, C., Kaminski, H., Jech, M., Bleicher, F. (2011) Untersuchung des Einflusses des Schlagverdichtens auf die tribologischen Eigenschaften von Metalloberflächen, ÖTG Symposium 2011 - Tribologie in Industrie und Forschung / Tribology in Industry and Research.
- [59] VDI-Richtlinie/Entwurf 6221 (2011) Bionik/Funktionale bionische Oberflächen, VDI Gesellschaft Bionik.

- [60] Gössinger, S., Bauer, C., Lechner, C., Bleicher, F. (2012) USING MACHINE HAMMER PEENING TO REALIZE DEFINED SURFACE STRUCTURES IN ORDER TO REDUCE FRICTION IN TURBULENT FLUID FLOWS, Conference proceedings, 17th International Seminar on Hydropower Plants 2012:379-388.
- [61] Zemann, R., Bleicher, F., Zisser-Pfeifer, R. (2012) Electrochemical Micromachining with ultra short voltage pulses; The Archive of Mechanical Engineering LIX/3:314-327, PAN Polish Academy of Sciences - Committee of Machine Design, Warschau, ISSN 0004-0738.
- [62] Klocke, F., König, W. (2007<sup>4</sup>) *Fertigungsverfahren 3/Abtragen, Generieren Lasermeaterialbearbeitung*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-23492-0.
- [63] Weikert, M. (2005) *Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen*, Dissertation, Universität Stuttgart.
- [64] Carl Baasel Lasertechnik (2001) *Benutzerhandbuch SMP100-0189*, Firmenschrift, Carl Baasel Lasertechnik GmbH&Co. KG, Petersbrunner Straße 1b, D 82319 Starnberg, Deutschland.
- [65] Lasertech GmbH, *Dokumentation Lasersoft 3D Version 3.5.1*, Firmenschrift, Gildemeister Lasertec GmbH, Tiroler Strasse 85, D 87459 Pfronten, Deutschland.
- [66] Schuster, R., Fürbeth, W., Mangold, K.-M., Moustafa, E., Mann, O., Richter, R. (2010) *Elektrochemische Mikrobearbeitung von hochlegierten Stählen in nichtwässrigen Elektrolyten unter Anwendung ultrakurzer Spannungspulse*, Abschlussbericht zu dem AiF-Vorhaben 15087 N.
- [67] Schulze, V., Deuchert, M., Ruhs, C., Weber, P., Weingärtner, R. (2011) *Fertigungstechnologien zur Erzeugung hochgenauer Mikrostrukturen und Oberflächen*, Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, ISBN 978-3-86644-747-9.
- [68] Mahdavinejad, R.A., Mahdaminejad, A. (2005) ED machining of WC-Co, *Journal of Materials Processing Technology* 162-163:637-643.
- [69] Richter, C., Krah, T., Büttgenbach, S. (2012) Novel 3D manufacturing method combining microelectrical discharge machining and electrochemical polishing, *Microsystem Technologies* 18:1109-1118.

## Anhang A – Erhobene Oberflächenrauheitswerte

Tabelle A I: Oberflächenrauheit des Versuchs zu Kugeldurchmesser und Einschlagabstandseinfluss

Werkstoff: C45E (1.1191)			Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung
Kugelø	Einschlag-abstand	Messwert	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	
D = 6mm	s=f=0,1mm (v=1200)	Mittelwert	<b>0,92</b>	<b>5,54</b>	<b>0,69</b>	<b>3,97</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm
		Stabw.	0,06	0,41	0,08	0,33	
	s=f=0,3mm (v=3600)	Mittelwert	<b>1,47</b>	<b>6,69</b>	<b>0,54</b>	<b>2,80</b>	
		Stabw.	0,13	0,80	0,03	0,36	
	s=f=0,5mm (v=6000)	Mittelwert	<b>2,02</b>	<b>9,30</b>	<b>1,18</b>	<b>5,63</b>	
		Stabw.	0,10	0,58	0,21	0,90	
D = 8mm	s=f=0,1mm (v=1200)	Mittelwert	<b>0,62</b>	<b>3,55</b>	<b>0,47</b>	<b>2,70</b>	
		Stabw.	0,05	0,15	0,08	0,40	
	s=f=0,3mm (v=3600)	Mittelwert	<b>0,86</b>	<b>4,47</b>	<b>0,43</b>	<b>2,57</b>	
		Stabw.	0,05	0,30	0,07	0,37	
	s=f=0,5mm (v=6000)	Mittelwert	<b>1,64</b>	<b>7,07</b>	<b>0,83</b>	<b>4,04</b>	
		Stabw.	0,09	0,32	0,35	1,03	
D = 10mm	s=f=0,1mm (v=1200)	Mittelwert	<b>0,36</b>	<b>2,36</b>	<b>0,30</b>	<b>1,77</b>	
		Stabw.	0,02	0,35	0,02	0,27	
	s=f=0,3mm (v=3600)	Mittelwert	<b>0,46</b>	<b>2,78</b>	<b>0,29</b>	<b>1,95</b>	
		Stabw.	0,07	0,23	0,07	0,23	
	s=f=0,5mm (v=6000)	Mittelwert	<b>0,55</b>	<b>3,36</b>	<b>0,54</b>	<b>3,12</b>	
		Stabw.	0,05	0,47	0,11	0,42	
Referenzfläche		Mittelwert	<b>1,98</b>	<b>10,91</b>	<b>1,54</b>	<b>8,38</b>	
		Stabw.	0,41	1,83	0,22	1,21	

Messergebnis gegeben durch Mittelwert und Standardabweichung von jeweils sechs Einzelmessungen.

Tabelle A II: Rauheitswerte des Versuchs zur Mehrfachbearbeitung

1.4313	Distanz t [mm]	Normal auf MHP-Vorschubrichtung			In MHP-Vorschubrichtung			Mess-einstellung
		R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>	
		[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	
Mittelwert	t = 0,3	<b>0,17</b>	<b>1,00</b>	<b>1,09</b>	<b>0,11</b>	<b>0,70</b>	<b>0,85</b>	Lc = 0,8mm Lt = 5,6mm
Stabw.		0,01	0,01	0,03	0,01	0,03	0,07	
Mittelwert	t = 1,2	<b>0,77</b>	<b>3,95</b>	<b>4,99</b>	<b>0,51</b>	<b>2,46</b>	<b>2,76</b>	
Stabw.		0,14	0,62	1,28	0,02	0,14	0,25	
Mittelwert	t = 1,2/0,3	<b>0,19</b>	<b>1,08</b>	<b>1,32</b>	<b>0,13</b>	<b>0,74</b>	<b>0,94</b>	
Stabw.		0,01	0,02	0,11	0,03	0,05	0,04	
Mittelwert	Ref.	<b>0,47</b>	<b>2,53</b>	<b>2,61</b>	<b>0,50</b>	<b>2,70</b>	<b>3,13</b>	
Stabw.		0,01	0,08	0,10	0,07	0,27	0,33	

Messergebnis gegeben durch Mittelwert und Standardabweichung von jeweils drei Taktilen Rauheitsmessungen.

*Tabelle A III: Oberflächenrauheitswerte der Schlagdistanzversuche für den Werkstoff C45E (1.1191) ungehärtet*

1.1191	Distanz t	Normal auf MHP-Vorschubrichtung			In MHP-Vorschubrichtung		
		R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>
	[mm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]
<b>Mittelwert</b>	t = 0,3	<b>0,43</b>	<b>2,47</b>	<b>2,92</b>	<b>0,24</b>	<b>1,82</b>	<b>2,31</b>
Stabw.		0,03	0,25	0,33	0,05	0,49	0,75
<b>Mittelwert</b>	t = 0,5	<b>0,47</b>	<b>2,61</b>	<b>3,10</b>	<b>0,26</b>	<b>1,70</b>	<b>2,29</b>
Stabw.		0,03	0,35	0,69	0,05	0,41	0,44
<b>Mittelwert</b>	t = 0,7	<b>0,53</b>	<b>3,02</b>	<b>3,91</b>	<b>0,30</b>	<b>1,95</b>	<b>2,53</b>
Stabw.		0,05	0,27	0,73	0,03	0,32	0,34
<b>Mittelwert</b>	t = 0,9	<b>0,52</b>	<b>2,81</b>	<b>3,24</b>	<b>0,29</b>	<b>1,81</b>	<b>2,25</b>
Stabw.		0,03	0,28	0,54	0,03	0,35	0,83
<b>Mittelwert</b>	t = 1,1	<b>0,58</b>	<b>3,12</b>	<b>3,76</b>	<b>0,35</b>	<b>2,02</b>	<b>2,59</b>
Stabw.		0,05	0,22	0,35	0,04	0,10	0,31
<b>Mittelwert</b>	t = 1,2	<b>0,59</b>	<b>3,22</b>	<b>3,85</b>	<b>0,32</b>	<b>1,92</b>	<b>2,64</b>
Stabw.		0,05	0,25	0,58	0,03	0,22	0,60
<b>Mittelwert</b>	Ref.	<b>1,81</b>	<b>9,47</b>	<b>14,40</b>	<b>2,50</b>	<b>9,95</b>	<b>10,58</b>
Stabw.		0,38	2,43	3,08	0,96	3,06	3,30

Messwerte gegeben als Mittelwert und Standardabweichung von jeweils sechs Einzelmessungen (Grenzwellenlänge L<sub>c</sub>=0,8mm, L<sub>t</sub>=5,8mm).

*Tabelle A IV: Oberflächenrauheitswerte der Schlagdistanzversuche für den Werkstoff X155 CrVMo 12-1 (1.2379) ungehärtet*

1.2379	Distanz t	Normal auf MHP-Vorschubrichtung			In MHP-Vorschubrichtung		
		R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>
	[mm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]
<b>Mittelwert</b>	t = 0,3	<b>0,33</b>	<b>1,77</b>	<b>2,03</b>	<b>0,17</b>	<b>0,94</b>	<b>1,12</b>
Stabw.		0,01	0,13	0,20	0,04	0,19	0,17
<b>Mittelwert</b>	t = 0,5	<b>0,46</b>	<b>2,39</b>	<b>2,84</b>	<b>0,32</b>	<b>1,60</b>	<b>1,95</b>
Stabw.		0,02	0,10	0,24	0,10	0,49	0,61
<b>Mittelwert</b>	t = 0,7	<b>0,55</b>	<b>2,81</b>	<b>3,34</b>	<b>0,35</b>	<b>1,67</b>	<b>2,26</b>
Stabw.		0,07	0,27	0,37	0,06	0,30	0,26
<b>Mittelwert</b>	t = 0,9	<b>0,63</b>	<b>3,33</b>	<b>4,00</b>	<b>0,40</b>	<b>1,92</b>	<b>2,58</b>
Stabw.		0,05	0,29	0,35	0,10	0,45	0,63
<b>Mittelwert</b>	t = 1,1	<b>0,62</b>	<b>3,08</b>	<b>3,79</b>	<b>0,41</b>	<b>2,18</b>	<b>3,21</b>
Stabw.		0,10	0,42	0,78	0,10	0,59	1,08
<b>Mittelwert</b>	t = 1,3	<b>0,70</b>	<b>3,60</b>	<b>4,37</b>	<b>0,44</b>	<b>2,10</b>	<b>2,94</b>
Stabw.		0,08	0,29	0,45	0,10	0,48	0,86
<b>Mittelwert</b>	Ref.	<b>1,50</b>	<b>7,34</b>	<b>10,77</b>	<b>1,10</b>	<b>5,69</b>	<b>8,04</b>
Stabw.		0,63	3,05	8,45	0,20	1,17	1,67

Messwerte gegeben als Mittelwert und Standardabweichung von jeweils sechs Einzelmessungen (Grenzwellenlänge L<sub>c</sub>=0,8mm, L<sub>t</sub>=5,8mm)

Tabelle A V: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit geringer Ausgangsrauheit mittels D6mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe

Geringe Ausgangsrauheit			Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung	
			R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>		
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]		
Kugeldurchmesser D = 6mm	s=f = 0,1mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,17</b>	<b>1,09</b>	<b>0,10</b>	<b>0,66</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm
			Stabw.	0,01	0,10	0,01	0,10	
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,70</b>	<b>3,82</b>	<b>0,32</b>	<b>1,80</b>	
			Stabw.	0,04	0,29	0,04	0,32	
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,83</b>	<b>4,33</b>	<b>0,40</b>	<b>2,35</b>	
			Stabw.	0,06	0,63	0,04	0,31	
	s=f = 0,3mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,39</b>	<b>2,28</b>	<b>0,31</b>	<b>1,94</b>	
			Stabw.	0,03	0,13	0,18	0,59	
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,68</b>	<b>3,31</b>	<b>0,30</b>	<b>1,71</b>	
			Stabw.	0,07	0,21	0,11	0,55	
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,18</b>	<b>5,26</b>	<b>0,65</b>	<b>2,98</b>	
			Stabw.	0,05	0,15	0,33	1,34	
s=f = 0,5mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,78</b>	<b>9,55</b>	<b>1,28</b>	<b>6,37</b>	Lc = 2,5mm Lt = 17,5mm	
		Stabw.	0,15	0,90	0,18	0,85		
	t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,02</b>	<b>11,10</b>	<b>1,29</b>	<b>6,54</b>		
		Stabw.	0,14	0,54	0,28	1,21		
	t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,28</b>	<b>12,35</b>	<b>1,45</b>	<b>7,44</b>		
		Stabw.	0,08	0,69	0,23	1,33		

Tabelle A VI: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit geringer Ausgangsrauheit mittels D8mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe

Geringe Ausgangsrauheit			Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung	
			R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>		
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]		
Kugeldurchmesser D = 8mm	s=f = 0,1mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,14</b>	<b>1,06</b>	<b>0,11</b>	<b>0,76</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm
			Stabw.	0,02	0,17	0,01	0,11	
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,27</b>	<b>1,76</b>	<b>0,21</b>	<b>1,25</b>	
			Stabw.	0,05	0,26	0,03	0,15	
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,68</b>	<b>3,71</b>	<b>0,44</b>	<b>2,43</b>	
			Stabw.	0,09	0,39	0,02	0,19	
	s=f = 0,3mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,52</b>	<b>2,61</b>	<b>0,40</b>	<b>2,03</b>	
			Stabw.	0,01	0,15	0,02	0,10	
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,60</b>	<b>2,99</b>	<b>0,48</b>	<b>2,84</b>	
			Stabw.	0,02	0,10	0,06	1,18	
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,77</b>	<b>3,81</b>	<b>0,73</b>	<b>3,22</b>	
			Stabw.	0,10	0,42	0,14	0,53	
s=f = 0,5mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,83</b>	<b>9,35</b>	<b>1,33</b>	<b>6,51</b>	Lc = 2,5mm Lt = 17,5mm	
		Stabw.	0,20	1,12	0,11	0,26		
	t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,35</b>	<b>12,07</b>	<b>1,83</b>	<b>8,22</b>		
		Stabw.	0,21	1,11	0,03	0,25		
	t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,59</b>	<b>12,85</b>	<b>1,94</b>	<b>9,33</b>		
		Stabw.	0,20	0,92	0,11	0,65		

Tabelle A VII: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit geringer Ausgangsrauheit mittels D10mm erstellten Versuchsfeldgruppe

Geringe Ausgangsrauheit			Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung		
			R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>			
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]			
Kugeldurchmesser D = 10mm	s=f = 0,1mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,06</b>	<b>0,60</b>	<b>0,06</b>	<b>0,44</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm	
			Stabw.	0,004	0,15	0,01	0,07		
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,09</b>	<b>0,63</b>	<b>0,07</b>	<b>0,60</b>		
			Stabw.	0,005	0,02	0,01	0,09		
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,21</b>	<b>1,35</b>	<b>0,15</b>	<b>1,13</b>		
			Stabw.	0,01	0,07	0,02	0,22		
	s=f = 0,3mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,32</b>	<b>2,07</b>	<b>0,29</b>	<b>1,85</b>		Lc = 2,5mm Lt = 17,5mm
			Stabw.	0,08	0,39	0,02	0,19		
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,22</b>	<b>1,51</b>	<b>0,17</b>	<b>1,24</b>		
			Stabw.	0,01	0,05	0,03	0,13		
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,24</b>	<b>1,55</b>	<b>0,22</b>	<b>1,28</b>		
			Stabw.	0,01	0,13	0,03	0,13		
s=f = 0,5mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,65</b>	<b>4,30</b>	<b>0,54</b>	<b>3,46</b>	Lc = 2,5mm Lt = 17,5mm		
		Stabw.	0,03	0,29	0,03	0,11			
	t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,57</b>	<b>3,68</b>	<b>0,46</b>	<b>2,92</b>			
		Stabw.	0,03	0,22	0,07	0,29			
	t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,74</b>	<b>4,20</b>	<b>0,66</b>	<b>3,80</b>			
		Stabw.	0,05	0,32	0,08	0,31			

Tabelle A VIII: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit mittlerer Ausgangsrauheit mittels D6mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe

Mittlere Ausgangsrauheit			Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung		
			R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>			
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]			
Kugeldurchmesser D = 6mm	s=f = 0,1mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,18</b>	<b>1,31</b>	<b>0,09</b>	<b>0,92</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm	
			Stabw.	0,01	0,30	0,02	0,24		
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,74</b>	<b>3,35</b>	<b>0,33</b>	<b>2,24</b>		
			Stabw.	0,12	0,13	0,07	0,64		
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,86</b>	<b>4,74</b>	<b>0,49</b>	<b>3,73</b>		
			Stabw.	0,04	0,48	0,09	1,04		
	s=f = 0,3mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,52</b>	<b>3,39</b>	<b>0,45</b>	<b>3,75</b>		Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm
			Stabw.	0,10	0,79	0,10	0,61		
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,62</b>	<b>3,18</b>	<b>0,67</b>	<b>3,73</b>		
			Stabw.	0,03	0,28	0,07	0,18		
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,13</b>	<b>5,14</b>	<b>0,72</b>	<b>3,53</b>		
			Stabw.	0,08	0,34	0,28	0,99		
s=f = 0,5mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,96</b>	<b>11,52</b>	<b>1,77</b>	<b>10,34</b>	Lc = 2,5mm Lt = 17,5mm		
		Stabw.	0,20	0,77	0,20	0,86			
	t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,22</b>	<b>12,03</b>	<b>1,58</b>	<b>8,94</b>			
		Stabw.	0,22	0,65	0,09	1,21			
	t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,40</b>	<b>13,35</b>	<b>1,94</b>	<b>9,94</b>			
		Stabw.	0,12	0,54	0,41	1,39			

Tabelle A IX: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit mittlerer Ausgangsrauheit mittels D8mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe

Mittlere Ausgangsrauheit				Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung
				R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	
				[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	
Kugeldurchmesser D = 8mm	s=f = 0,1mm	t = 0,2mm	Mittelwert	<b>0,16</b>	<b>1,18</b>	<b>0,13</b>	<b>0,97</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm
			Stabw.	0,07	0,45	0,02	0,10	
		t = 0,7mm	Mittelwert	<b>0,28</b>	<b>1,93</b>	<b>0,25</b>	<b>1,79</b>	
			Stabw.	0,03	0,47	0,03	0,21	
		t = 1,2mm	Mittelwert	<b>0,56</b>	<b>3,44</b>	<b>0,41</b>	<b>2,79</b>	
			Stabw.	0,05	0,53	0,05	0,32	
	s=f = 0,3mm	t = 0,2mm	Mittelwert	<b>0,55</b>	<b>3,17</b>	<b>0,40</b>	<b>3,16</b>	
			Stabw.	0,05	0,78	0,06	0,36	
		t = 0,7mm	Mittelwert	<b>0,60</b>	<b>3,52</b>	<b>0,40</b>	<b>2,44</b>	
			Stabw.	0,04	0,69	0,05	0,20	
		t = 1,2mm	Mittelwert	<b>0,82</b>	<b>4,13</b>	<b>0,71</b>	<b>3,47</b>	
			Stabw.	0,09	0,68	0,15	0,53	
s=f = 0,5mm	t = 0,2mm	Mittelwert	<b>2,25</b>	<b>11,80</b>	<b>1,76</b>	<b>10,64</b>	Lc = 2,5mm Lt = 17,5mm	
		Stabw.	0,18	1,03	0,16	0,54		
	t = 0,7mm	Mittelwert	<b>2,39</b>	<b>12,38</b>	<b>1,73</b>	<b>9,79</b>		
		Stabw.	0,03	0,32	0,21	1,42		
	t = 1,2mm	Mittelwert	<b>2,49</b>	<b>12,97</b>	<b>2,07</b>	<b>10,83</b>		
		Stabw.	0,18	1,17	0,15	0,45		

Tabelle A X: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit mittlerer Ausgangsrauheit mittels D10mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe

Mittlere Ausgangsrauheit				Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung
				R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	
				[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	
Kugeldurchmesser D = 10mm	s=f = 0,1mm	t = 0,2mm	Mittelwert	<b>0,07</b>	<b>0,76</b>	<b>0,07</b>	<b>0,91</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm
			Stabw.	0,004	0,14	0,01	0,19	
		t = 0,7mm	Mittelwert	<b>0,09</b>	<b>0,83</b>	<b>0,08</b>	<b>0,78</b>	
			Stabw.	0,01	0,16	0,01	0,14	
		t = 1,2mm	Mittelwert	<b>0,22</b>	<b>1,37</b>	<b>0,16</b>	<b>1,28</b>	
			Stabw.	0,02	0,14	0,02	0,47	
	s=f = 0,3mm	t = 0,2mm	Mittelwert	<b>0,40</b>	<b>2,37</b>	<b>0,58</b>	<b>4,01</b>	
			Stabw.	0,31	1,51	0,05	0,43	
		t = 0,7mm	Mittelwert	<b>0,37</b>	<b>2,76</b>	<b>0,34</b>	<b>2,98</b>	
			Stabw.	0,14	0,87	0,07	0,37	
		t = 1,2mm	Mittelwert	<b>0,30</b>	<b>2,22</b>	<b>0,24</b>	<b>2,11</b>	
			Stabw.	0,06	0,62	0,03	0,32	
s=f = 0,5mm	t = 0,2mm	Mittelwert	<b>1,04</b>	<b>6,18</b>	<b>1,31</b>	<b>8,12</b>	Lc = 2,5mm Lt = 17,5mm	
		Stabw.	0,37	1,90	0,05	0,32		
	t = 0,7mm	Mittelwert	<b>0,80</b>	<b>5,22</b>	<b>0,87</b>	<b>6,44</b>		
		Stabw.	0,15	0,90	0,10	0,30		
	t = 1,2mm	Mittelwert	<b>0,84</b>	<b>5,52</b>	<b>0,81</b>	<b>6,18</b>		
		Stabw.	0,16	1,31	0,07	0,60		

Tabelle A XI: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit hoher Ausgangsrauheit mittels D6mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe

Hohe Ausgangsrauheit			Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung	
			R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>		
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]		
Kugeldurchmesser D = 6mm	s=f = 0,1mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,17</b>	<b>1,36</b>	<b>0,16</b>	<b>1,37</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm
			Stabw.	0,01	0,25	0,04	0,41	
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,61</b>	<b>3,26</b>	<b>0,29</b>	<b>1,97</b>	
			Stabw.	0,05	0,50	0,07	0,47	
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,93</b>	<b>4,99</b>	<b>0,51</b>	<b>3,94</b>	
			Stabw.	0,06	0,58	0,07	0,74	
	s=f = 0,3mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,60</b>	<b>3,85</b>	<b>0,88</b>	<b>4,95</b>	
			Stabw.	0,19	0,98	0,05	0,54	
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,60</b>	<b>3,37</b>	<b>0,32</b>	<b>2,23</b>	
			Stabw.	0,07	0,35	0,05	0,27	
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,07</b>	<b>5,07</b>	<b>0,65</b>	<b>3,27</b>	
			Stabw.	0,08	0,34	0,28	1,23	
s=f = 0,5mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,85</b>	<b>11,21</b>	<b>1,91</b>	<b>12,45</b>	Lc = 2,5mm Lt = 17,5mm	
		Stabw.	0,17	1,14	0,16	1,09		
	t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,35</b>	<b>12,47</b>	<b>1,51</b>	<b>8,88</b>		
		Stabw.	0,19	0,65	0,44	2,18		
	t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,45</b>	<b>13,38</b>	<b>1,53</b>	<b>8,32</b>		
		Stabw.	0,14	0,80	0,30	1,62		

Tabelle A XII: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit hoher Ausgangsrauheit mittels D8mm Kugel erstellten Versuchsfeldgruppe

Hohe Ausgangsrauheit			Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung	
			R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>		
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]		
Kugeldurchmesser D = 8mm	s=f = 0,1mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,17</b>	<b>1,45</b>	<b>0,19</b>	<b>1,70</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm
			Stabw.	0,03	0,19	0,04	0,32	
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,31</b>	<b>2,25</b>	<b>0,30</b>	<b>2,28</b>	
			Stabw.	0,06	0,46	0,05	0,69	
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,71</b>	<b>4,56</b>	<b>0,53</b>	<b>3,91</b>	
			Stabw.	0,11	0,61	0,05	0,55	
	s=f = 0,3mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,53</b>	<b>3,10</b>	<b>0,55</b>	<b>3,38</b>	
			Stabw.	0,02	0,44	0,08	0,47	
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,56</b>	<b>2,94</b>	<b>0,45</b>	<b>2,60</b>	
			Stabw.	0,02	0,20	0,08	0,50	
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,79</b>	<b>3,91</b>	<b>0,57</b>	<b>3,04</b>	
			Stabw.	0,07	0,41	0,03	0,30	
s=f = 0,5mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,40</b>	<b>12,47</b>	<b>1,94</b>	<b>11,93</b>	Lc = 2,5mm Lt = 17,5mm	
		Stabw.	0,29	1,09	0,06	1,05		
	t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,34</b>	<b>11,45</b>	<b>1,76</b>	<b>9,80</b>		
		Stabw.	0,14	1,19	0,15	0,53		
	t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,80</b>	<b>13,98</b>	<b>1,97</b>	<b>10,00</b>		
		Stabw.	0,12	0,74	0,20	1,01		

Tabelle A XIII: Rauheitswerte der auf dem Probenbereich mit hoher Ausgangsrauheit mittels D10mm erstellten Versuchsfeldgruppe

Hohe Ausgangsrauheit			Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung	
			R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>		
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]		
Kugeldurchmesser D = 10mm	s=f = 0,1mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,11</b>	<b>1,15</b>	<b>0,12</b>	<b>1,14</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm
			Stabw.	0,02	0,22	0,01	0,18	
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,10</b>	<b>1,00</b>	<b>0,10</b>	<b>0,99</b>	
			Stabw.	0,01	0,24	0,01	0,15	
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,34</b>	<b>2,11</b>	<b>0,24</b>	<b>1,76</b>	
			Stabw.	0,02	0,35	0,03	0,46	
	s=f = 0,3mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,51</b>	<b>3,35</b>	<b>0,66</b>	<b>4,72</b>	
			Stabw.	0,25	1,38	0,04	0,66	
		t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,35</b>	<b>2,61</b>	<b>0,31</b>	<b>2,64</b>	
			Stabw.	0,16	1,01	0,08	0,62	
		t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,30</b>	<b>2,06</b>	<b>0,32</b>	<b>2,73</b>	
			Stabw.	0,04	0,32	0,06	0,50	
s=f = 0,5mm	t = 0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,17</b>	<b>7,44</b>	<b>1,98</b>	<b>10,93</b>		
		Stabw.	0,29	2,16	0,14	0,71		
	t = 0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,75</b>	<b>5,03</b>	<b>1,07</b>	<b>7,44</b>		
		Stabw.	0,08	0,78	0,09	0,58		
	t = 1,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,88</b>	<b>5,81</b>	<b>0,80</b>	<b>5,98</b>		
		Stabw.	0,14	1,03	0,13	0,68		

Tabelle A XIV: Oberflächenrauheitswerte der Untersuchung des Matrixabstandeinflusses.

Variierte Matrixweite Werkstoff: C45E (1.1191)			Normal auf MHP-Vorschubrichtung		In MHP-Vorschubrichtung		Mess-einstellung
Ø	Matrix-abstand s=f	Messwert	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	
Kugeldurchmesser D = 6mm	0,05mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,62</b>	<b>3,70</b>	<b>0,49</b>	<b>2,90</b>	Lc = 0,8mm / Lt = 5,6mm
		Stabw.	0,05	0,24	0,04	0,16	
	0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,96</b>	<b>4,73</b>	<b>0,40</b>	<b>2,09</b>	
		Stabw.	0,03	0,32	0,12	0,52	
	0,4mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,41</b>	<b>6,14</b>	<b>0,99</b>	<b>4,11</b>	
		Stabw.	0,07	0,27	0,22	0,90	
	0,6mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,85</b>	<b>8,56</b>	<b>1,64</b>	<b>7,28</b>	
		Stabw.	0,08	0,31	0,12	0,46	
	0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,86</b>	<b>8,86</b>	<b>1,40</b>	<b>8,02</b>	
		Stabw.	0,04	0,21	0,39	1,86	
	0,8mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,94</b>	<b>13,00</b>	<b>2,36</b>	<b>11,90</b>	
		Stabw.	0,13	0,67	0,24	0,99	
	0,9mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,46</b>	<b>13,02</b>	<b>2,51</b>	<b>13,13</b>	
		Stabw.	0,24	0,61	0,18	1,19	
Ref.	<b>Mittelwert</b>	<b>0,43</b>	<b>2,51</b>	<b>0,43</b>	<b>2,51</b>		
	Stabw.	0,11	0,87	0,11	0,87		

Messwerte gegeben als Mittelwert und Standardabweichung von jeweils sechs Einzelmessungen.

Tabelle A XV: Richtungsabhängige Oberflächenrauheitswerte der Untersuchung des Einflusses der Vorschubgeschwindigkeit

Variierter Vorschub Werkstoff: C45E (1.1191)				Normal auf MHP- Vorschubrichtung		In MHP- Vorschubrichtung		Mess- einstellung
∅	Vorschub- geschw.	Einschlag- abstand f	Messwert	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	
				[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	
Kugeldurchmesser D = 6mm	600 mm/min	0,05mm	<b>Mittelwert</b>	<b>3,56</b>	<b>14,22</b>	<b>0,28</b>	<b>2,07</b>	
			Stabw.	0,08	0,42	0,03	0,47	
	2400 mm/min	0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,76</b>	<b>11,08</b>	<b>0,37</b>	<b>2,51</b>	
			Stabw.	0,12	0,40	0,09	0,85	
	4800 mm/min	0,4mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,31</b>	<b>9,90</b>	<b>0,89</b>	<b>4,44</b>	
			Stabw.	0,05	0,34	0,23	1,01	
	720 mm/min	0,6mm	<b>Mittelwert</b>	<b>2,07</b>	<b>9,12</b>	<b>1,89</b>	<b>8,70</b>	
			Stabw.	0,10	0,11	0,56	1,46	
	8400 mm/min	0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,75</b>	<b>9,12</b>	<b>1,65</b>	<b>8,80</b>	
			Stabw.	0,23	1,16	0,21	1,24	
	9600 mm/min	0,8mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,95</b>	<b>9,25</b>	<b>1,67</b>	<b>8,04</b>	
			Stabw.	0,34	0,82	0,60	2,25	
	10800 mm/min	0,9mm	<b>Mittelwert</b>	<b>1,89</b>	<b>9,74</b>	<b>3,40</b>	<b>14,90</b>	
			Stabw.	0,36	1,20	0,25	1,01	
<b>Referenzfläche</b>			<b>Mittelwert</b>	<b>2,90</b>	<b>13,73</b>	<b>1,90</b>	<b>11,73</b>	
			Stabw.	0,69	3,60	0,56	2,01	
Kugeldurchmesser D = 10mm	600 mm/min	0,05mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,82</b>	<b>4,92</b>	<b>0,23</b>	<b>1,90</b>	
			Stabw.	0,07	0,78	0,04	0,48	
	2400 mm/min	0,2mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,29</b>	<b>2,43</b>	<b>0,27</b>	<b>2,00</b>	
			Stabw.	0,02	0,59	0,04	0,46	
	4800 mm/min	0,4mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,43</b>	<b>3,48</b>	<b>0,42</b>	<b>3,15</b>	
			Stabw.	0,03	0,50	0,10	0,63	
	720 mm/min	0,6mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,51</b>	<b>3,86</b>	<b>0,40</b>	<b>3,42</b>	
			Stabw.	0,07	0,56	0,05	0,72	
	8400 mm/min	0,7mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,71</b>	<b>5,97</b>	<b>0,65</b>	<b>4,88</b>	
			Stabw.	0,10	0,68	0,11	0,80	
	9600 mm/min	0,8mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,99</b>	<b>7,32</b>	<b>1,14</b>	<b>8,39</b>	
			Stabw.	0,17	1,53	0,32	2,03	
	10800 mm/min	0,9mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,96</b>	<b>6,53</b>	<b>1,00</b>	<b>6,60</b>	
			Stabw.	0,09	0,50	0,14	0,64	
<b>Referenzfläche</b>			<b>Mittelwert</b>	<b>3,58</b>	<b>18,98</b>	<b>1,78</b>	<b>10,82</b>	
			Stabw.	0,78	1,60	0,34	1,54	

Messwerte gegeben als Mittelwert und Standardabweichung von jeweils sechs Einzelmessungen.

Tabelle A XVI: Rauheitsmesswerte der Versuche zum Einfluss des Schlagwinkels erhoben an der vorgefrästen, ungehärteten Probe des Werkstoffs X155CrVMo 12-1 (1.2379)

1.2379 ungehärtet			Normal auf MHP- Vorschubrichtung		In MHP- Vorschubrichtung	
			R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]
Winkel α= 0°	t = 0,3mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,30</b>	<b>2,08</b>	<b>0,16</b>	<b>1,44</b>
		Stabw.	0,02	0,14	0,01	0,16
	t = 0,5mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,32</b>	<b>1,98</b>	<b>0,21</b>	<b>1,53</b>
		Stabw.	0,02	0,13	0,02	0,14
	t = 0,8mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,40</b>	<b>2,17</b>	<b>0,22</b>	<b>1,43</b>
		Stabw.	0,01	0,10	0,02	0,09
	t = 1,0mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,43</b>	<b>2,55</b>	<b>0,20</b>	<b>1,31</b>
		Stabw.	0,03	0,65	0,02	0,22
Winkel α= 10°	t = 0,3mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,22</b>	<b>1,75</b>	<b>0,17</b>	<b>1,39</b>
		Stabw.	0,01	0,29	0,03	0,18
	t = 0,5mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,25</b>	<b>1,77</b>	<b>0,17</b>	<b>1,30</b>
		Stabw.	0,01	0,20	0,02	0,16
	t = 0,8mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,26</b>	<b>1,71</b>	<b>0,19</b>	<b>1,26</b>
		Stabw.	0,02	0,15	0,04	0,16
	t = 1,0mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,26</b>	<b>1,54</b>	<b>0,19</b>	<b>1,16</b>
		Stabw.	0,03	0,09	0,04	0,21
Winkel α= 30°	t = 0,3mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,19</b>	<b>1,73</b>	<b>0,17</b>	<b>1,40</b>
		Stabw.	0,02	0,24	0,03	0,13
	t = 0,5mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,18</b>	<b>1,63</b>	<b>0,17</b>	<b>1,46</b>
		Stabw.	0,02	0,30	0,03	0,35
	t = 0,8mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,20</b>	<b>1,43</b>	<b>0,15</b>	<b>1,23</b>
		Stabw.	0,01	0,33	0,03	0,32
	t = 1,0mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,21</b>	<b>1,36</b>	<b>0,18</b>	<b>1,63</b>
		Stabw.	0,02	0,10	0,04	0,49
α= 45°	t = 0,3mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,20</b>	<b>1,38</b>	<b>0,15</b>	<b>1,14</b>
		Stabw.	0,01	0,24	0,04	0,36
	t = 0,5mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,25</b>	<b>1,49</b>	<b>0,17</b>	<b>1,13</b>
		Stabw.	0,01	0,12	0,03	0,21
<b>Referenz- fläche</b>		<b>Mittelwert</b>	<b>1,30</b>	<b>8,64</b>	<b>0,94</b>	<b>6,66</b>
		Stabw.	0,10	0,66	0,12	1,38

Messwerte gegeben als Mittelwert und Standardabweichung von jeweils sechs Einzelmessungen (Grenzwellenlänge L<sub>c</sub>=0,8mm, L<sub>t</sub>=5,8mm).

Tabelle A XVII: Rauheitsmesswerte der Versuche zum Einfluss des Schlagwinkels erhoben an der vorgefrästen, gehärteten Probe des Werkstoffs X155CrVMo 12-1 (1.2379)

1.2379 gehärtet			Normal auf MHP- Vorschubrichtung		In MHP- Vorschubrichtung	
			R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>
			[µm]	[µm]	[µm]	[µm]
Winkel α= 0°	t = 0,3mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,47</b>	<b>2,34</b>	<b>0,09</b>	<b>0,66</b>
		Stabw.	0,03	0,11	0,01	0,12
	t = 0,5mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,27</b>	<b>1,52</b>	<b>0,08</b>	<b>0,65</b>
		Stabw.	0,01	0,10	0,01	0,19
	t = 0,8mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,22</b>	<b>1,31</b>	<b>0,09</b>	<b>0,58</b>
		Stabw.	0,01	0,04	0,01	0,10
	t = 1,0mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,39</b>	<b>1,71</b>	<b>0,07</b>	<b>0,50</b>
		Stabw.	0,01	0,04	0,01	0,14
Winkel α= 10°	t = 0,3mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,49</b>	<b>1,97</b>	<b>0,07</b>	<b>0,54</b>
		Stabw.	0,02	0,11	0,01	0,08
	t = 0,5mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,29</b>	<b>1,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,51</b>
		Stabw.	0,005	0,05	0,01	0,05
	t = 0,8mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,25</b>	<b>1,18</b>	<b>0,07</b>	<b>0,48</b>
		Stabw.	0,02	0,12	0,01	0,10
	t = 1,0mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,25</b>	<b>1,07</b>	<b>0,06</b>	<b>0,43</b>
		Stabw.	0,02	0,05	0,01	0,07
Winkel α= 30°	t = 0,3mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,66</b>	<b>2,37</b>	<b>0,08</b>	<b>0,55</b>
		Stabw.	0,02	0,09	0,01	0,09
	t = 0,5mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,62</b>	<b>2,18</b>	<b>0,08</b>	<b>0,52</b>
		Stabw.	0,02	0,08	0,01	0,10
	t = 0,8mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,54</b>	<b>1,90</b>	<b>0,07</b>	<b>0,43</b>
		Stabw.	0,03	0,09	0,01	0,08
	t = 1,0mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,66</b>	<b>2,18</b>	<b>0,06</b>	<b>0,43</b>
		Stabw.	0,01	0,05	0,01	0,09
α= 45°	t = 0,3mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,85</b>	<b>2,98</b>	<b>0,08</b>	<b>0,49</b>
		Stabw.	0,03	0,14	0,01	0,11
	t = 0,5mm	<b>Mittelwert</b>	<b>0,79</b>	<b>2,66</b>	<b>0,08</b>	<b>0,49</b>
		Stabw.	0,03	0,22	0,01	0,09
<b>Referenz- fläche</b>		<b>Mittelwert</b>	<b>0,96</b>	<b>4,20</b>	<b>0,17</b>	<b>1,16</b>
		Stabw.	0,02	0,07	0,03	0,34

Messwerte gegeben als Mittelwert und Standardabweichung von jeweils sechs Einzelmessungen (Grenzwellenlänge L<sub>c</sub>=0,8mm, L<sub>t</sub>=5,8mm).

## Anhang B – Erhobene Topographiemesswerte

Tabelle B I: Gemessene Einzelabdrucktiefen der Materialien AlMgSi 0,5 und X3 CrNiMo 13 4

AlMgSi 0,5				Tiefe [µm]	X3 CrNiMo 13 4				Tiefe [µm]
AlMgSi 0,5 (3.3206)	Kugel D6mm	t = 0,2mm	Mittelwert	34,24	X3 CrNiMo 13 4 (1.4313)	Kugel D6mm	t = 0,2mm	Mittelwert	9,58
			Stabw.	0,79				Stabw.	1,28
		t = 0,6mm	Mittelwert	41,88			t = 0,6mm	Mittelwert	13,09
			Stabw.	2,25				Stabw.	0,81
		t = 1,0mm	Mittelwert	abger.			t = 1,0mm	Mittelwert	18,32
			Stabw.	---				Stabw.	0,84
	Kugel D8mm	t = 0,2mm	Mittelwert	34,15		Kugel D8mm	t = 0,2mm	Mittelwert	13,65
			Stabw.	0,81				Stabw.	0,62
		t = 0,6mm	Mittelwert	45,87			t = 0,6mm	Mittelwert	17,74
			Stabw.	0,86				Stabw.	1,01
		t = 1,0mm	Mittelwert	abger.			t = 1,0mm	Mittelwert	21,92
			Stabw.	---				Stabw.	0,12
Kugel D10mm	t = 0,2mm	Mittelwert	17,18	Kugel D10mm	t = 0,2mm	Mittelwert	nicht untersucht		
		Stabw.	0,94			Stabw.			
	t = 0,6mm	Mittelwert	24,98		t = 0,6mm	Mittelwert			
		Stabw.	0,20			Stabw.			
	t = 1,0mm	Mittelwert	31,88		t = 1,0mm	Mittelwert			
		Stabw.	0,70			Stabw.			

Tabelle B II: Gemessene Einzelabdrucktiefen für X155 CrVMo 12-1 im gehärteten und ungehärteten Zustand

1.2379				Tiefe [µm]	1.2379 gehärtet				Tiefe [µm]
X155CrVMo 12-1 (1.2379)	Kugel D6mm	t = 0,2mm	Mittelwert	18,70	X155CrVMo 12-1 (1.2379) Vakuum gehärtet	Kugel D6mm	t = 0,2mm	Mittelwert	3,80
			Stabw.	0,50				Stabw.	0,15
		t = 0,6mm	Mittelwert	22,57			t = 0,6mm	Mittelwert	5,24
			Stabw.	1,12				Stabw.	0,91
		t = 1,0mm	Mittelwert	26,88			t = 1,0mm	Mittelwert	7,00
			Stabw.	0,45				Stabw.	1,12
	Kugel D8mm	t = 0,2mm	Mittelwert	20,65		Kugel D8mm	t = 0,2mm	Mittelwert	4,56
			Stabw.	1,55				Stabw.	0,52
		t = 0,6mm	Mittelwert	26,72			t = 0,6mm	Mittelwert	7,24
			Stabw.	0,12				Stabw.	0,18
		t = 1,0mm	Mittelwert	31,07			t = 1,0mm	Mittelwert	9,24
			Stabw.	0,07				Stabw.	0,24
Kugel D10mm	t = 0,2mm	Mittelwert	11,04	Kugel D10mm	t = 0,2mm	Mittelwert	nicht auswertbar		
		Stabw.	0,37			Stabw.			
	t = 0,6mm	Mittelwert	12,96		t = 0,6mm	Mittelwert			
		Stabw.	0,74			Stabw.			
	t = 1,0mm	Mittelwert	14,79		t = 1,0mm	Mittelwert			
		Stabw.	2,10			Stabw.			

Tabelle B III: Gemessene Einzelabdrucktiefen für den Werkstoff C45E im gehärteten und ungehärteten Zustand

C45E			Tiefe [µm]	C45E gehärtet			Tiefe [µm]	
C45E (1.1191)	Kugel D6mm	t = 0,2mm	Mittelwert	17,18	Kugel D6mm	t = 0,2mm	Mittelwert	5,26
			Stabw.	1,13			Stabw.	0,79
		t = 0,6mm	Mittelwert	23,14		t = 0,6mm	Mittelwert	5,82
			Stabw.	0,89			Stabw.	0,51
		t = 1,0mm	Mittelwert	27,67		t = 1,0mm	Mittelwert	7,95
			Stabw.	0,61			Stabw.	1,59
	Kugel D8mm	t = 0,2mm	Mittelwert	18,98	Kugel D8mm	t = 0,2mm	Mittelwert	6,08
			Stabw.	0,34			Stabw.	0,67
		t = 0,6mm	Mittelwert	26,69		t = 0,6mm	Mittelwert	8,88
			Stabw.	0,07			Stabw.	0,59
		t = 1,0mm	Mittelwert	29,31		t = 1,0mm	Mittelwert	11,50
			Stabw.	1,29			Stabw.	0,88
Kugel D10mm	t = 0,2mm	Mittelwert	10,71	Kugel D10mm	t = 0,2mm	Mittelwert	2,50	
		Stabw.	0,56			Stabw.	0,57	
	t = 0,6mm	Mittelwert	13,12		t = 0,6mm	Mittelwert	3,60	
		Stabw.	1,08			Stabw.	0,64	
	t = 1,0mm	Mittelwert	16,23		t = 1,0mm	Mittelwert	3,68	
		Stabw.	1,62			Stabw.	0,28	

Tabelle B IV: Auswertung Einzelbahnen erstellt auf dem Werkstoff AlMgSi 0,5 mittels Schlagdistanz von t=0,6mm

AlMgSi 0,5 / t=0,6mm		Tiefe [µm]	Abstand f [µm]		
Bahnvermessung AlMgSi 0,5 (3.3206)	Schlagdistanz t = 0,6mm	Kugel D=6mm			
		v = 6000 mm/min	Mittelwert	12,55	500,48
			Stabw.	1,45	11,57
		v = 9600 mm/min	Mittelwert	27,19	810,17
			Stabw.	0,52	2,28
		Kugel D=8mm			
		v = 6000 mm/min	Mittelwert	10,46	500,39
			Stabw.	1,08	3,00
		v = 9600 mm/min	Mittelwert	26,14	801,37
			Stabw.	0,59	4,38
		Kugel D=10mm			
		v = 6000 mm/min	Mittelwert	3,19	499,56
Stabw.	0,43		13,33		
v = 9600 mm/min	Mittelwert	9,67	800,55		
	Stabw.	0,40	14,22		

Tabelle B V: Auswertung Einzelbahnen erstellt auf dem Werkstoff C45E mittels Schlagdistanz von  $t=0,6\text{mm}$

<b>C45E / <math>t=0,6\text{mm}</math></b>		Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Abstand $f$ [ $\mu\text{m}$ ]		
Einzelbahnvermessung C45E (1.1191)	Schlagdistanz $t = 0,6\text{mm}$	Kugel D=6mm			
		v = 6000 mm/min	<b>Mittelwert</b>	<b>6,43</b>	<b>499,13</b>
			Stabw.	0,53	5,85
		v = 9600 mm/min	<b>Mittelwert</b>	<b>15,27</b>	<b>803,56</b>
			Stabw.	0,27	3,51
		Kugel D=8mm			
		v = 6000 mm/min	<b>Mittelwert</b>	<b>7,14</b>	<b>502,18</b>
			Stabw.	0,71	5,98
		v = 9600 mm/min	<b>Mittelwert</b>	<b>18,93</b>	<b>805,87</b>
			Stabw.	0,57	6,00
		Kugel D=10mm			
		v = 6000 mm/min	<b>Mittelwert</b>	<b>2,53</b>	<b>505,26</b>
Stabw.	1,19		12,08		
v = 9600 mm/min	<b>Mittelwert</b>	<b>5,56</b>	<b>799,57</b>		
	Stabw.	0,69	11,46		

Tabelle B VI: Messwerte erhoben an einzelnen Bearbeitungsbahnen erstellt mittel Kugel D=8mm unter Schlagdistanz  $t=1,0\text{mm}$

Einzelbahnauswertung Werkstoff: X155CrVMo 12-1 (1.2379) / Schlagdistanz $t=1,0\text{mm}$							
<b>1.2379 weich</b>		Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Abst. $f$ [ $\mu\text{m}$ ]	<b>1.2379 hart</b>			
		Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Abst. $f$ [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe [ $\mu\text{m}$ ]	Abst. $f$ [ $\mu\text{m}$ ]		
Ungehärteter Ausgangszustand (217HV)			Gehärteter Ausgangszustand (604HV)				
v = 6000 mm/min	<b>Mittelwert</b>	<b>7,50</b>	<b>501,41</b>	v = 6000 mm/min	<b>Mittelwert</b>	<b>3,59</b>	<b>499,40</b>
	Stabw.	0,54	10,97		Stabw.	0,36	3,44
v = 9600 mm/min	<b>Mittelwert</b>	<b>18,29</b>	<b>801,76</b>	v = 9600* mm/min	<b>Mittelwert</b>	<b>8,99</b>	<b>801,14</b>
	Stabw.	0,19	3,65		Stabw.	0,38	1,77
* ... Keine Überlagerung der Abdrücke -> Einzeleinschlagbahn							

Tabelle B VII: Anhand der im Bahnabstand  $s=0,1\text{mm}$  überlagerten Einzelbahnen errechnete Differenzflächen

<b>Bahnversatz <math>s=0,1\text{mm}</math> / <math>v=1200\text{mm/min}</math></b>							
Differenz von	Schlagdistanz t	Verdrängte Fläche	Gegen Prozessrichtung verschoben	In Prozessrichtung verschoben	Verhältnis * Gegen-/In-Pr.richtung verschoben	Differenz: Verdrängt zu gesamt verschoben	Messwertbildung
	[mm]	$[\mu\text{m}^2]$	$[\mu\text{m}^2]$	$[\mu\text{m}^2]$	[%]	$[\mu\text{m}^2]$	
Einzelbahn zu Ebene	<b>0,2</b>	9096	1025	2244	<b>46%</b>	<b>5827</b>	<b>Mittelwert aus 200 Punkten (Profilbreite: 200,4 <math>\mu\text{m}</math>)</b>
	<b>0,4</b>	12500	2115	2064	<b>102%</b>	<b>8321</b>	
	<b>0,6</b>	15963	2577	4889	<b>53%</b>	<b>8497</b>	
	<b>0,8</b>	20164	3175	4180	<b>76%</b>	<b>12810</b>	
	<b>1,0</b>	27740	4027	5681	<b>71%</b>	<b>18033</b>	
	<b>1,2</b>	30882	4899	8066	<b>61%</b>	<b>17917</b>	
Zwei zu einer Bahn(en)	<b>0,2</b>	3314	1118	1889	<b>59%</b>	<b>306</b>	
	<b>0,4</b>	7221	1066	2383	<b>45%</b>	<b>3772</b>	
	<b>0,6</b>	9573	752	1090	<b>69%</b>	<b>7731</b>	
	<b>0,8</b>	11383	1420	4675	<b>30%</b>	<b>5288</b>	
	<b>1,0</b>	14217	1869	4076	<b>46%</b>	<b>8272</b>	
	<b>1,2</b>	11807	2459	4672	<b>53%</b>	<b>4676</b>	
Drei zu zwei Bahnen	<b>0,2</b>	4232	522	1601	<b>33%</b>	<b>2109</b>	
	<b>0,4</b>	4176	1657	2316	<b>72%</b>	<b>203</b>	
	<b>0,6</b>	5910	1214	4252	<b>29%</b>	<b>445</b>	
	<b>0,8</b>	8741	1036	2641	<b>39%</b>	<b>5063</b>	
	<b>1,0</b>	11286	2205	3993	<b>55%</b>	<b>5088</b>	
	<b>1,2</b>	17281	1201	4339	<b>28%</b>	<b>11741</b>	
Vier zu drei Bahnen	<b>0,2</b>	5166	1311	2394	<b>55%</b>	<b>1461</b>	
	<b>0,4</b>	5976	1536	2001	<b>77%</b>	<b>2439</b>	
	<b>0,6</b>	9702	1242	2318	<b>54%</b>	<b>6142</b>	
	<b>0,8</b>	11414	1323	3732	<b>35%</b>	<b>6358</b>	
	<b>1,0</b>	12070	479	2827	<b>17%</b>	<b>8764</b>	
	<b>1,2</b>	13649	3321	4849	<b>68%</b>	<b>5479</b>	

\*...Prozentuelles Verhältnis der richtungsbezogenen Materialflächen. Ein Wert  $>100\%$  ergibt sich für den Fall, dass die Fläche des gegen die Prozessrichtung verschobenen Materials jene des in Prozessrichtung verschobenen Materialanteils übersteigt.

Tabelle B VIII: Anhand der im Bahnabstand  $s=0,3\text{mm}$  überlagerten Einzelbahnen errechnete Differenzflächen

<b>Bahnversatz <math>s=0,3\text{mm}</math> / <math>v=3600\text{mm/min}</math></b>							Messwert- bildung
Differenz von	Schlag- distanz t	Verdrängte Fläche	Gegen Prozess- richtung verschoben	In Prozess- richtung verschoben	Verhältnis * Gegen-/In- Pr.richtung verschoben	Differenz: Verdrängt zu gesamt verschoben	
	[mm]	$[\mu\text{m}^2]$	$[\mu\text{m}^2]$	$[\mu\text{m}^2]$	[%]	$[\mu\text{m}^2]$	
Einzelbahn zu Ebene	0,2	4757	1482	1503	99%	1772	
	0,4	8180	1668	1315	127%	5197	
	0,6	10812	1880	2797	67%	6135	
	0,8	13228	2522	3690	68%	7015	
	1,0	17876	3874	3946	98%	10055	
	1,2	19360	5925	5937	100%	7498	
Zwei zu einer Bahn(en)	0,2	3082	1452	1069	136%	562	
	0,4	5357	1645	3038	54%	674	
	0,6	7993	1973	2458	80%	3563	
	0,8	8709	2397	3627	66%	2686	
	1,0	11092	3486	4884	71%	2721	
	1,2	14429	3408	4429	77%	6591	
Drei zu zwei Bahnen	0,2	4475	412	1709	24%	2354	
	0,4	5796	1321	2623	50%	1851	
	0,6	7716	2386	3287	73%	2044	
	0,8	12794	2052	4560	45%	6182	
	1,0	12165	4131	5797	71%	2237	
	1,2	11910	3018	7725	39%	1167	
Vier zu drei Bahnen	0,2	4332	497	1680	30%	2155	
	0,4	6363	800	2937	27%	2626	
	0,6	7587	1965	4829	41%	793	
	0,8	9804	2749	4644	59%	2410	
	1,0	12335	2949	4987	59%	4399	
	1,2	15998	2254	7136	32%	6608	

Mittelwert aus 200 Punkten (Profilbreite: 200,4  $\mu\text{m}$ )

\*...Prozentuelles Verhältnis der richtungsbezogenen Materialflächen. Ein Wert >100% ergibt sich für den Fall, dass die Fläche des gegen die Prozessrichtung verschobenen Materials jene des in Prozessrichtung verschobenen Materialanteils übersteigt.

Tabelle B IX: Anhand der im Bahnabstand  $s=0,5\text{mm}$  überlagerten Einzelbahnen errechnete Differenzflächen

<b>Bahnversatz <math>s=0,5\text{mm}</math> / <math>v=6000\text{mm/min}</math></b>							
Differenz von	Schlagdistanz t	Verdrängte Fläche	Gegen Prozessrichtung verschoben	In Prozessrichtung verschoben	Verhältnis * Gegen-/In-Pr.richtung verschoben	Differenz: Verdrängt zu gesamt verschoben	Messwertbildung
	[mm]	$[\mu\text{m}^2]$	$[\mu\text{m}^2]$	$[\mu\text{m}^2]$	[%]	$[\mu\text{m}^2]$	
Einzelbahn zu Ebene	<b>0,2</b>	3393	361	895	<b>40%</b>	<b>2136</b>	<b>Mittelwert aus 850 Punkten (Profilbreite: 1,2755 mm)</b>
	<b>0,4</b>	5760	1592	1180	<b>135%</b>	<b>2988</b>	
	<b>0,6</b>	8440	1496	1958	<b>76%</b>	<b>4986</b>	
	<b>0,8</b>	10600	3101	3083	<b>101%</b>	<b>4416</b>	
	<b>1,0</b>	14047	3376	3983	<b>85%</b>	<b>6688</b>	
	<b>1,2</b>	15642	3276	4316	<b>76%</b>	<b>8051</b>	
Zwei zu einer Bahn(en)	<b>0,2</b>	2892	1191	873	<b>136%</b>	<b>828</b>	
	<b>0,4</b>	5027	1710	728	<b>235%</b>	<b>2589</b>	
	<b>0,6</b>	5064	2872	1762	<b>163%</b>	<b>431</b>	
	<b>0,8</b>	8894	2598	2935	<b>88%</b>	<b>3360</b>	
	<b>1,0</b>	11117	3435	2830	<b>121%</b>	<b>4852</b>	
	<b>1,2</b>	14223	4391	3256	<b>135%</b>	<b>6577</b>	

\*...Prozentuelles Verhältnis der richtungsbezogenen Materialflächen. Ein Wert  $>100\%$  ergibt sich für den Fall, dass die Fläche des gegen die Prozessrichtung verschobenen Materials jene des in Prozessrichtung verschobenen Materialanteils übersteigt.

## Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name: Christoph Lechner  
Geburtsdatum: 15. November 1982  
Geburtsort: Mödling, Niederösterreich  
Nationalität: Österreich  
Familienstand: verheiratet

### Ausbildung

Seit 08/2011 **Technische Universität Wien**; Doktorats Studium der technischen Wissenschaften Maschinenbau

10/2003 – 03/2011 **Technische Universität Wien**; Diplom Studium Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau  
Diplomarbeit: „*Technologie des 3D-Abtragslasern*“  
Sponson: 24. März 2011

09/1997 – 06/2002 **HTBLuVA** (2340 Mödling)  
Fachrichtung Maschinenbau  
Maturaabschluss: 25. Juni 2002

09/1993 – 06/1997 **Bundesrealgymnasium** (2380 Perchtoldsdorf)

09/1989 – 06/1993 **Volksschule** Rodaun (1230 Wien)

### Beschäftigungsverhältnisse

Seit 05/2011 **Technische Universität Wien**  
Projektassistent  
Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

02/2011 – 03/2013 **AC<sup>2</sup>T research GmbH**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Österreichisches Kompetenzzentrum für Tribologie

02/2011 – 05/2011 **Technische Universität Wien**  
Projektmitarbeiter  
Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

10/2003 – 01/2011 **W. Heiss Ges.m.b.H.**  
Assistenz der GF  
Bauunternehmen – Rammtechnik