



Technische Universität Wien
Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien

DISSERTATION

BEEINFLUSSUNG DER RANDSCHICHT DURCH DISKRETE MIKROUMFORMUNG

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

ausgeführt am
E311 - Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien
der Technischen Universität Wien eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

durch
Dipl.-Ing.(FH) Stephan Krall, MSc
Matr.Nr. 1228440

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

Begutachtet von

Prof. Dr. Konrad Wegener
Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigung – ETH Zürich
Leonhardstrasse 21
8092 Zürich
Schweiz

Prof. Dr.-Ing. Michael Weigand
Institut für Konstruktionswissenschaften
und Produktentwicklung – TU Wien
Getreidemarkt 9
1060 Wien
Österreich

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Dissertation

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, 04.10, 2019

Unterschrift

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, Erkenntnisse über die Auswirkungen der System- und der Stellgrößen auf die Prozess- und die resultierenden Wirkgrößen eines mechanischen Oberflächenbearbeitungsprozesses, dem sogenannten maschinellen Oberflächenhämmern (engl. Machine Hammer Peening - MHP), zu gewinnen. Das Verfahren basiert auf einem oszillierenden Hammerkopf, der wiederholt auf eine Werkstückoberfläche trifft. Eine Aktorik, welche die Hammerkopfbewegung ausführt, wird an einer Werkzeugmaschine oder einem Roboter befestigt und entlang einer vorgegebenen Bahn geführt. Gemäß der VDI 3416 verwendet die Technologie ein Aktorsystem, um die Oberflächenrauheit zu reduzieren, die Oberflächenhärte zu steigern und oberflächennahe Druckeigenspannungen zu erzeugen. Darüber hinaus wird in dieser Arbeit ein umfassendes Verständnis des gesamten Bearbeitungsprozesses, basierend auf Maschinenuntersuchungen sowie dem Vergleich verschiedener MHP-Aktorsysteme, geschaffen. Um jedoch gezielte Oberflächenstrukturen herstellen zu können, ist die Kopplung zwischen der Bahndynamik des Maschinensystems und der Bewegung des Hammerkopfes erforderlich. Aufgrund der NC-gesteuerten Positionierung und der präzisen Werkzeugführung zeigt der MHP-Prozess auch die Fähigkeit – unter der Anwendung funktional gestalteter Werkzeuge – definierte Mikrostrukturen auf einer Werkstückoberfläche herzustellen. Im Gegensatz zu Beschichtungstechniken zur Funktionalisierung von Oberflächen erfolgt die Herstellung durch einen Mikroumformprozess. Diese Tatsache, in Kombination mit der Möglichkeit der Phasenumwandlung des Kristallgitters einer metastabilen austenitischen CrNi-Legierung hin zu einer martensitischen Struktur durch den Einsatz des genannten Verfahrens, birgt großes Potenzial dieser Technologie. Um die Eignung eines piezoelektrischen Aktors zur Herstellung von Mikrostrukturen zu überprüfen, werden Versuche am Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-1 (1.2343) durchgeführt. Neben der Strukturierung der Oberfläche wird die durch plastische Verformung induzierte Phasenumwandlungen an einem metastabilen austenitischen CrNi-Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) untersucht. Untersuchungen werden an einem Roboter sowie an Fräsbearbeitungszentren durchgeführt. Als Aktoriken sind ein elektromagnetisches, ein pneumatisches, sowie ein piezoelektrisches Aktorsystem Bestandteil der Untersuchungen. Im speziellen ist es der piezoelektrische Aktor welcher in dieser Arbeit herangezogen wird um Mikrostrukturen auf der Oberfläche eines Warmarbeitsstahles herzustellen. Ausgehend von diesen geschaffenen Mikrostrukturen auf Formeinlege Teile für ein Spritzgusswerkzeug wird in einem nachgelagerten Spritzgussprozess gezeigt, dass die Oberflächen am Kunststoff-Formteil wasserabweisende Eigenschaften aufweisen. Im Bereich der induzierten Phasenumwandlungen eines CrNi-Werkstoffes kann in den oberen Schichten des Werkstücks eine Phasenumwandlung von einer metastabilen austenitischen in eine martensitische Phase erreicht werden.

Abstract

The objective of this research is to gain knowledge about the effects of the system- and the independent variables on the dependent variables and the resulting material properties of a mechanical surface treatment process, called machine hammer peening (MHP). MHP is based on an oscillating hammer head which strikes repeatedly on a workpiece surface. The actuator, which provides the tool movement, is attached to a machine tool or a robot in order to treat the surface with well-directed impacts. According to VDI 3416, the technology uses an actuator system to reduce surface roughness, increase surface hardness, and induce near surface compressive residual stresses. Moreover, a comprehensive understanding of the entire machining process, based on machine investigations as well as the comparison of different MHP actuators, is created in this work. However, to achieve distinctively oriented surface structures and patterns the coupling between the tool path motion and the actuator motion dynamics is required. When producing defined surface structures to influence the surface integrity by the use of MHP, the acceleration of the machining system has to be considered. Apart from the named surface properties, structured tools can also be applied for surface treatment processes to create defined surface textures. In the past, these surface properties were achieved by advanced coatings or additional finishing technologies. While both work, they have their limitations. Coatings wear off over time. This fact, in combination with the possibility of phase transformation of the crystal lattice of a processed metastable austenitic to martensitic structure by the application of machine hammer peening, contains great potential. For this purpose, a coupling between the impact frequency of the MHP-system and the speed distribution on the tool path must be realized. Along with adapted NC-controlled motion of the machining system, a predictable sequence of contacts between the tool and the workpiece can be achieved. Further, to verify the suitability of an investigated piezoelectric actuator to create microstructures, experiments are carried out on the hot work tool steel X38CrMoV5-1 (1.2343). In addition to surface texturing, the deformation induced phase transformations on a metastable austenitic CrNi material X5CrNi 18-10 (1.4301) is investigated. As a result, it is possible to create deterministic patterns on the surfaces of workpieces and influence the surface characteristics. Experimental investigations have been performed using a KUKA robot KR30-3 equipped with an electromagnetic actuator system. Another application for a vibration-based process was shown by creating micro-structured surfaces with a piezoelectric actuator for a subsequent mold injection process which show hydrophobic surface conditions on the plastic molded part. Finally, due to plastic deformation of the crystalline steel material, as caused by machine hammer peening treatment in the upper layers of the workpiece, phase transformations may be achieved, from a metastable austenitic phase to a martensitic phase. The results obtained in this project show the potential for expanded application of mechanical surface treatments, like machine hammer peening.

gewidmet meiner Familie.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Vorwort.....	3
1 Einleitung	13
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	17
2.1 Maschinelles Oberflächenhämmern.....	17
2.2 MHP-Technologien zur Oberflächenbearbeitung.....	18
2.3 MHP-Aktortechnologie	21
2.3.1 Patentrecherche.....	23
2.3.2 Pneumatisch angetriebene Aktorsysteme	24
2.3.3 Elektrodynamisches Aktorsystem	27
2.3.4 Mechanische Systeme	29
2.3.5 Piezoelektrische Systeme	30
2.3.6 Sonotroden Systeme	31
2.3.7 Elektromagnetisches Aktorsystem.....	32
2.4 Nomenklatur in der MHP-Bearbeitung	34
2.5 Wirkgrößen bei der MHP-Bearbeitung	36
2.5.1 Plastische Deformation durch die MHP-Bearbeitung.....	37
2.5.2 Beschichten durch die MHP-Bearbeitung	39
2.5.3 Beeinflussung der Oberflächenrauheit durch die MHP-Bearbeitung	40
2.5.4 Erzeugung funktionaler Oberflächen durch Mikrostrukturen.....	42
2.5.5 Einfluss der MHP-Bearbeitung auf die Kaltverfestigung	43
2.5.6 Beeinflussung des Spannungszustandes	45
2.5.7 Änderung des Werkstoffgefüges.....	46
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	49
4 Prozess des maschinellen Oberflächenhämmerns	51
4.1 Maschinensystem als Werkzeugträgersystem	52
4.1.1 Einfluss des dynamischen Maschinenverhaltens	55
4.1.2 Einfluss des statischen Maschinenverhaltens	58
4.1.3 Einfluss der Bahninterpolation und der Bearbeitungsstrategie	61

4.2 Steuerung des Einzelschlages der E-MHP-Aktorik.....	68
4.3 Modellbasierte Beschreibung	76
4.3.1 Prozessmodell auf Basis der Energiebilanz.....	77
4.3.2 FEM-Modell der Energieumsetzung im Einzeleinschlag.....	78
4.3.3 Ergebnis der Simulation zur Energiebeschreibung.....	78
4.4 Einfluss des Werkstück-Werkstoff.....	85
4.4.1 Versuchsbeschreibung und Auswertung	87
4.4.2 Versuchsdurchführung.....	88
4.4.3 Einfluss auf die Kaltverfestigung.....	91
4.4.4 Einfluss auf die Rauheit	96
5 Oberflächenstrukturierung durch Mikroumformung	103
5.1 Entwicklung einer Aktorik zur Mikrostrukturierung	104
5.1.1 Piezoelektrische Grundlagen und Entwurfsprozess	105
5.1.2 Vorversuche.....	110
5.2 Antriebsauslegung.....	111
5.2.1 Aufbau der Aktorik zur Mikrostrukturierung.....	115
5.2.2 Messtechnische Evaluierung der Aktorik.....	118
5.3 Werkzeuge zur Mikrostrukturierung	121
5.4 Versuchsdurchführung und Auswertung	123
5.5 Strukturierte Formeinsätze.....	131
6 Gefügeumwandlung durch Mikroumformung.....	139
6.1 Grundlagen zur Phasenumwandlung.....	139
6.2 Versuchsdurchführung und Auswertung	144
6.3 Beschreibung der Umformarbeit	154
6.4 Aufbringen von Signaturen.....	158
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	163
Abbildungsverzeichnis	167
Tabellenverzeichnis	171
Literaturverzeichnis.....	173

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien der Technischen Universität Wien unter der Leitung von Herrn Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher, dem ich an dieser Stelle recht herzlich Danke.

Bei Herrn Prof. Dr. Konrad Wegener von der ETH Zürich als auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Weigand von der TU Wien möchte ich mich für die Begutachtung der Arbeit bedanken.

Ein besonderer Dank ist zudem an Martin Fuchs, Jens Brier, Helmut Caudr, Markus Prießnitz, Thomas Weiler, Christoph Lechner und Elke Krall gerichtet. Der größte Dank gilt jedoch meiner gesamten Familie und meiner Partnerin Yvonne.

Die Untersuchung der verformungsinduzierten Martensitbildung konnte durch die großzügige Unterstützung der Machine Tool Technologies Research Foundation (MTTRF) erfolgen. Ein weiterer Dank gilt der Universitären Service-Einrichtung für Transmissionselektronenmikroskopie (USTEM) und dem Institut für Werkstoffwissenschaften an der Technischen Universität Wien für die Unterstützung und Nutzung ihrer Einrichtungen.

Teile dieser Arbeit entstanden während der inhaltlichen Betreuung und Bearbeitung des FFG geförderten Projektes HaPTec - Hammer Peening Technologie mit der Kurzbeschreibung: „*Weiterentwicklung des maschinellen Oberflächenhämmerns zur Ausweitung des industriellen Einsatzgebietes*“ mit der FFG Projektnummer: 846119, sowie des ebenfalls FFG geförderten Projektes mit dem Titel SEPIM - Surface Engineering in Plastic Injection Molding, mit der FFG Projektnummer: 853742.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
<i>2,5D</i>	Zweieinhalbdimensional
<i>2D</i>	Zweidimensional
<i>3D</i>	Dreidimensional
<i>A1 - A6</i>	Roboterachsen 1 bis 6
<i>AB</i>	A-B-Signal
<i>AG</i>	Aktiengesellschaft
<i>AISI</i>	American Iron and Steel Institute
<i>Al</i>	Aluminium
<i>BAZ</i>	Bearbeitungszentrum
<i>bbc</i>	Body centered cubic
<i>BT50</i>	Steilkegelaufnahme in der Größe 50
<i>CAD</i>	Computer-aided design
<i>CCPM</i>	Color coded phase map
<i>CrNi</i>	Chrom Nickel Legierung
<i>CT</i>	Curie Temperatur
<i>CuZn</i>	Kupfer Zinn Legierung
<i>DIP</i>	Deterministic impact peening
<i>DMG</i>	Deckel Maho Gildemeister
<i>E/A</i>	Eingabe /Ausgabe
<i>EBSD</i>	Electron backscatter diffraction
<i>EDM</i>	Electrical discharge machining
<i>E-MHP</i>	Elektrodynamisches MHP-System
<i>EN</i>	Europäische Norm
<i>ER32</i>	Spannzange in der Nenngroße 32
<i>F</i>	False, als Wert einer Booleschen Variable
<i>FE</i>	Finite Elemente
<i>FEI</i>	Field electron and ion company
<i>FEM</i>	Finite-Elemente-Methode
<i>FFG</i>	Forschungs-Förderungs-Gesellschaft
<i>FFT</i>	Fast-fourier-transformation
<i>FWHM</i>	Full width at half maximum
<i>Gpa</i>	Giga Pascal
<i>HaPTec</i>	Hammer peening technology
<i>HBM</i>	Hottinger Baldwin Messtechnik
<i>HiFIT</i>	High frequency impact treatment
<i>HM</i>	Hartmetall
<i>HP</i>	High pressure
<i>HSK63</i>	Hohlschaftkegel in der Größe 63

<i>HV05</i>	Vickers Härte mit 0,5kp Prüfkraft
<i>HV1</i>	Vickers Härte mit 1kp Prüfkraft
<i>Hz</i>	Hertz
<i>IAM-WK</i>	Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde
<i>IFT</i>	Institut für Fertigungstechnik und Photonischer Technologien
<i>IKV</i>	Institut für Kunststoffverarbeitung
<i>IPF</i>	Inverse pole figure
<i>ISO</i>	International organization for standardization
<i>KIT</i>	Karlsruher Institut für Technologie
<i>kp</i>	Kilopond
<i>LBV</i>	Lichtenegger und Bloech
<i>LCR</i>	Widerstand, Induktivität und Kapazität
<i>MHP</i>	Machine hammer peening
<i>MKD</i>	Monokristalliner Diamant
<i>M-MHP</i>	mechanisches MHP-System
<i>Mpa</i>	Mega Pascal (10^6 Pascal)
<i>NC</i>	Numeric control
<i>NI</i>	National Instruments
<i>PIT</i>	Pneumatic impact treatment
<i>P-MHP</i>	Pneumatische MHP-System
<i>PTP</i>	Poit to point
<i>PZ</i>	Piezo
<i>PZ-MHP</i>	Piezo MHP-System
<i>PZT</i>	Blei-Zirkonat-Titanat
<i>Q+T</i>	Quenched and tempered
<i>Ra</i>	Arithmetischen Mittenrauwert
<i>RPUP</i>	Rotating pin ultrasonic peening
<i>RWTH</i>	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
<i>Rz</i>	Gemittelte Rautiefe (auch Zehnpunkthöhe)
<i>SEPIIM</i>	Surface engineering in plastics injection molding
<i>SiC</i>	Silizium-Karbid
<i>SK</i>	Schalenkörper, Steilkegel
<i>SP</i>	Standard pressure
<i>SRV</i>	Schwingung, Reibung und Verschleiß
<i>St</i>	Stahl
<i>T</i>	True, als Wert einer Booleschen Variable
<i>TCP</i>	Tool centre point
<i>TEM</i>	Transmissionselektronenmikroskopie
<i>TIV</i>	Trough indenter viewing
<i>TRIP</i>	Transformation Induced Plasticity
<i>UB</i>	Ultrasonic burnishing
<i>UCFT</i>	Ultrasonic cold forging treatment

<i>UIP</i>	Ultrasonic impact peening
<i>UIT</i>	Ultrasonic impact treatment
<i>UKP</i>	Ultrakurzpuls
<i>UNP</i>	Ultrasonic needle peening
<i>UNSM</i>	Ultrasonic nano-crystal surface modification
<i>UP</i>	Ultrasonic peening
<i>UST</i>	Ultrasonic shock treatment
<i>USTEM</i>	Univ. Service-Einrichtung für Transmissionselektronenmikroskopie
<i>VDI</i>	Verein Deutscher Ingenieure
<i>vgl.</i>	Vergleiche
<i>WB</i>	Workbench
<i>WC-Co</i>	Wolframkarbid Kobalt
<i>WS</i>	Werkstück
<i>WZ</i>	Werkzeug
<i>X</i>	Abszissenachse
<i>Y</i>	Ordinatenachse
<i>Z</i>	Applikatenachse

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung
Δ_t	Kontaktzeit nach VDI3416
dt_{Anstieg}	Anstiegszeit einer Funktion
$I_{\text{peak,DREIECK}}$	Maximaler Strom bei einer Dreieckfunktion
$I_{\text{peak,RECHTECK}}$	Maximaler Strom bei einer Rechteckfunktion
$I_{\text{peak,SINUS}}$	Maximaler Strom bei einer Sinusfunktion
P_m	Elektrische Wirkleistung
$\mathcal{R}_{(z)}$	Reluktanz in Abhängigkeit der Z-Position
$U_{(t)}$	Spannung in Abhängigkeit der Zeit
U_{pp}	Spannung Peak-Peak in Volt
A'	Flächenleistung
a_g	Abformgrad
A_i	Eindruckfläche nach VDI3416
A_p	Projizierte Fläche der geometrischen Struktur nach VDI3416
D_K	Mittlerer Korndurchmesser
$E_{\mu r}$	Reibarbeit
E	E-Modul
$E_{\text{äqu}}$	Äquivalente Umformenergie
E_C	Koerzitivfeldstärke
E_C	Kontaktenergie nach VDI3416
E_{Damp}	Dämpfungsarbeit
E_E	Elastische Umformenergie im Werkstück
$E_{\text{Innen-WS}}$	Innere Energie des Werkstückes
$E_{\text{Innen-WZ}}$	Innere Energie des Werkzeuges
E_P	Plastische Umformenergie im Werkstück
$E_{\text{el-WS}}$	Elastische Energie des Werkstückes
$E_{\text{el-WZ}}$	Elastische Energie des Werkzeuges
E_{k0}	Kinetische Energie des Hammerkopfes vor dem Auftreffen
E_{k1}	Kinetische Energie des Hammerkopfes nach dem Rückprall
$E_{\text{kin}(t_0)}$	Kinetische Energie des Hammerkopfes
$E_{\text{pl-WS}}$	Plastische Umformarbeit des Werkstückes
$E_{\text{pl-WZ}}$	Plastische Umformarbeit des Werkzeuges
$ F $	Betrag der Kraft
$F_{A(z)}$	axiale Auslenkkraft
F_L	Wirkende Last am Piezo
F_{Piezo}	Summenkraft auf den Piezo-Stack
F_V	Betrag der Vorspannungskraft

F_i	Auslenkkraft der Stegelemente
I_{peak}	Spitzenstrom
L_0	Ausgangslänge
$M_{S,\sigma}$	Martensittemperatur bei Dehnung
M_S	Martensit-Starttemperatur
M_b	Biegemoment
M_d	Martensittemperatur bei Umformung
M_{d30}	Martensittemp. bei 30% Umformung und 50% Martensitbildung
P_R	Remanente Polarisierung
P_S	Sättigungspolarisation
R_M	Zugfestigkeit
$R_{P0,2}$	0.2%-Dehngrenze
R_e	Streckgrenze eines Werkstoffes
R_m	Zugfestigkeit eines Werkstoffes
T^*	Normalisierte Temperatur
$T_{\text{Übergang}}$	Temperatur bei thermodyn. Gleichgewicht
U_E	Erregerspulenspannung
U_M	Messspulenspannung
W_1	Kinetische Energie des Hammerkopfes vor dem Auftreffen
W_2	Elastische Umformenergie im Werkstück
W_3	Plastische Umformenergie im Werkstück
W_{Feder}	Federenergie
W_b	Biege widerstandsmoment
$\vec{a}(t)$	Beschleunigungsvektor
a_E	Kontaktradius bei rein elastischem Kontakt (Kugel und Werkstoff)
a_p	Eindruckabstand zwischen geometrischer Strukturen nach VDI3416
a_p	Strukturabstand in Bearbeitungsrichtung nach VDI3416
c_p	Flächenanteil der prozentualen Überdeckung nach VDI3416
d_{33}	Piezomodul mit gleicher Anregungs- und Wirkrichtung
dE_a	Änderung der äußeren Energie
d_i	Eindruckdurchmesser nach VDI3416
d_{ij}	Piezomodul (Dehnung parallel zur Polarisationsrichtung)
$f_{(x)}$	Durchbiegung
f	Frequenz
f_{max}	Maximale Durchbiegung
k_1	Steifigkeit eines Biegebalkenelementes
k_{15}	Steifigkeit von 15 Biegebalkenelementen
l_p, w_p, d_p, t_p	Strukturabmessung (Länge, Breite, Durchmesser, Tiefe) VDI3416
m_{Buchse}	Masse der Schwingbuchse
m_{Modal}	Modale Masse bei einer definierten Eigenfrequenz

m_{Spann}	Masse des Spannelementes
m_{WKZ}	Masse des Umformwerkzeuges
m_{dyn}	Dynamisch bewegte Masse
o_i	Überlappung nach VDI3416
r'	Kontaktfläche zwischen fest und flüssig
r_1	Radius des Indenters
r_2	Radius der bleibenden Verformung
$\ddot{s}$	zweite Ableitung des Weges nach der Zeit
$\vec{s}(t)$	Weg als vektorielle Größe
$\hat{u}$	Spitzenwert der Spannung
$\dot{v}$	Ergebnis der ersten Ableitung des Weges nach der Zeit
$\vec{v}(t)$	Geschwindigkeitsvektor
v_0	Ausgangsgeschwindigkeit
v_{max}	Maximale Geschwindigkeit der bewegten Antriebseinheit
v_x	Geschwindigkeit in X-Richtung
$\bar{x}$	Teilabschnitt
θ_m	Kontaktwinkel statisch
α'	Strukturwinkel (positiv und negativ Form)
α'	Verformungsinduzierter Martensit
β_a	Anstellwinkel nach VDI3416
β_i	Auftreffwinkel nach VDI3416
β_t	Kippwinkel nach VDI3416
$\dot{\epsilon}$	Bezogene plastische Vergleichsdehnrate
λ_p	Aspektverhältnis nach VDI3416
ρ	Versetzungsdichte in m/m^3
μ_r	magnetische Permeabilität
σ_{BW}	Biegewechselfestigkeit eines Werkstoffes
σ_F	Fließspannung nach Johnson Cook
σ_{LV}	Grenzflächenenergie flüssig-gasförmig
σ_{SL}	Grenzflächenenergie fest-flüssig
σ_{SV}	Grenzflächenenergie fest-gasförmig
σ_V	Mises-Vergleichsspannung
σ_b	Biegespannung
σ_y	Streckgrenze
φ_0	Phasenwinkel
ω_0	Ungedämpfte Eigenkreisfrequenz
∂	Partielle Ableitung
ΔG_{RT}	Freie Enthalpiedifferenz bei Raumtemperatur
ΔG_{mech}	Mechanische Aktivierungsenergie
ΔG_s	Freie Enthalpiedifferenz bei M_s
ΔR_T	Temperaturdifferenz zwischen R_T und thermodyn. Gleichgewicht

ΔT	Temperaturdifferenz
Δl	Längenänderung
Δx	Längenabweichung
B	Magnetische Flussdichte
B, C, m, n,	Johnson-Cook Konstanten
C	Kapazität
dt	Zeitschritt
F	Lorentzkraft
h	Hub nach VDI 3416
h	Höhe des Biegebalken
I	Strom
N	Wicklungsanzahl
q	Ladungsmenge
v	Vorschubgeschwindigkeit nach VDI3416
v	Geschwindigkeit der elektrischen Ladung
Λ	Logarithmisches Dekrement
A	Streckgrenze des Werkstoffes (Johnson-Cook)
A	Querschnittsfläche
B	Verfestigungsmodul
D	Verschiebungsdichte
D	Durchmesser
E	Elastizitätsmodul
$\vec{E}$	Elektrische Feldstärke
F	Maximalen Kontaktkraft
H	Magnetische Feldstärke
I	Stromstärke
I	Flächenträgheitsmoment
L	Ausgangslänge
L	Länge
P	Polarisation
Q	Qualitätsfaktor
S	Ausdehnung
T	Periodendauer
T	Mechanische Spannung
V	Betrag der Spannung
a	Eindruckabstand nach VDI 3416
a	Amplitude einer Funktion
b	Breite eines Biegebalken
c	Steifigkeit
d	Sehnenlänge des Eindrucks
d	Hammerkopfdurchmesser nach VDI3416

dU	Änderung der innere Energie
ds	Wegänderung
dv	Geschwindigkeitsänderung
e	Eulersche Zahl
f	Anteil der projizierten Fläche
$f(t)$	Chirp-Funktion in Abhängigkeit von der Zeit
k	Federsteifigkeit
k	Änderungsrate
l	freie Biegelänge
m	Temperaturexponent
m	Masse
n	Verfestigungsexponent
n	Anzahl an Wiederholungen
r	Kontaktwinkelverhältnis
r	Radius
s	Mechanische Steifigkeit
s	Strukturabstand quer zur Bearbeitungsrichtung
s	Bahnabstand nach VDI3416
s_h	Strukturhöhe
t	Zeit
v	Vorschubgeschwindigkeit
v_f	Vorschubgeschwindigkeit
x	Auslenkung der Feder
$\mathcal{P}$	Permittanz (Kehrwert der Reluktanz)
θ	Kontaktwinkel dynamisch
α	Werkzeugwinkel Strukturierung
α	Temperaturausdehnungskoeffizient
α	Bahnorientierungswinkel nach VDI3416
γ	Austenitische Phase
γ	Winkel
δ	Abklingkonstante
δQ	Änderung der Wärmeenergie
δW	Änderung der Arbeit
ε	Dehnung
ε	Hexagonaler Martensit
μ	Permeabilität
ρ	Dichte
φ	Umformgrad
ω	Eigenkreisfrequenz
ϵ	Akkumulierte plastische Vergleichsdehnung

1 Einleitung

Das maschinelle Oberflächenhämmern — engl. Machine Hammer Peening (MHP) — etablierte sich über die letzten Jahre im Bereich der als vibrationsbasierende Oberflächenbearbeitungsprozesse. Die MHP-Bearbeitung kann in den Bereich der Kaltumformung von Werkstoffen eingeordnet werden. In Kombination mit einem Maschinensystem zur Aufnahme und Führung des MHP-Werkzeuges über eine Werkstückoberfläche zielt das Verfahren darauf ab die Kaltverfestigung gezielt zu beeinflussen. Neben diesen beiden Effekten kommt es auch zu einer Modifikation der Werkstücktopografie, welche in die Kategorie des Oberflächenglättens oder der Oberflächenstrukturierung einzuordnen ist (vgl. [1], VDI-Richtlinie 3416). Das eingesetzte MHP-Bearbeitungswerkzeug besteht meist aus einer formgestalteten Hartmetallspitze, welche mit einer oszillierenden Bewegung auf eine plastisch umformbare Werkstückoberfläche trifft und durch einzelne aneinandergereihte Schläge entlang eines vorgegebenen Bearbeitungspfades die zuvor genannten Wirkgrößen beeinflusst. Während des Kontaktes zwischen der Hammerkopfspitze und der Werkstückoberfläche kommt es zu einem elastisch-plastischen Kontakt. Dieser Ablauf kann nach [2] in einzelne Vorgänge eingeteilt werden, wie dies in Abbildung 1 dargestellt ist. In Schritt eins beginnt der Kontakt zwischen dem Hammerkopf und der rauen Werkstückoberfläche. Die vorliegende kinetische Energie des Hammerkopfes $E_{k0(t)}$ vor dem Auftreffen auf der Werkstoffoberfläche wird bei Kontakt schrittweise abgebaut und in eine Formänderungsarbeit umgewandelt. Zunächst werden die Rauheitsspitzen der Oberfläche umgeformt bis im zweiten Schritt die kinetische Energie vollständig umgewandelt wurde und eine elastisch-plastische Umformung stattgefunden hat. Der elastische Anteil der Umformung bewirkt eine Rückfederung, sodass eine Geschwindigkeit $v_{1(t)}$ des Hammerkopfes in entgegengesetzter Richtung des Bewegungspfades aufgebaut wird. Zurück bleibt eine plastisch deformierte Oberfläche mit eingebrachten Druckeigenspannungen.

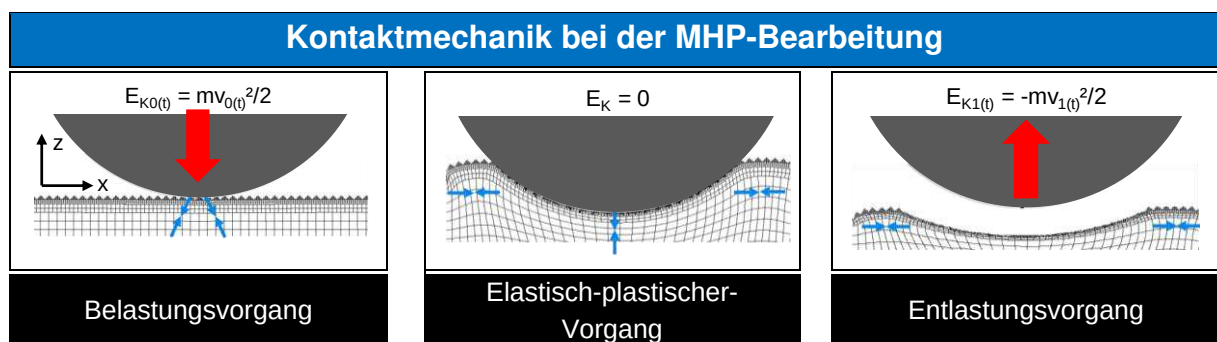


Abbildung 1: Elastisch-plastische Umformung bei der MHP-Bearbeitung [2], links: unverformte Oberfläche und der Ausgangsenergie des Hammerkopfes, mitte: maximale elastisch-plastische Umformung mit $E_{kin} = 0$, rechts: elastische Rückfederung des Hammerkopfes und bleibende plastische Umformung auf der Werkstückoberfläche

Durch diese gerichtete Bearbeitung kommt es zu einer ungleichmäßige Ausrichtung der Druckeigenspannungen im bearbeiteten Oberflächenbereich, (vgl. [3]). Bei jedem Auftreffen des Hammerkopfwerkzeuges auf die Werkstückoberfläche kommt es zu einem realen Stoßvorgang, welcher zu Beginn die Kompressionsphase durchläuft und in eine Restitutionsphase (teilweise oder vollständige Zurückbildung des Umformbereiches) übergeht. Im Übergangsbereich zwischen der Belastungs- und der Entlastungsphase kommt es zu einem maximalen Anstieg der Kontaktkraft F_K . Diese bewirkt eine Reaktionskraft im Trägersystem, welche durch den Aktor selbst und in weiterer Folge durch das Maschinensystem aufgenommen werden muss. Liegt eine große Nachgiebigkeit ($\mu\text{m/N}$) des Maschinensystems vor, so können die auftretenden Kräfte und Momente das statische als auch das dynamische Verhalten des Maschinensystems und damit auch das Bearbeitungsergebnis beeinflussen. Die in den Werkstoff eingebrachte Formänderungsarbeit wird durch die Eingangsgrößen des MHP-Bearbeitungsprozesses beeinflusst. Die einzelnen Prozessgrößen werden auf der Eingangs- als auch auf der Ausgangsseite nachfolgend in einer Systemdarstellung zusammengefasst.

Eingangsgrößen		Ausgangsgrößen	
Maschine	Vorschub- geschwindigkeit	Kräfte	Umformung
MHP-Aktor	Hämmerfrequenz	Energie	Rauheit
Hammerkopf	Bahnabstand	Schwingungen	Kaltverfestigung
Werkstoff	kinetische Energie	Akustische Emissionen	Eigenspannungen
	Bahnplanung		Beschichtung
			Strukturierung
			Werkstoffphase
Systemgrößen	Stellgrößen	Prozessgrößen	Wirkgrößen

Abbildung 2: MHP-Prozess als Systemdarstellung

Gemäß der Abbildung 2 werden die Eingangsgrößen in System- und Stellgrößen sowie die Ausgangsgrößen in Prozess- und Wirkgrößen aufgeteilt. Um letztendlich die Wirkgrößen zielgerecht zu beeinflussen, bedarf es zunächst einer Betrachtung der System- als auch der Stellgrößen auf der Eingangsseite des Maschinensystem als auch der Aktorik. Dabei gilt es, die statischen und dynamischen Systemeigenschaften eines Bearbeitungssystems zu betrachten und durch eine geeignete Wahl der Stellgrößen die Eignung als Maschinensystem zur MHP-Bearbeitung festzustellen. In einer ähnlichen Weise muss auch die Aktorik selbst in der Lage sein, einen definierten Energieeintrag in den Werkstoff sicherzustellen. Nachdem die Einflüsse der Aktorik und des Maschinensystems behandelt wurden, liegt es nun am Werkstoff, die

eingeleitete Energie aufzunehmen und in Formänderungsarbeit umzuwandeln. Neben der Glättung der Oberflächenrauheit muss auch der eigentlichen plastischen Umformung auf der Werkstückoberfläche Beachtung geschenkt werden. Durch ein Zusammenspiel aus Beschleunigungsvorgängen der Maschinenachsen, einer ungenauen Bahnsteuerung und der fehlerhaften Ausführung der Hammerkopfbewegung ist es möglich, dass es zu einer undefinierten Umformung auf der Werkstückoberfläche kommt. Neben dieser Darstellung der Einflüsse der Eingangsgrößen liegt der Fokus dieser Arbeit auf den Wirkgrößen bei der MHP-Bearbeitung. So wird zunächst die Möglichkeit zur Herstellung mikroskopischer Strukturen auf der Oberfläche eines Warmarbeitsstahls durch Umformung untersucht, sowie die Umwandlung der Werkstoffphase eines CrNi-Werkstoffes im Detail betrachtet.

Ein temperaturkompensiertes Fünf-Achs-Bearbeitungszentrum dient als Maschinensystem zur Erzeugung von Negativstrukturen mittels einer piezoelektrischen MHP-Aktorik. Die erzeugten strukturierten Bauteile werden durch einen anschließenden Spritzgussprozess abgeformt. Das finale Spritzgussbauteil besteht aus einem Polycarbonatwerkstoff (PC). Ziel der Oberflächenstrukturierung ist es, eine hydrophobe Eigenschaft auf der Oberfläche des Kunststoffbauteiles nachzuweisen.

Neben der erzeugten Texurierung der Oberfläche können bei der plastischen Umformung durch die MHP-Bearbeitung auch im Werkstoffgefüge und in der Gitterstruktur Änderungen auftreten. Durch die in den Werkstoff eingebrachte plastische Formänderungsarbeit ist es im Speziellen bei metastabilen austenitischen CrNi-Werkstoffen möglich, eine Phasentransformation hervorzurufen. Somit können veränderte Werkstoffeigenschaften bei gleicher chemischer Zusammensetzung in der Bearbeitungszone erreicht werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Im Zuge dieses Kapitels wird zunächst das Verfahren des maschinellen Oberflächenhämmerns und die zum heutigen Stand bekannten Aktoren näher beschrieben. Das Kapitel 2 schließt mit einer Beschreibung der zur maschinellen Bearbeitung erforderlichen bahngesteuerten Bearbeitungsmaschinen und deren Auswirkung auf das Bearbeitungsergebnis.

2.1 Maschinelles Oberflächenhämmern

Das maschinelle Oberflächenhämmern – „Machine Hammer Peening“ (MHP) – ist ein Fertigungsverfahren zur mechanischen Oberflächenbehandlung eines Werkstoffes, wobei die Zuordnung sich an der DIN 8580 orientiert und ebenfalls in Abhängigkeit der Bearbeitungsintention erfolgt. Im Jahr 2018 erfolgte die Herausgabe der VDI-Richtlinie 3416 als Weißdruck mit dem Titel „*Maschinelles Oberflächenhämmern - Grundlagen*“. Diese Richtlinie dient dazu, die Begrifflichkeiten und die Anwendungsgebiete der Technologie zu beschreiben. Maßgeblich beruht diese Richtlinie auf der Terminologie des maschinellen Oberflächenhämmerns (siehe [4]). Diese konnte durch die Arbeitsgruppe des Fachforums „Machine Hammer Peening“, welche aus den teilnehmenden Hochschulen der TU Darmstadt, der RWTH Aachen, der TU Wien, dem Karlsruhe Institut für Technologie sowie einzelnen Industriepartnern bestand, erarbeitet werden. Das Verfahren zielt darauf ab, in die bearbeitete Werkstoffoberfläche oberflächennahe Druckeigenspannungen einzubringen, die Kaltverfestigung und Härtesteigerung der bearbeiteten Randschichtzonen zu beeinflussen und/oder die Manipulation der Werkstücktopografie (Glätten oder Strukturieren) herbeizuführen. Gemäß der VDI-Richtlinie 3416 werden diese entsprechend der erzielbaren Effekte unterschieden (vgl. [1]).

MHP-Effekte nach VDI 3416			
Glätten	Strukturieren	Verfestigen	Einbringen von Druckeigenspannungen

Tabelle 1: Wirkgrößen bei der MHP-Bearbeitung nach VDI 3416 [1]

Im Detail wird in Kapitel 2.5 auf die resultierenden Effekte eingegangen und dabei auch der aktuelle Forschungsstand zu den jeweiligen Themen näher beschrieben. Nach BLEICHER [5] können im Allgemeinen mechanische Oberflächenbearbeitungsverfahren in direkte als auch indirekte Prozesse unterteilt werden. Im Falle der MHP-Bearbeitung erfolgt die Zuordnung zu den direkten, deterministischen Prozessen. Im Gegensatz zu den indirekten Oberflächenbearbeitungsverfahren findet die Beeinflussung der Wirkgrößen direkt durch den Kontakt mit den zu beeinflussenden Werkstoffen statt. So ist zum Beispiel der Umformstempel oder auch die Umformmatrize direkt für die Formgebung eines Bauteiles verantwortlich. Hingegen geschieht beim Laser Shock Peening (LSP) die Beeinflussung des

Werkstoffes durch eine Druckwelle. Diese resultiert aus einem hochenergetischen Laserpuls und entsteht durch ein sich rasch ausdehnendes Plasma an der Interaktionsstelle der Bauteiloberfläche. So können - ähnlich dem MHP-Verfahren - Druckeigenspannungen in die Werkstückoberfläche induziert werden, ohne jedoch einen mechanischen Formgebungsprozess anzuwenden. Die Zuordnung des maschinellen Oberflächenhämmerns zu einem direkten deterministischen Bearbeitungsprozess ist in Abbildung 3 dargestellt.

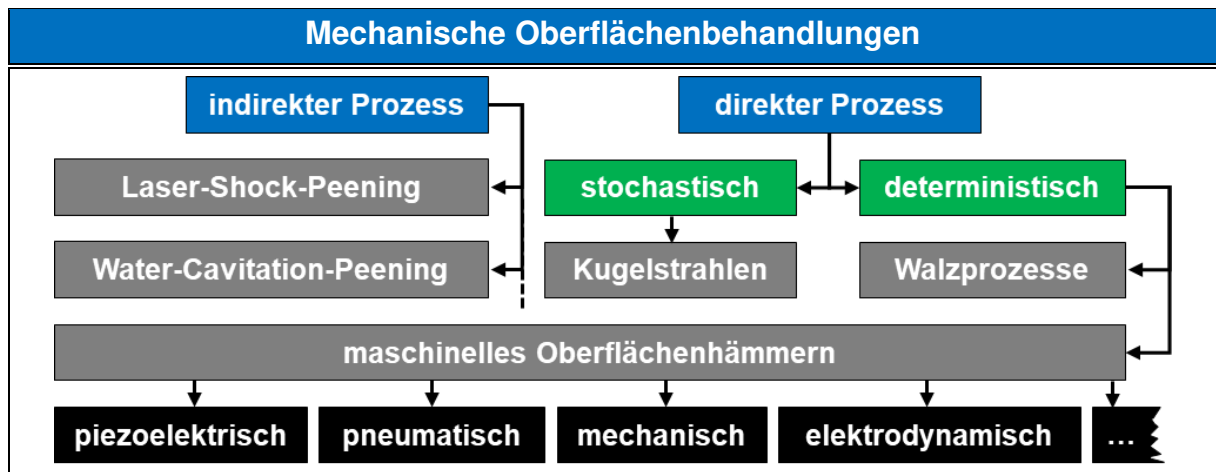


Abbildung 3: Einordnung des maschinellen Oberflächenhämmerns, vgl. BLEICHER [5]

Anders als der direkte stochastische Prozess des Kugelstrahlens basiert das maschinelle Oberflächenhämmern auf der Grundlage, dass ein bahngesteuertes System eine definierte Bahnführung des MHP vornimmt und diesen über die Werkstückoberfläche führt. Der Eindruckabstand a kann über das Verhältnis zwischen der Vorschubgeschwindigkeit v und dem Hämmerfrequenz f beschrieben werden.

$$f = \frac{v}{60 * a} \quad (1)$$

Die Hämmerfrequenz f ist in 1/s oder geläufiger in Hz (Hertz) angegeben. Unter dem aus der Gleichung (1) gegebenen Zusammenhang ergibt sich bei einer Hämmerfrequenz f von 200 Hz und einem Eindruckabstand von $a = 0,1$ mm eine Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1200$ mm/min des Trägersystems.

2.2 MHP-Technologien zur Oberflächenbearbeitung

In diesem Kapitel werden die zum aktuellen Stand der Technik bekannten Verfahren und deren Aktorsysteme des geführten maschinellen Oberflächenhämmerns für die Bearbeitung von primär metallischen Werkstoffen beschrieben. Eine Einteilung der Wirkprinzipien des Verfahrens erfolgt grundsätzlich in Systeme mit kontinuierlichem sowie Systeme mit periodischem Kontakt zwischen Werkzeug und Bauteiloberfläche. Abbildung 4 links beschreibt die Systemcharakteristik einer periodischen Kontaktbedingung. Dabei oszilliert die Hammerkopfspitze mit einem vorgegebenen

Profil zwischen einem oberen Totpunkt und der Bauteiloberfläche. Bei dieser Art der Kontaktverhältnisse stellt sich in Abhängigkeit der Kontaktbedingung, wie etwa durch die dimensionslose Stoßzahl e und dem damit verbundenen Rückprall der Hammerkopfspitze durch die elastische Verformung, der Verlauf der oszillierenden Bewegung ein. Dieser Bewegungsablauf wird je nach Antriebstechnologie genutzt oder unterbrochen. Hingegen stellt die Abbildung 4 Mitte einen Prozess mit kontinuierlichem Kontakt zwischen der Hammerkopfspitze und der Werkstückoberfläche dar. In diesem Fall wird die Hammerkopfspitze meist über ein Federelement (pneumatisch oder mechanisch) auf die Werkstückoberfläche gedrückt. Im Gegensatz zu kontinuierlichen Glättungsverfahren wie dem Diamantglätten, bei dem eine konstant anliegende Kraft auf das Werkzeug wirkt, findet bei dieser Technologie eine Impulsübertragung eines oszillierenden Kolbens statt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass sich die Hammerkopfspitze in Abhängigkeit von den Bearbeitungsbedingungen von der Werkstückoberfläche löst und somit ein instabiler Bearbeitungsprozess vorliegt.

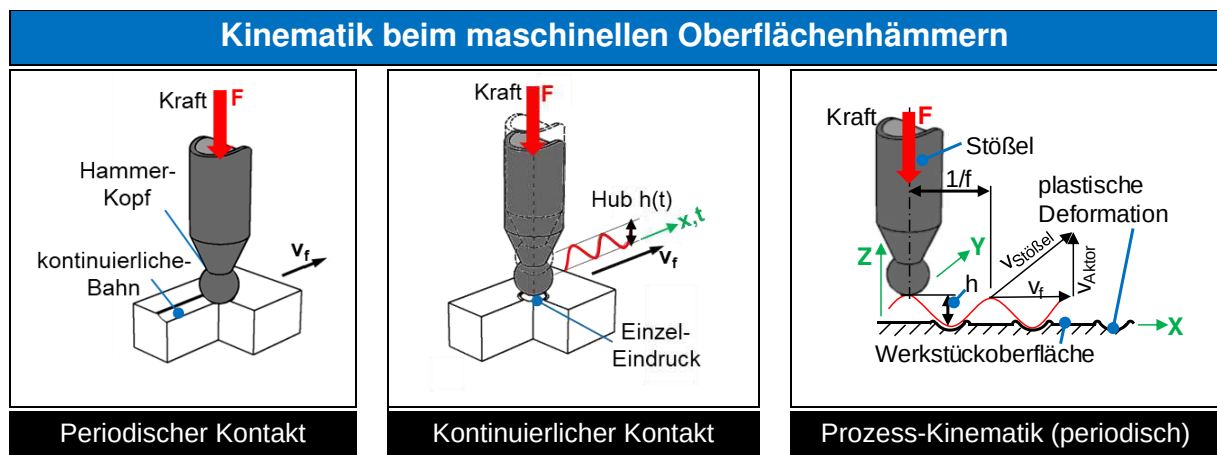


Abbildung 4: Systemcharakterisierung geführter MHP-Prozesse mit periodischem Kontakt des Hammerkopfes und der Werkstückoberfläche (links), mit kontinuierlichem Kontaktverhältnis (mitte) und rechts die Kinematik der Hammerkopfbewegung bei periodischem Kontakt

Werkzeugsysteme, welche einen periodischen Kontakt zwischen dem Hammerkopf und der zu bearbeitenden Werkstückoberfläche aufweisen, erzeugen entsprechend der Gleichung (1) Einzeleindrücke auf der Werkstückoberfläche. Diese ergeben durch Führung des MHP-Aktors entlang eines definierten Bearbeitungspfadens einzelne, präzise aneinander gereihte Einzeleindrücke im Abstand a und mit vorgegebenem Bahnabstand s in mm. Durch eine gezielte Auslegung dieser Einzeleindrücke können definierte Oberflächeneigenschaften wie die Glättung oder Strukturierung von Oberflächen geschaffen werden [6]. Um diese präzisen Einzeleinschläge auf der Werkstückoberfläche zu erzeugen, werden NC-geführte Aktorsysteme benötigt. Im Falle des periodischen Kontaktmechanismus ist in Abbildung 4 rechts die Prozess-Kinematik des Hammerkopfes dargestellt. Dabei wirkt, wie bereits erwähnt, eine Kombination aus der Hammerkopfgeschwindigkeit V_{Aktor} und der

Vorschubgeschwindigkeit des Maschinensystems v . Entsprechend einer harmonischen Bewegung des Hammerkopfes und einer gleichbleibenden Vorschubgeschwindigkeit kann die Kinematik der Hammerkopfbewegung beim maschinellen Oberflächenhämmern folgendermaßen formuliert werden:

$$\vec{s}(t) = \begin{pmatrix} s_x(t) \\ s_y(t) \\ s_z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cdot t \\ 0 \\ h \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Aus den nach der Zeit abgeleiteten Ortsvektoren des Wirkungswegs ergibt sich die Geschwindigkeit:

$$\vec{v}(t) = \frac{\partial \vec{s}}{\partial t} = \begin{pmatrix} \frac{\partial s_x}{\partial t} \\ \frac{\partial s_y}{\partial t} \\ \frac{\partial s_z}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \\ 0 \\ h \cdot 2\pi f \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Durch eine weitere Ableitung der Funktion nach der Zeit, kann die Beschleunigung folgendermaßen formuliert werden:

$$\vec{a}(t) = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial t} \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -(2\pi f)^2 \cdot h \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Periodische Systeme des maschinellen Oberflächenhämmerns			
pneumatisch: Forgefix AIR 3S – Engineering [7] Pneumatic Impact Treatment (PIT) – PiTEC [8] High Frequency Impact Treatment (HiFIT) – Dynatec [9]		sonotroden-gesteuert: Ultrasonic Needle Peening (UNP) Ultrasonic Impact Treatment (UIT) Ultrasonic Impact Machining [10] Ultrasonic Impact Peening (UIP) Rotating Pin Ultrasonic Peening (RPUP) Ultrasonic Shock Treatment (UST)	
elektrodynamisch: E-MHP – accurapuls [11]	elektromagnetisch: DIP-MHP – IFT [12]	mechanisch: M-MHP – Ecoroll [13]	piezoelektrisch: Piezopeening [14]
direkt sonotroden gesteuert: Ultrasonic Impact Treatment (UIT)			
Kontinuierliche Systeme des maschinellen Oberflächenhämmerns			
pneumatisch: P-MHP Forgefix AIR 3S-Engineering [7]		direkt sonotroden-gesteuert: Ultrasonic Nano-Crystal Surface Modification – UNSM [15] Ultrasonic Cold Forging Treatment – UCFT	

Tabelle 2: Übersicht zu periodisch und kontinuierlich arbeitenden MHP-Systemen

Auf Basis dieser Beschreibung der Beschleunigung eines harmonischen Oszillators liegt bei einer Frequenz $f = 200$ Hz und einem Hub $h = 1$ mm (Peak-Peak) eine maximal wirkende Beschleunigung auf dem Hammerkopf von $a = 800$ m/s² vor. Mittels der Grundgleichung der Mechanik kann somit bei einer Hammerkopfmasse von $m = 0,3$ kg eine gerichtete Kraft von $F = 500$ N erreicht werden. Diese Beschreibung der Hammerkopfbewegung vernachlässigt jegliche Rückpralleffekte der Aktorik oder des Umformvorganges. Eine Auflistung der zur MHP-Bearbeitung bekannten Aktor-Technologien ist in der Tabelle 2 gegeben. Darin sind die Systeme entsprechend ihrer Kontaktbedingungen zwischen Werkstück und Werkzeug unterteilt.

2.3 MHP-Aktortechnologie

Wie zuvor beschrieben, ist es möglich, die Charakterisierung des MHP-Prozesses über die Kontaktbedingungen vorzunehmen. Diese Einteilung gibt jedoch noch keine Auskunft über die Wirkungsweise eines MHP-Systems. Eine weitere Möglichkeit, die Systeme einzuteilen, besteht in der Charakterisierung der kinetischen Energie des Hammerkopfes. Die Energiebereitstellung kann durch verschiedenartige, sich im physikalischen Mechanismus unterscheidende Systeme, realisiert werden. So ist in Abbildung 5 die kinetische Energie der einzelnen Aktorsysteme auf Basis eines vereinfachten Berechnungsmodells gegenübergestellt. Die Berechnung der Energiegrößen erfolgt in Abhängigkeit von mechanischen Kenngrößen wie etwa der Hammerkopfmasse sowie des Hubs und bedient sich der kinematischen Bewegung des Hammerkopfes auf einer idealen sinusförmigen Bahn. Auf die Funktionsweise der hier aufgelisteten Systeme wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen. Die hier vorliegenden Systeme sind:

- mechanisch wirkendes Hammersystem (M-MHP) [13]
- elektrodynamisches Hammersystem (E-MHP) [11]
- pneumatisches Hammersystem (P-MHP) [7]
- piezoelektrisches Hammersystem (PZ-MHP) (Kapitel 5.1)
- elektromagnetisches Hammersystem (DIP-MHP) [12]

Die ersten drei genannten Systeme sind industriell entwickelte Aktorsysteme, welche auch über die entsprechenden Hersteller bezogen werden können. Die beiden letzten genannten Systeme sind Eigenentwicklungen dieser Arbeit. Betrachtet man die aufgespannten Bereiche der einzelnen Aktorsysteme so zeigt sich, dass das M-MHP-System mit seiner großen Baugröße und den entsprechend größeren bewegten Massen einen hohen Energieeintrag realisieren kann. Das E-MHP-System spannt hingegen mit seiner großen Stellbereich der Hämmerparameter ebenfalls ein großes Feld auf und deckt im Gegenzug zum mechanisch arbeitenden Systemen auch den unteren Frequenzbereich ab.

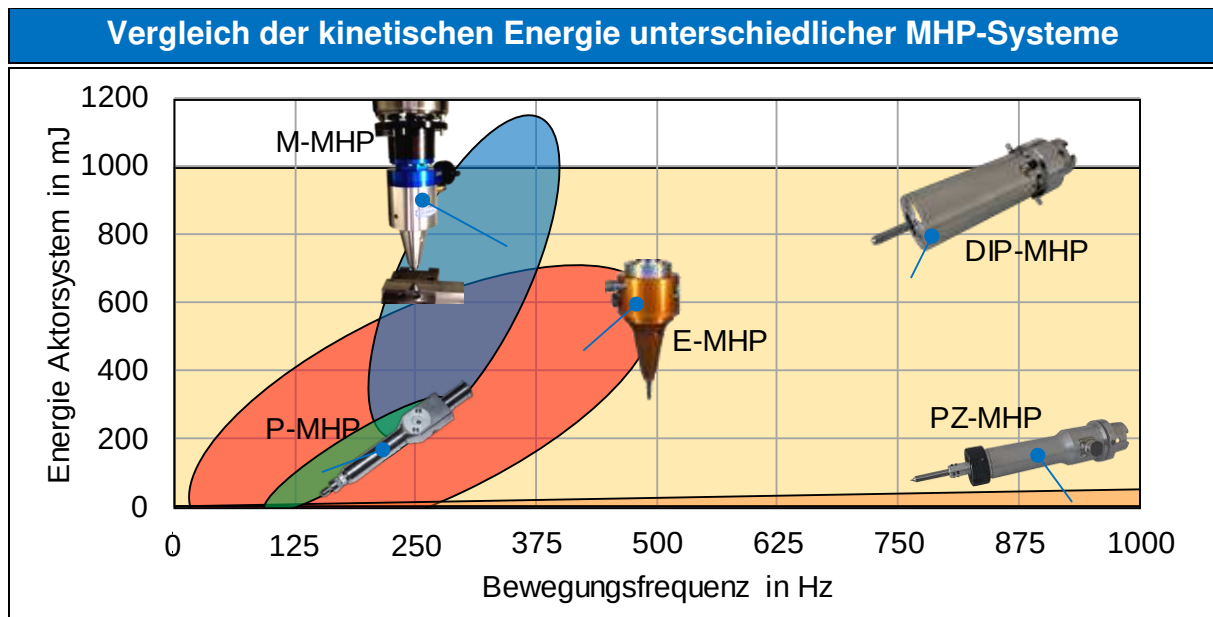


Abbildung 5: Gegenüberstellung der kinetischen Energie aktueller MHP-Systeme

Hingegen zeigt sich beim P-MHP-System ein deutlich geringerer Arbeitsbereich. Dies ist einerseits der geringeren bewegten Masse und andererseits dem schmäleren Frequenzband geschuldet, in dem das Aktorsystem arbeitet. Das vierte angeführte piezoelektrisch arbeitende System stellt aufgrund seiner geringen bewegten Massen und den kleinen Hübten (μm) eine geringere kinetische Umformenergie zur Verfügung. Dieses System deckt jedoch einen großen Frequenzbereich ab. Die hier dargestellte Energiebeschreibungen korrelieren auch mit den Ergebnissen aus [16]. Darin werden die Auswirkungen unterschiedlicher maschineller Oberflächenbearbeitungssysteme gegenübergestellt. Als letztes hier dargestelltes System ist eine eigens entwickelte MHP-Aktorik mit der Bezeichnung DIP-MHP-System angeführt (siehe [12]). Dieses System ermöglicht aufgrund seiner Antriebseinheit, eine gesteuerte Hammerkopfbewegung und kommt somit ohne eine harmonische Anregung aus. Aufgrund der hohen Beschleunigungsfähigkeit des Systems kann ein breiter Frequenzbereich mit gleichmäßigem Energieeintrag realisiert werden. Neben diesen hier vorgestellten Systemen etablierten sich in der Vergangenheit eine Vielzahl unterschiedlicher Aktortechnologien zur MHP-Bearbeitung. Betrachtet man die Entwicklung über das letzte Jahrhundert – und im Speziellen in den letzten zehn bis zwanzig Jahren – so erkennt man eine deutliche Zunahme der am Markt verfügbaren Technologien sowie MHP-Aktor - Systeme. Damit einhergehend geht auch die Anzahl der angemeldeten Patentschriften. Einen Überblick über die Entwicklung der Systeme und der Patentanmeldungen bietet die Abbildung 6. Es ist aus dieser Abbildung ersichtlich, dass viele unterschiedliche Wirkprinzipien und Technologien zur MHP-Bearbeitung von Oberflächen bekannt sind. Um nun im Detail auf die hier vorgestellten Systeme näher einzugehen, werden im Folgenden Unterkapitel die verschiedenen Technologien nach deren Wirkprinzipien und Eigenschaften vorgestellt. Wie in Abbildung 4 dargestellt, können MHP-Aktorsysteme neben der Einteilung nach dem

physikalischen Wirkprinzip auch nach der Art des Kontaktverhältnisses zwischen Hammerkopf und der Werkstückoberfläche beschrieben werden. Entsprechend dieser Unterscheidung erfolgt eine detaillierte Beschreibung von unterschiedlichen MHP-Systemen, welche einen periodischen Kontakt des Hammerkopfes zur Werkstückoberfläche aufweisen.

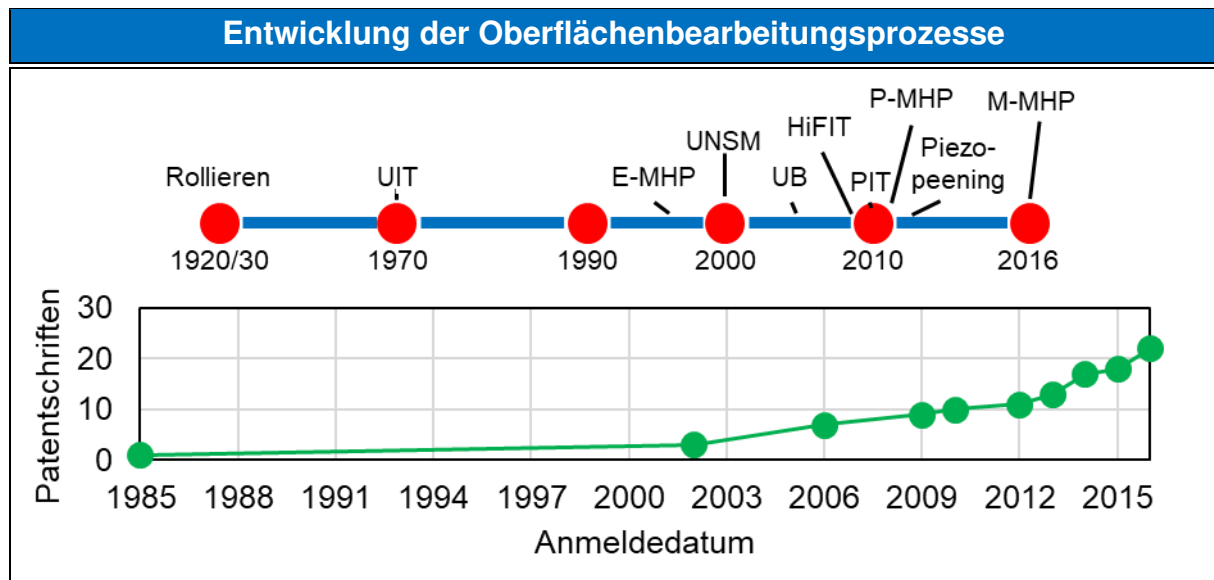


Abbildung 6: Entwicklung mechanischer Systeme zur Oberflächenbearbeitung in anlehnung nach [17] (oben) und eine Darstellung der Entwicklung der Patentschriften zu den veröffentlichten Aktorsystemen (unten)

2.3.1 Patentrecherche

In diesem Unterkapitel werden alle relevanten Patentschriften in Form von Gebrauchsmuster- und/oder Offenlegungsschrift, die MHP-Aktorsysteme und Verfahren zum maschinellen Oberflächenhämmern beschrieben.

Zu den mechanisch angetriebenen Systemen des maschinellen Oberflächenhämmerns zählt etwa das „*Radial angetriebene Schlagverdichtungssystem*“ DE102016000389A1 [18], die in DE102015203487A1 [13] beschriebene Aktorik mit der Bezeichnung „*Festhammervorrichtung zum Beeinflussen von Werkstücken und zugehöriges Verfahren*“ der Firma Ecoroll sowie das in DE102014107173A1 [19] gezeigte System mit der Bezeichnung „*Werkzeug und Verfahren zum Aufbringen kleiner Schlagimpulse*“, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass die oszillierende Hammerkopfbewegung über einen Rotationsantrieb erzeugt wird. In DE102010019547A1 [7] wird ein pneumatisches System unter dem Titel „*Kaltschmiedevorrichtung und Kaltschmiedeverfahren*“ vorgestellt, welches über eine oszillierende Kolbenbewegung eine Impulsübertragung auf ein federvorgespanntes Werkzeug vornimmt (Hersteller 3S-Engineering). Neben dem pneumatisch arbeitenden Prinzip findet sich in der Offenlegungsschrift DE102012103111A1 [20] ein MHP-System mit der Bezeichnung „*Werkzeug sowie Verfahren zum Aufbringen kleiner*“

Schlagimpulse“ wieder, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass die oszillierende Hammerkopfbewegung mithilfe des Kühl- oder Schmierstoffkreislaufes erfolgt. Ein elektrodynamisches System findet sich in DE102006033004A1 [11], welches mittels eines Wechselfeldes einen Tauchspulenantrieb speist und aus Resonanzeffekten und Antriebsenergie seine Umformleistung bezieht. Ein ähnliches Wirkprinzip findet sich in US4641510 [21] wieder, welches mehrere Hammerköpfe (bezeichnet als „Needle“) einzeln mit den Parametern Frequenz und Amplitude ansteuern lässt. Unter dem Aktenzeichen PCT/EP2018/081206 [12] ist mit dem Titel *„Reluktanz-Linearaktor und damit ausgeführte Werkzeuge/Antriebe“* ein MHP-Aktor des IFT zu finden, welcher auf Basis der magnetischen Reluktanz arbeitet und Teil dieser Arbeit ist. Die Hauptmerkmale dieses Systems liegen auf der einphasigen Versorgungsspannung sowie der integrierten Wegmesssensorik. Ein piezoelektrisches System, welches auf Basis des inversen piezoelektrischen Effektes beruht, ist Inhalt der Schrift DE102009041720A1 [14]. Ein System, welches ebenfalls mittels eines Piezo-Aktors angetrieben werden kann, ist in DE202013002473U1 [22] unter dem Titel *„Festklopfvorrichtung“* angeführt, welches mittels Einstellmechanismus das Resonanzverhalten des Aktors auf die jeweilige Hämmerfrequenz abstimmen lässt. Neben den klassischen piezoelektrischen Systemen finden sich in WO2004028739A1 [23] wie auch in US2007244595A1 [10] Sonotroden unterstützte Systeme, welche die Schwingung eines Piezo-Aktors verstärken und somit veränderte Amplituden und Bearbeitungsfrequenzen ermöglichen.

2.3.2 Pneumatisch angetriebene Aktorsysteme

Pneumatische Antriebssysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie als Eingangsgröße zur Druckübertragung Luft als Medium benötigen. Diese muss jedoch mittels externer Peripherie (Kompressoren) bereitgestellt werden. Ein solches pneumatisches Hammersystem wird vom Hersteller 3S-Engineering mit der Bezeichnung FORGEfix Air beworben. Dieser Aktor basiert auf der Arbeit von WIED [2] und ist eine direkte Weiterentwicklung der pneumatischen Graviervorrichtung vom Typ P2505 der Firma Atlas Copco, welche in weiterer Folge gemeinsam mit der Daimler AG im Dezember 2010 als Patent angemeldet wurde (siehe [7]). Die Hämmerfrequenz ist vom Luftdruck des Systems und der verwendeten Schlageinheit abhängig. Eine Wirkung der Reaktionskräfte beginnt jedoch erst bei einem Druck ab ca. 2 bar (siehe Kapitel 4.3). Die Kraftentwicklung beider Schlageinheiten basiert auf einem oszillierenden Kolben, welcher auf einen Federvorgespannten Stößel trifft. Zusammengefasst führt ein Öffnen und Schließen der Kolbenkanäle zu dieser oszillierenden Bewegung der Schlageinheit. Eine genaue Beschreibung des Funktionsprinzips der Schlageinheit findet sich in [24]. Für das System stehen zwei verschiedene Schlageinsätze zur Verfügung, um den Energieeintrag in die Werkstückoberfläche zu steuern: einen Standard-Einsatz mit geringerer Schlagkraft (standard pressure) sowie einen Einsatz mit erhöhter Schlagkraft (high pressure).

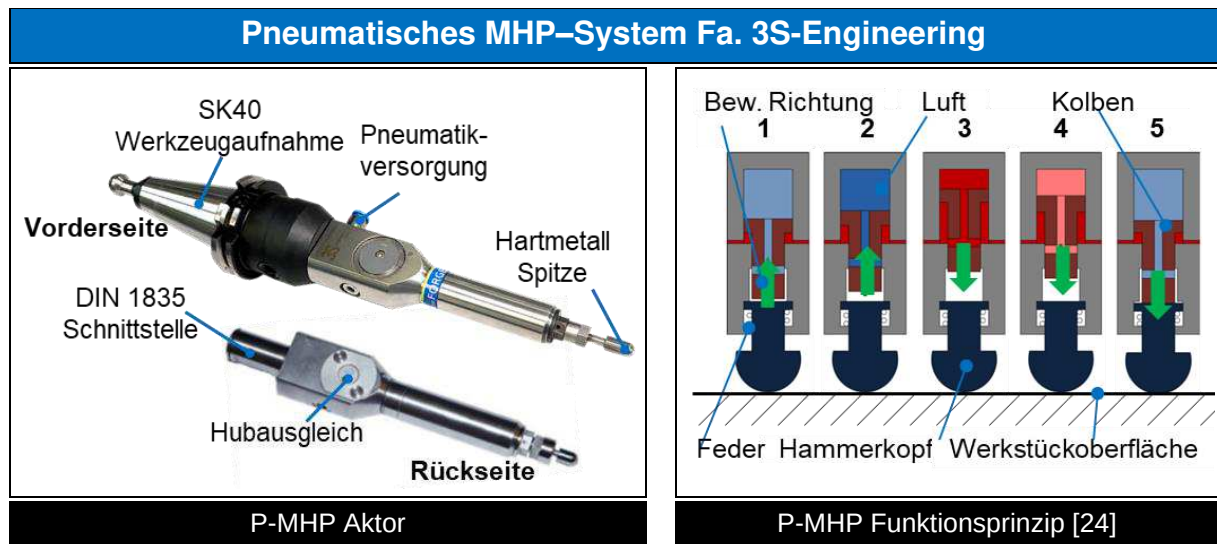


Abbildung 7: FORGEfix (Air) und Funktionsprinzip des Schlagmechanismus

Im Falle des HP-Einsatzes wird ein um ca. 1,6 mm längerer Kolben verwendet, welcher auf einen rückseitig vorgespannten Stößel trifft. In Abbildung 7 ist das pneumatische Hammersystem der Firma 3S-Engineering im Detail abgebildet. Dabei ist auch das in [24] beschriebene 5-stufige Funktionsprinzip dargestellt. In dieser Prinzipskizze ist gut zu erkennen, dass der Hammerkopf keine direkte Verbindung mit dem Schlagkolben aufweist und somit das System über eine Federvorspannung als kontinuierliches, periodisches System eingestuft werden kann. Beginnend bei Phase (1) liegt in der unteren Kolbenkammer der Systemdruck an und der Kolben bewegt sich nach oben.

Frequenz	Gewicht	Abmessungen	Schnittstelle	Kugel Ø
100 - 275 Hz	0,71 kg	209 x 40 mm	DIN 1835	4 - 24 mm
Einflussgrößen				
Luftdruck		1 – 8 Bar	Druckbeaufschlagung des Aktors	
Auswechselbare Schlageinheit			Einfluss auf den Energieeintrag HP / SP	
Hubausgleich		0 – 4 mm	Ausgleich von Formabweichungen	

Tabelle 3: Eigenschaften und Einflussgrößen des pneumatischen Systems FORGEfix (Air) [25]

In Phase (2) findet eine Komprimierung der Luft in der oberen Kolbenkammer statt. In Phase (3) findet eine Expansion der Luft und eine Kraftwirkung nach unten statt, da die obere Kolbenfläche größer als die an der Unterseite ausgeführt ist. In Phase (4) beginnt die Kolbenbewegung nach unten. In Phase (5) trifft der Kolben auf den Hammerkopf. Die weiteren physikalischen Eigenschaften sowie die spezifischen Einflussgrößen des pneumatischen Aktorsystems sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Anders als das P-MHP System FORGEfix Air sind die weiteren hier vorgestellten pneumatisch wirkenden Systeme primär als handgeführte Systeme ausgeführt. Meist werden diese in einer rauen und nicht leicht zugänglichen Umgebung (auch unter Wasser) und primär zur Schweißnahtnachbehandlung eingesetzt. Zwei unterschiedliche Ausführungen der Aktorik sind in Abbildung 8 dargestellt.

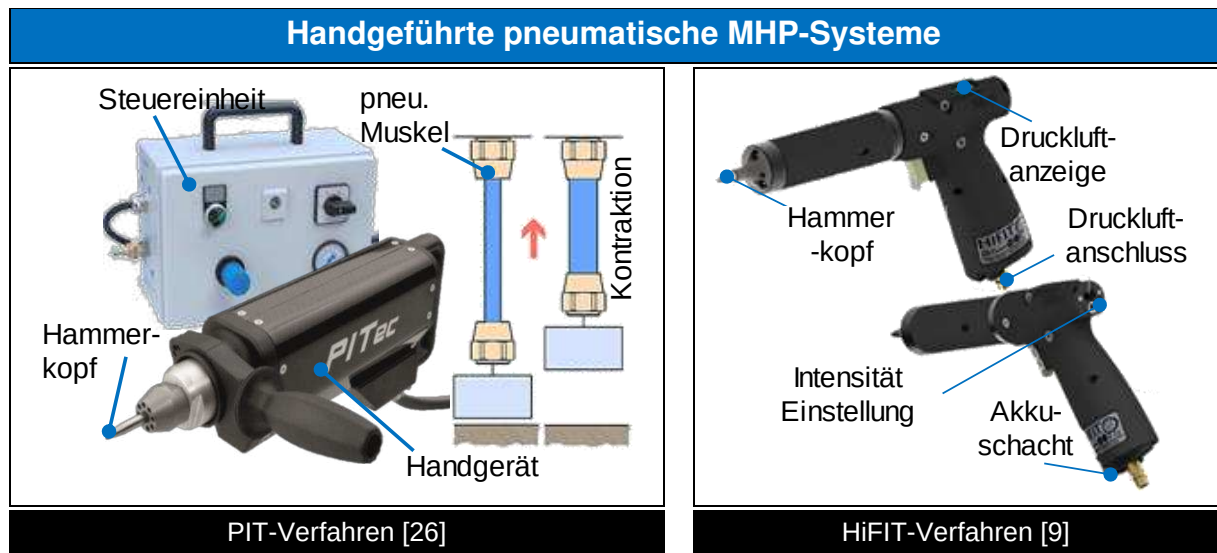


Abbildung 8: Handbediengeräte des Herstellers PiTEC mit dem PIT-Verfahren und dem HiFIT Verfahren des Herstellers DYNATEC

Das Pneumatic Impact Treatment (PIT) entstand aus der Ultrasonic Impact Treatment (UIT) Technologie und wurde durch die Firma PiTEC entwickelt. Die Schlageinheit dieses Bearbeitungssystems ist durch einen pneumatischen Muskel der Firma Festo realisiert. Es ist somit als abgeschlossenes System konzipiert, welches auch im Unterwasserbereich eingesetzt werden kann.

Frequenz	Abmessungen	Schnittstelle	Kugel Ø
0 - 200 Hz	438 x 110 mm [25]	Handgeführt	8 - 24 mm
Einflussgrößen			
Luftdruck	ca. 4 - 5 Bar	Druckbeaufschlagung des pneu. Muskels	
Volumenstrom	150 bis 170 l/min	Luftverbrauch des pneu. Muskels	
Spannungsversorgung	24 VDC	Versorgungsspannung Steuereinheit	

Tabelle 4: Eigenschaften und Einflussgrößen des PIT- Systems der Firma PiTEC [27]

Die Umsetzung des Schlagsystems mittels des pneumatischen Muskels erlaubt es, die Frequenz als auch die Bearbeitungskraft unabhängig voneinander anzusteuern [27]. Der Aufbau des PIT-Systems ist in Abbildung 8 (links) zu sehen. Die Eigenschaften des PIT-Verfahren sowie die spezifischen Einflussgrößen sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Als ein weiteres pneumatisch wirkendes Hammersystem ist das High Frequency Impact Treatment (HiFIT) bekannt. Ähnlich dem Wirkprinzip des oszillierenden Kolbens trifft beim HiFIT eben dieser eine montierte Hammerkopfspitze und führt somit zu einer oszillierenden Bewegung [28]. Das HiFIT-Verfahren ist gleich dem PIT-Verfahren als handgeführtes System einzuordnen und kann mittels geeigneter Vorrichtung auch an Robotersystemen montiert werden. Das HiFIT - Handbediengerät ist in Abbildung 8 (rechts) dargestellt, die entsprechenden Eigenschaften sind hingegen in Tabelle 5 zusammengefasst.

Frequenz	Gewicht	Abmessungen	Schnittstelle	Kugel Ø
180 - 300 Hz	1,8 kg	288 x 46 x 170 mm	Handgeführt	3 - 4 mm
Einflussgrößen				
Luftdruck	6 – 8 Bar	Druckbeaufschlagung des Kolbens		
Luftbedarf	min. 400 l/min	Luftverbrauch		

Tabelle 5: Eigenschaften und Einflussgrößen des Dynatec HiFIT-System [9]

2.3.3 Elektrodynamisches Aktorsystem

Angetrieben von einer Schwingspule arbeitet das elektrodynamische System der Firma accurapuls nach dem elektrodynamischen Wirkprinzip. Die durch die elektrische Energie erzeugte Kraftwirkung auf den Hammerkopf kann über die Lorentzkraft beschrieben werden. Die Lorentzkraft berechnet sich nach der folgenden Gleichung:

$$F = q \cdot (v \times B) \quad (5)$$

wobei q die Ladungsmenge, v die Geschwindigkeit der Ladungen und B die magnetische Flussdichte ist. Auf den axial frei beweglichen Läufer und die aufgebrachte stromdurchflossene Zylinderspule, welche in einem definierten Magnetfeld eines Permanentmagneten liegt, wirkt eine axial gerichtete Kraftkomponente. Mit dieser beweglichen Zylinderspule ist das Hammerkopfwerkzeug mechanisch verbunden. Dabei wird die Wicklung mittels einer Wechselspannung beaufschlagt (vgl. [11], [29]). Der Hammerkopf wird durch eine Schwingspule als Hauptantriebskomponente oszillierend bewegt und führt einen periodischen Kontakt zur Werkstückoberfläche aus. Das E-MHP - System, eingebaut in eine Werkzeugmaschine vom Typ Hermle C20U sowie als schematische Schnittdarstellung, sind Inhalt der Abbildung 9. Nach dem Auftreffen der Hammerkopfspitze auf der Werkstückoberfläche wird die Rückprallenergie aus dem elasto-plastischen Umformprozess genutzt, um den Prozess aufrechtzuerhalten und das Werkzeug zurück in die Ausgangslage zu bewegen (siehe [24]). Gleich dem pneumatischen System ist auch hier kein Wegmesssystem verbaut. Somit sind die Lage und die Geschwindigkeit des Hammers nicht geregelt und können nur mittels externer Sensorik gemessen werden, wie dies in der Arbeit [24] gezeigt ist. Die resultierende Krafterzeugung erfolgt unabhängig vom Schlag auf die Werkstückoberfläche durch eine alternierende Spannung in der Tauchspule sowie durch den Rückprall am oberen Totpunkt der Schwingung an einer sogenannten Rückprellplatte. Der Vorteil dieses Systems besteht in der Ausprägung einer klar definierten Hämmerfrequenz bei jedoch hohen Energieverlusten. Der Aufbau des E-MHP - Systems ist in Abbildung 9 dargestellt. Vor dem Einsatz des E-MHP - Systems müssen zu Beginn die Prozessgrenzen und die Bearbeitung bestimmt werden. Diese sind von der Art der zu erzielenden Bearbeitungseffekte (Strukturieren, Glätten) abhängig. Das E-MHP - System bezieht seine Schlagenergie neben dem elektrischen Antrieb auch über den elastischen Rückprall auf der Werkstückoberfläche und einer im Aktor verbauten Rückprellplatte am oberen Totpunkt (siehe hierzu [24]).

Elektrodynamisches MHP - System Fa. accurapuls

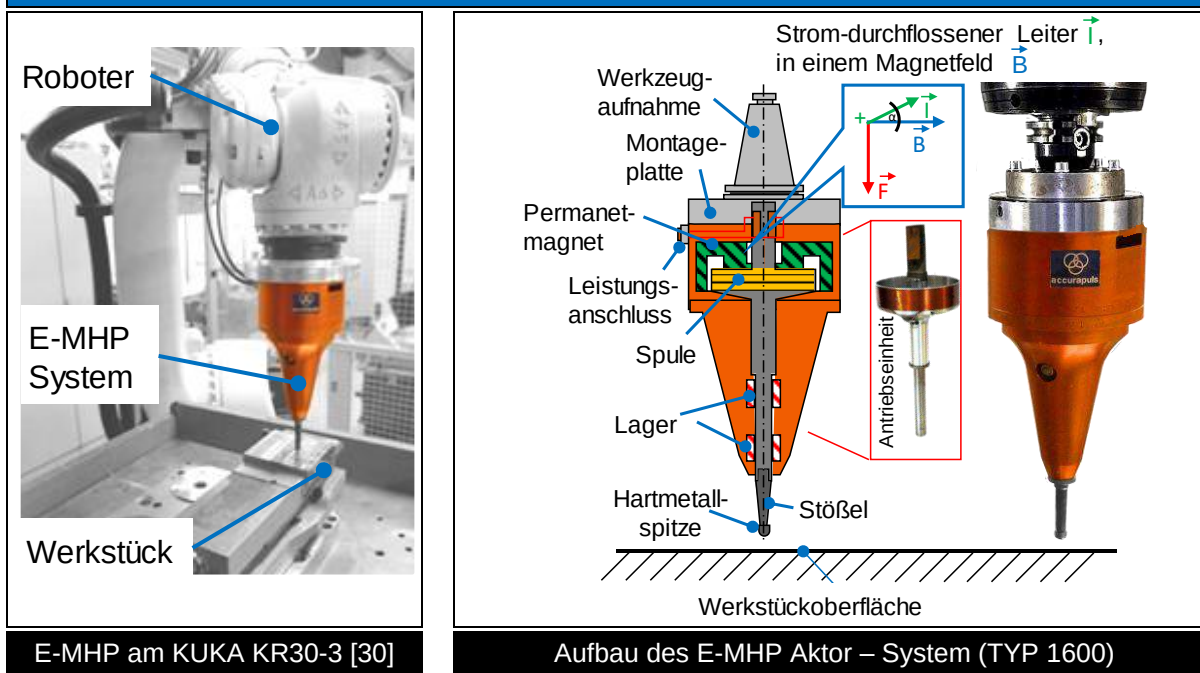


Abbildung 9: E-MHP Hammersystem der Fa. accurapuls

In Abhängigkeit der Werkzeug-Werkstoffpaarung stellt sich ein definierter elastischer Rückstoß zwischen Werkstück und Aktor ein. Wird der Abstand zwischen Hammerkopfspitze im oberen Totpunkt und der Werkstückoberfläche zu groß, liegt kein stabiles Oszillieren des Hammerkopfes vor. Die durch den elektrischen Antrieb erzeugte Energie reicht nicht mehr aus, um einen stabilen Prozess zu gewährleisten. Aus diesem genannten Grund ist es vor der Bearbeitung eines neuen Werkstoffes notwendig, den maximalen Abstand (Abrisshöhe) der Hammerkopfspitze zur Oberfläche zu eruieren. Für das elektrodynamische System werden analog zu den vorherigen Systemen die spezifischen Eigenschaften in der folgenden Tabelle festgehalten. In der hier vorliegenden Ausführung des E-MHP - Systems (Typ 1600) erfolgt die mechanische Anbindung der Aktorik mittels einer montierten Werkzeugschnittstelle. Wie in [31] gezeigt wird, kann das System durch diese Möglichkeit sowohl in einer Werkzeugmaschine als auch mit einem Roboter eingesetzt werden.

Frequenz	Gewicht	Abmessungen	Schnittstelle	Kugel Ø
20 - 500 Hz	> 6 kg	241x134 mm	Nicht definiert	1 - 24 mm
Einflussgrößen				
Intensität	0 - 60 VAC (0 - 100%)		Spannungsamplitude der Spule	
Hub	0,1 - 2 mm		Schlagabstand	

Tabelle 6: Eigenschaften und Einflussgrößen des elektrodynamischen Systems der Firma accurapuls TYP 1600

2.3.4 Mechanische Systeme

Diese Art der angetriebenen MHP- Bearbeitungswerkzeuge werden in der Regel an Werkzeugmaschinen oder Robotersystemen mit angetriebener Werkzeugspindel montiert, sodass die Rotationsbewegung in eine linear geführte Bewegung des Stößels umgesetzt wird. Ecoroll – Hersteller von Werkzeugen und Maschinen für die mechanische Oberflächenbearbeitung – stellte im Jahr 2016 eine mechanische Variante eines MHP-Aktors vor. Dabei handelt es sich um einen mechanischen Aktor, welcher durch eine Maschinenspindel bzw. einen Werkzeugantrieb im Revolver angetrieben wird. Der Aufbau dieses Systems umfasst einen Taumelring, um die Rotationsbewegung der Antriebswelle in eine Hubbewegung der angeordneten Schlagbolzen zu übertragen.

Frequenz	Gewicht	Abmessungen	Schnittstelle	Kugel Ø
200 - 300 Hz 300 - 400 Hz	Größe A: 21 kg Größe C: 30 kg	C: 431 x 227 mm A: 280 x 170 mm	SK, HSK	2 - 40 mm
Einflussgrößen				
Spindeldrehzahl	670 - 2670 U/min			
Hub	0 - 4 mm			

Tabelle 7: Eigenschaften und Einflussgrößen des mechanischen Systems der Firma Ecoroll

Eine Beeinflussung der Schlagenergie kann somit über die Amplitude der Taumelbewegung bestimmt werden. Diese Vorrichtung wird in den Patentschriften [13] sowie [32] ausgeführt und ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

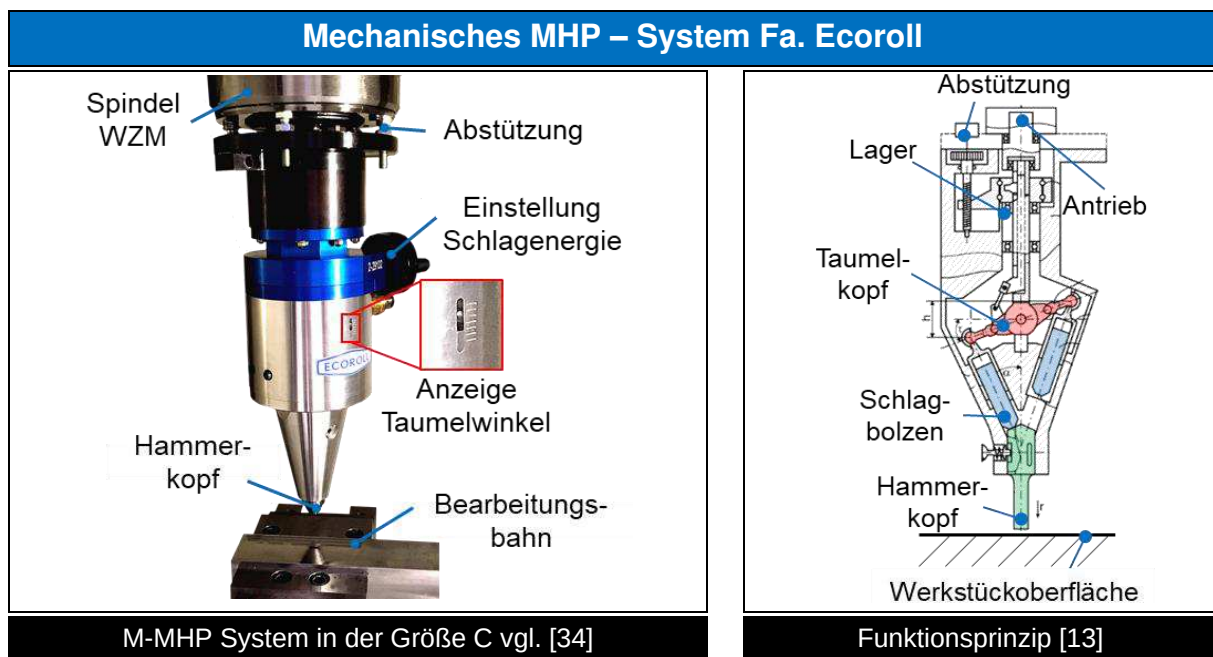


Abbildung 10: Mechanische Festhammervorrichtung Ecopeen der Fa. Ecoroll in der Baugröße C sowie das Funktionsprinzip

Dabei ist dieses Konzept in zwei Baugrößen ausgeführt, welche sich durch die Frequenz und der maximal resultierenden Schlagenergie unterscheiden. Die Eigenschaften dieses mechanischen Aktorsystems sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Die Schlagenergie der beiden Systeme wird in [33] für die Größe A mit 20 - 200 mJ und für die Größe C mit 50 - 700 mJ angegeben. Das M-MHP System ist in Abbildung 10 in der Größe A im eingebauten Zustand sowie in der Schnittdarstellung aus der Patentschrift dargestellt. Die hier angeführten Systeme sind bis zum aktuellen Zeitpunkt nicht am Markt verfügbar, weshalb hier lediglich auf die Patentschriften und Forschungsarbeiten verwiesen werden kann.

2.3.5 Piezoelektrische Systeme

Piezoelektrische Systeme, wie das Piezopeening-System der Daimler AG [14] in der Abbildung 11 rechts, nutzen den inversen piezoelektrischen Effekt aus. Dieser führt bei Anlegen einer Wechselspannung an ein piezoelektrisches Element eine proportional zur Spannung gesteuerte Längenänderung aus und führt elektrische Energie in eine mechanische Bewegungsenergie über [35]. Dabei hängt die Auslenkung als auch die Bewegungsfrequenz eines einzelnen Piezo-Elements von seiner Bauform, der verwendeten Piezokeramik, der Betriebsspannung und vom aufgenommenen Strom ab [36]. Piezoelektrische MHP-Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass in der Regel der Hammerkopf direkt an den Piezo-Aktor gekoppelt ist. Somit handelt es sich hierbei um ein Weg-gebundenes Verfahren bei dem die Auslenkung proportional zur angelegten Spannung am Piezo-Stapel vorliegt, wie dies in [37, S. 215] beschrieben ist (siehe auch Kapitel 5.1.1). Das IAM-WK des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) setzt ein piezoelektrisches System im Laborstatus ein, welches in Abbildung 11 links im schematischen Aufbau gezeigt ist. Dieses arbeitet mit einer Frequenz von 500 Hz und einer Amplitude von 18 μm .

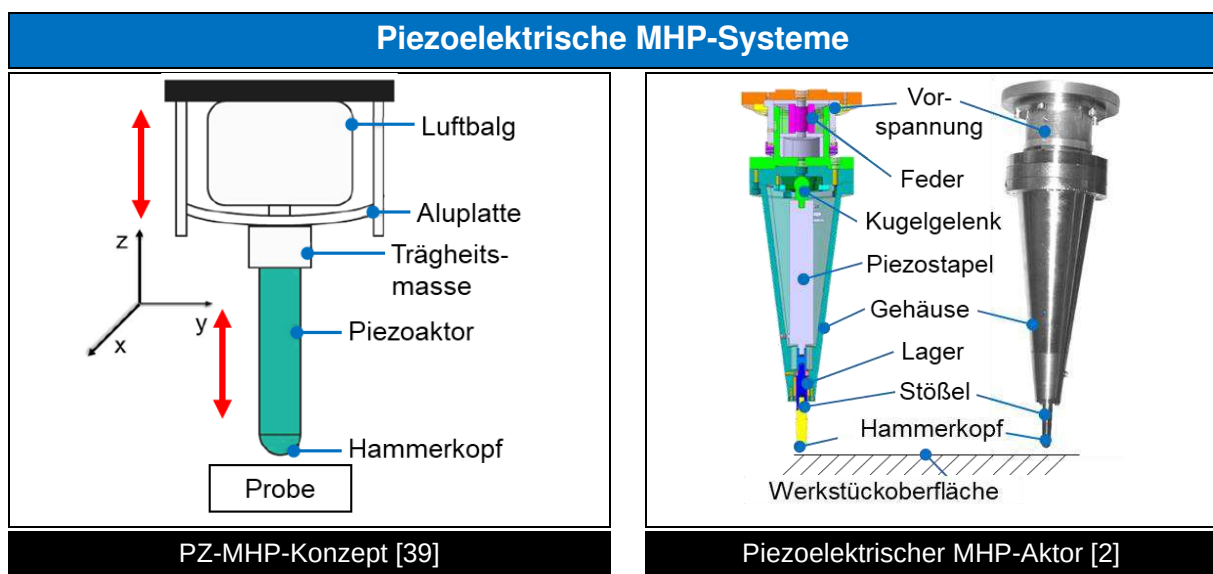


Abbildung 11: Funktionsprinzip und Aufbau piezoelektrischer MHP-Systeme

Da dieses System Aluminium-Strebenprofile und eine integrierte Kreuztischlösung nutzt, können hier im Gegenzug zu den ebenfalls in Abbildung 11 rechts dargestellten System nur Bauteile kleinerer Abmessungen bearbeitet werden [38].

2.3.6 Sonotroden Systeme

Der klassische Einsatz von Sonotroden liegt im Bereich der Ultraschallbearbeitung, wie etwa dem Ultraschallschweißen oder dem Ultraschallschwinglappen. Klassischerweise liegen die Arbeitsfrequenzen der Anregung und damit auch der Sonotrode bei $f = 20 \text{ kHz}$ bis zu $f = 60 \text{ kHz}$ bei einer Amplitude zwischen 15 und $40 \mu\text{m}$ (vgl. [40]). Im Allgemeinen bestehen Systeme basierend auf Sonotroden im Wesentlichen aus den Komponenten Ultraschall-Generator (engl. Transducer), einem Schallwandler, einem Verstärker (engl. Booster) und einer Sonotrode selbst. Diese Komponenten sind auf einen gemeinsamen Resonanzbereich mit einer festgelegten Resonanzfrequenz abgestimmt, um eine definierte Schwingungsform zu generieren. In den meisten Fällen ist die definierte Schwingungsform eine longitudinale Verschiebung (siehe [41]). Neben den oben angeführten Einsatzmöglichkeiten finden diese Systeme auch im Bereich des maschinellen Oberflächenhämmerns Einsatz. Es ist grundsätzlich zwischen direkten und indirekten Technologien zu unterscheiden. Nach SCHULZE [17] besitzen indirekt Sonotroden betriebene Systeme keine direkte Anbindung zum Hammerkopf und übertragen die Schwingung durch einen Impuls.

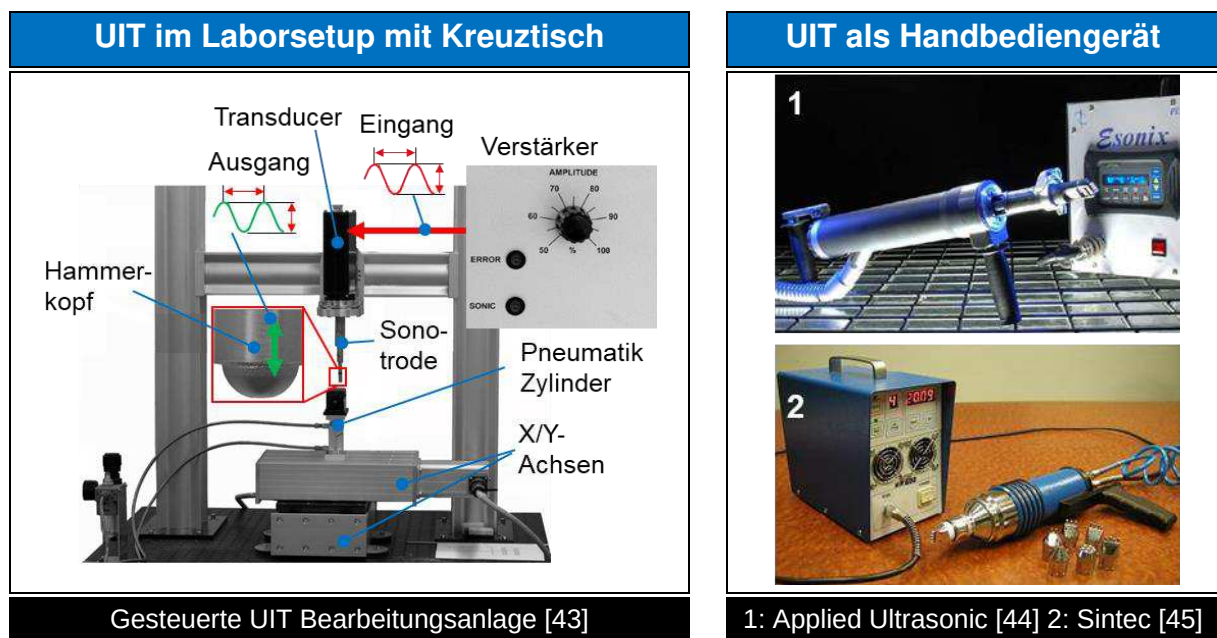


Abbildung 12: UIT-Systeme im Labor- und Handbetriebssetup, links:UIT-Anlage im Laborbetrieb, rechts: Handgeführte UIT-Systeme

Durch die fehlende Anbindung von Sonotrode zu Hammerkopf differiert daher die Anregungsfrequenz die Oszillationsfrequenz des Hammerkopfes. Wie in [42, S. 678 - 683] beschrieben, führt eine Anregungsfrequenz von $f = 20 \text{ kHz}$ zu einer

Hämmerfrequenz von ca. $f = 3$ kHz des Hammerkopfes. Das Ultrasonic Impact Treatment (UIT), als indirekt gekoppeltes Wirkprinzip, ist dem Ultrasonic Needle Peening (UNP), dem Ultrasonic Peening (UP), dem Ultrasonic Impact Peening (UIP) oder dem Ultrasonic Shock Treatment (UST) von der Funktionsweise gleichzusetzten. Bei der Ausführung als direkt gekoppeltes System ist das UIT-Verfahren in der Lage, die Frequenz von etwa $f = 24$ kHz und einem Hub von $h = 23 - 55$ μm direkt auf die Werkstückoberfläche zu übertragen. Die Anwendung dieses Systems liegt in der Nachbearbeitung von Schweißnähten [17] oder auch in der Steigerung der Kaltverfestigung von IN718 [43]. In Abbildung 12 ist eine mittels Profilen und einem Kreuzzisch aufgebaute UIT-Anlage der TU München dargestellt. Der Hub der Hammerkopfbewegung ist in diesem Fall mit 55 μm bei einer Frequenz von $f = 27$ kHz angegeben. Daneben sind zwei handgeführte Systeme von Applied Ultrasonics vom Typ Esonix und ein System der Firma Sintec abgebildet.

2.3.7 Elektrodynamisches Aktorsystem

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Systemen, die z.B. nach dem Prinzip eines harmonischen Oszillators arbeiten [29], handelt es sich bei dem hier beschriebenen Aktorsystem um einen geregelten Linear-Aktor, dessen Wirkprinzip auf der Änderung des magnetischen Widerstandes, der Reluktanz, beruht. Dieser ist als geregelter Kurzhub – linear – Reluktanzmotor ausgeführt. Der Begriff „Kurzhub“ – im Zusammenhang mit dem hier vorgestellten Wirkprinzip – beschreibt eine axiale Bewegung des Läufers von der ausgelenkten Position hin zur Nullposition, wo ein Minimum an magnetischem Widerstand vorliegt. Der Hub des Systems liegt bei 1 mm und ist über den gesamten Frequenzbereich anwendbar. Aufgrund der verschobenen Zahnstellung zwischen Stator und Läuferseite, welche im hier vorliegenden Fall um genau eine Hubbewegung versetzt ist, wird durch das Durchfließen der Spule mit Strom ein Magnetfeld aufgebaut, welches den beweglichen Läufer als auch den feststehenden Stator durchsetzt (Abbildung 13). Im weiteren Schritt kommt es zu einer Verschiebung bzw. zu einer Ausrichtung zwischen Stator und Läufer. In der Ausgangssituation ist der der axiale Versatz des feststehenden Stators und des in axial frei beweglichen Aktors zu sehen.

Frequenz	Gewicht	Abmessungen	Schnittstelle	Kugel Ø
1 - 1000 Hz	2 kg	173 x 63 mm	HSK 63	1 - 24 mm
Einflussgrößen				
Intensität	0 - 60 DC		Spannungsversorgung	
Hub	1 mm konstant		Schlagabstand	

Tabelle 8: Eigenschaften und Einflussgrößen des elektromagnetischen Systems

Im Bereich der Verzahnung an der Statorseite kommt es zu einer Ablenkung des magnetischen Flusses. Dieser hängt neben den geometrischen Randbedingungen – wie der Ausführung der Zahngeometrie auf der Läufer- und Statorseite auch –

wesentlich von dem Luftspalt zwischen Stator und Läufer ab. Bei idealer Positionierung des Stators und des Läufers zueinander (Überdeckung der Zähne = Endposition) liegt ein homogener magnetischer Fluss vor. In dieser Position stellt sich der geringste magnetische Widerstand bei gleichzeitig maximaler Gesamtinduktivität ein, während in der Ausgangssituation ein Minimum der Induktivität herrscht. Mit dem Zusammenhang zwischen der Reluktanz $\mathcal{R}$ und der Induktivität L ist es nun möglich, die axial wirkende Kraftkomponente, in Abhängigkeit der Position, folgendermaßen zu formulieren:

$$F_{A(z)} = \frac{1}{2} (NI)^2 \frac{1}{\mathcal{R}_{(z)}} \quad (6)$$

Mit der Vereinfachung, dass der Reziprokwert der Reluktanz die Permittanz $\mathcal{P}$ (magnetische Leitwert) ist, lässt sich die Gleichung zur Berechnung der axial wirkenden Kraft weiter vereinfachen zu:

$$\mathcal{P} = \frac{1}{\mathcal{R}_{(z)}} \quad (7)$$

$$F_{A(z)} = \frac{1}{2} \mathcal{P} (NI)^2 \quad (8)$$

Dieses Aktorsystem ist eine Entwicklung des IFT und führt den Namen: „DIP – MHP – Aktor“ (Deterministic Impact Peening) Das Aktorkonzept ist unter der Veröffentlichungsnummer WO2019096834 dokumentiert und schutzrechtlich abgesichert [12]. Diese Bezeichnung resultiert aus der Tatsache, dass das System in der Lage ist, geregelte Bewegungen des Hammerkopfes auszuführen. Kommerziell ist dieses System nicht erhältlich. Die konzipierte Antriebseinheit mit geführtem Hammerkopf ist mit einer integrierten Sensorik zur Überwachung des Schlagprozesses ausgestattet. Eine Leistungselektronik übernimmt die Steuerung der Aktorbewegung und damit die Energieeinbringung in den Werkstoff. Das integrierte Messsystem zur Positionserkennung besteht aus einer Infrarot – Sendeeinheit und einem Fototransistor als Empfängereinheit. Um die Bewegung eines Messobjektes zu detektieren, sind Sendeeinheit und Empfänger in einem Gehäuse gegenüberliegend angeordnet. Dies bietet den Vorteil, dass beide Einheiten nicht aufeinander ausgerichtet werden müssen. Beide Einheiten sind in einem Kunststoffgehäuse verbaut, welches einem C-Profil ähnelt. Das Spezielle an dieser Gabellichtschranke ist ein Analogausgang, welcher in Abhängigkeit von der Abdeckung des Fototransistors durch eine Klinge einen Kollektorstrom ausgibt. Eine eingebaute Version des Messsystems ist in der folgenden Abbildung zu sehen. Ein wesentliches Merkmal dieses Aktors ist die Möglichkeit, das System mit periodischen als auch mit einer frei programmierbaren Stößelbewegung über einen Mikro-Controller – gekoppelt mit dem Wegesssystem – zu betreiben. Durch Vorgabe einer definierten kinetischen Energie des Hammerkopfes wird mittels der Wegmessung die elektrische Energie geregelt, bis

der Vorgabewert erreicht wird. Somit ist es möglich, die eingebrachte Umformarbeit zu steuern.

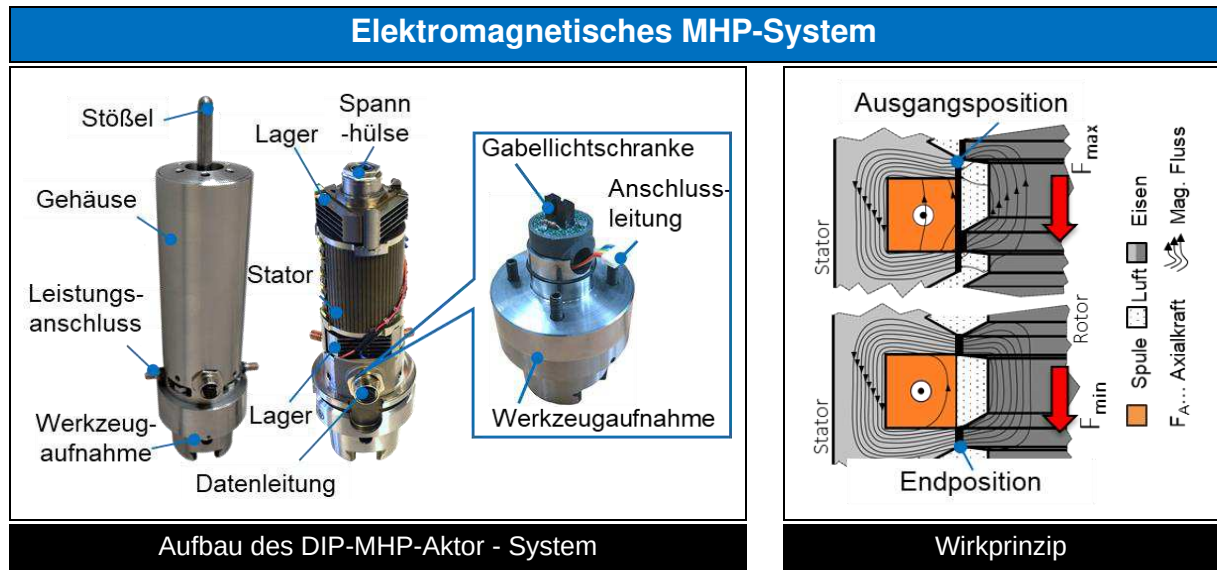


Abbildung 13: DIP-MHP-Aktor des IFT (links) und schematische Darstellung des Wirkprinzips auf Basis der magnetischen Reluktanz (rechts) nach [33]

2.4 Nomenklatur in der MHP-Bearbeitung

Wie im Kapitel 2.1 erwähnt, folgte auf Basis der Terminologie zum maschinellen Oberflächenhämmern [4] die Erstellung der VDI-Richtlinie 3416 mit dem Ziel, eine Standardisierung der Begrifflichkeiten des Verfahrens einzuführen. Folgend werden die einzelnen Parameter sowie die Symboliken der VDI-Richtlinie vorgestellt und ihre Bedeutung kurz beschrieben. Für eine detailliertere Beschreibung der Parameter wird auf die entsprechende VDI-Richtlinie 3416 verwiesen. In Abbildung 14 werden die Symbole der Parameter mit der festgelegten Einheit dargestellt. Die in Abbildung 14 vorgestellten Parameter und Symboliken bezeichnen – beginnend bei der Nummer (1) bis zur Nummer (11) – einstellbare Verfahrensparameter, welche direkt durch den Benutzer vorgegeben werden können. Beginnend bei der Nummer (1) bezeichnet der Parameter d den Durchmesser des Hammerkopfes im Falle einer kugelförmigen geometrischen Form in mm. (2) beschreibt die Vorschubgeschwindigkeit v in mm/min, mit welcher der Hammerkopf entlang eines definierten Bearbeitungspfades mittels einer NC-geführten Achse bewegt wird. Die (Hämmer)-Frequenz f in Hz oder 1/s beschreibt die vollständig periodischen Hubzyklen des Hammerkopfes (3). Kombiniert man die beiden Parameter (1) und (2) entsprechend der Gleichung 1, so kann der Eindruckabstand a in mm berechnet werden (4). Dieser entspricht dem Mittelpunktabstand zweier in Vorschubrichtung aufeinanderfolgenden Einzeleindrücke. In der Regel findet die MHP-Bearbeitung auf Flächenbereichen Anwendung.

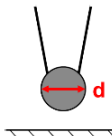
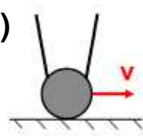
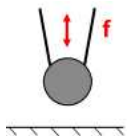
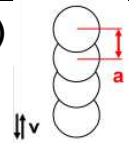
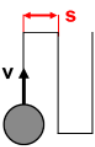
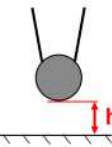
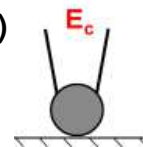
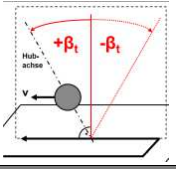
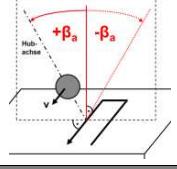
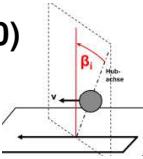
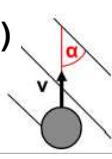
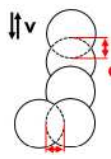
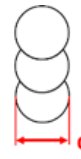
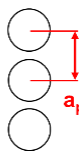
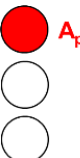
MHP- Parameter nach VDI 3416	1)	2)	3)	4)
				
	d in mm	v in mm/min	f in Hz	a in mm
5)	6)	7)	8)	9)
				
s in mm	h in mm	E_c in Joule	β_t in Grad	β_a in Grad
10)	11)	12)	13)	14)
				
β_i in Grad	α in Grad	o_i in mm	d_i in mm	A_i in mm ²
15)	16)	17-Überlappung o_s in % 23) Kontaktzeit Δt in s Strukturdichte S_p		
				
a_p in mm	A_p in mm ²	Aspektverhältnis λ_p Flächenanteil C_p in % Strukturabmessung $l_p; w_p; d_p; t_p$ in mm		

Abbildung 14: Bezeichnung und Symbole der Prozessparameter für das maschinelle Oberflächenhämmern nach VDI 3416 [1]

Wird nun eine Fläche mit mehreren Einzelbahnen bearbeitet, so beschreibt (5) s in mm den Bahnabstand. Im Falle von MHP-Systemen mit periodischem Kontakt zur Werkstückoberfläche beschreibt der Parameter (6) h in mm das Maß der linearen Bewegung des Hammerkopfes vom oberen Totpunkt der Bewegung bis zur Werkstückoberfläche. Aus den beiden gegebenen Parametern (3) und (6) ist es mit der Kenntnis über die Größe der bewegten Masse möglich, die (Kontakt)-Energie E in Joule (7) zum Zeitpunkt des Auftreffens des Hammerkopfes auf die Werkstückoberfläche zu beschreiben. Diese Bewegungsenergie muss durch das Aktorsystem bereitgestellt werden. Die weiteren Einstellparameter (8) - (11) bezeichnen Winkelmaße der MHP-Bearbeitung. So beschreibt (8) β_t den Kippwinkel in Grad der Hammerkopfachse zum Normalvektor der Bearbeitungskurve in Vorschubrichtung. Die positiv oder negativ gerichtete Anstellung wird als schleppende ($\beta_t > 0^\circ$) oder als stechende ($\beta_t < 0^\circ$) bezeichnet. Eine Winkelausrichtung in der Ebene quer zur Bearbeitungsrichtung wird entsprechend der Nr. (9) als Anstellwinkel β_a in Grad geführt. Auch hier wird zwischen einer stechenden und einer schleppenden Bearbeitung in Abhängigkeit der bearbeiteten Fläche unterschieden. Beide Winkel miteinander kombiniert ergeben den Auftreffwinkel β_i in Grad (10). Als letzter zu beschreibende Winkel, welcher durch die Bearbeitung vorgegeben werden kann, ist der

Bahnorientierungswinkel α in Grad zu nennen (11). Diese Winkelbeschreibung orientiert sich an der Bearbeitungsrichtung des vorhergegangenen Bearbeitungsvorganges und ist in der Bearbeitungsebene aufgespannt. Die Bezeichnung der Parameter (12) bis (23) beschreiben daraus resultierende Bearbeitungsparameter, welche durch die zuvor gesetzten Bedingungen (1) bis (11) entstehen. So bezeichnet o_s in % (12) die Überlappung einzelner resultierender Eindrücke. Deren projizierte Eindrucksfläche A_i in mm² (14) berechnet sich aus dem resultierenden Eindrucksdurchmesser d_i in mm (13). Analog zu den zuvor beschriebenen Parametern (4) und (14) gibt es bei einer gezielt forcierten Oberflächenstrukturierung eine eigene Bezeichnung für nebeneinanderliegende Strukturen als auch deren projizierte Fläche. Diese werden unter Eindruckabstand zwischen geometrischen Strukturen a_p in mm und projizierte Fläche der geometrischen Struktur A_p in mm² geführt. Die Strukturdichte S_p dient der Beschreibung der Gesamtfläche der Eindruckgeometrie auf der Werkstückoberfläche ohne elastischen Anteil bezogen auf eine Fläche. Das Aspektverhältnis λ_p , der Flächenanteil C_p in % zur Beschreibung der prozentualen Überdeckung der Gesamtoberfläche mit sekundär geometrischen Elementen und dessen Strukturabmessung l_p, w_p, d_p, t_p (Länge, Breite, Durchmesser, Tiefe) in mm vervollständigen die Strukturbezeichnungen. Unabhängig von der Form des Hammerkopfes findet abschließend noch eine Bezeichnung der Kontaktzeit Δt in s statt, welche die Zeitspanne beschreibt, in der sich der Hammerkopf mit der Werkstückoberfläche in Kontakt befindet.

2.5 Wirkgrößen bei der MHP-Bearbeitung

Während des Kontaktes zwischen der Hammerkopfspitze und der Werkstückoberfläche kommt es zu elastisch-plastischen Kontaktbedingungen. Die dabei wirkenden Kräfte müssen den elastischen Bereich und somit die Streckgrenze des Werkstoffes überschreiten, um eine plastische Verformung an der Oberfläche zu erwirken, wie JOHNSON in [46] ausführt. Wird dieser werkstoffspezifische Kennwert nicht überschritten, handelt es sich um einen vollkommen reversiblen Prozess an der Werkstoffoberfläche. In diesem Falle findet keine plastische Deformation statt. Bei einer Überschreitung dieses Kennwertes tritt eine Kombination aus elastischem und plastischem Verhalten auf, wodurch es zu Verfestigungsmechanismen innerhalb des Werkstoffes im Bereich der Oberflächenrandzone kommt (siehe hierzu [47] und [48]). Die eingebrachte Verformungsenergie kann über die Energiedifferenz ΔE beschrieben werden, welche die Energieabweichung des Hammerkopfes vor und nach dem Werkstückkontakt darstellt. Dabei setzt sich diese Umformungsenergie aus einem elastischen Teil E_E und einem plastischen Teil E_P zusammen.

$$\Delta E = E_E + E_P \quad (9)$$

Nach der Überschreitung des elastischen Bereiches des Werkstoffes kommt es zu einer bleibenden plastischen Verformung an der Oberfläche. Diese plastische

Verformungsenergie resultiert in Versetzungsbewegungen und in einer Strukturänderung des ursprünglichen Phasengitters sowie der Induzierung von Druckeigenspannungen, (siehe [30], [49], [50]).

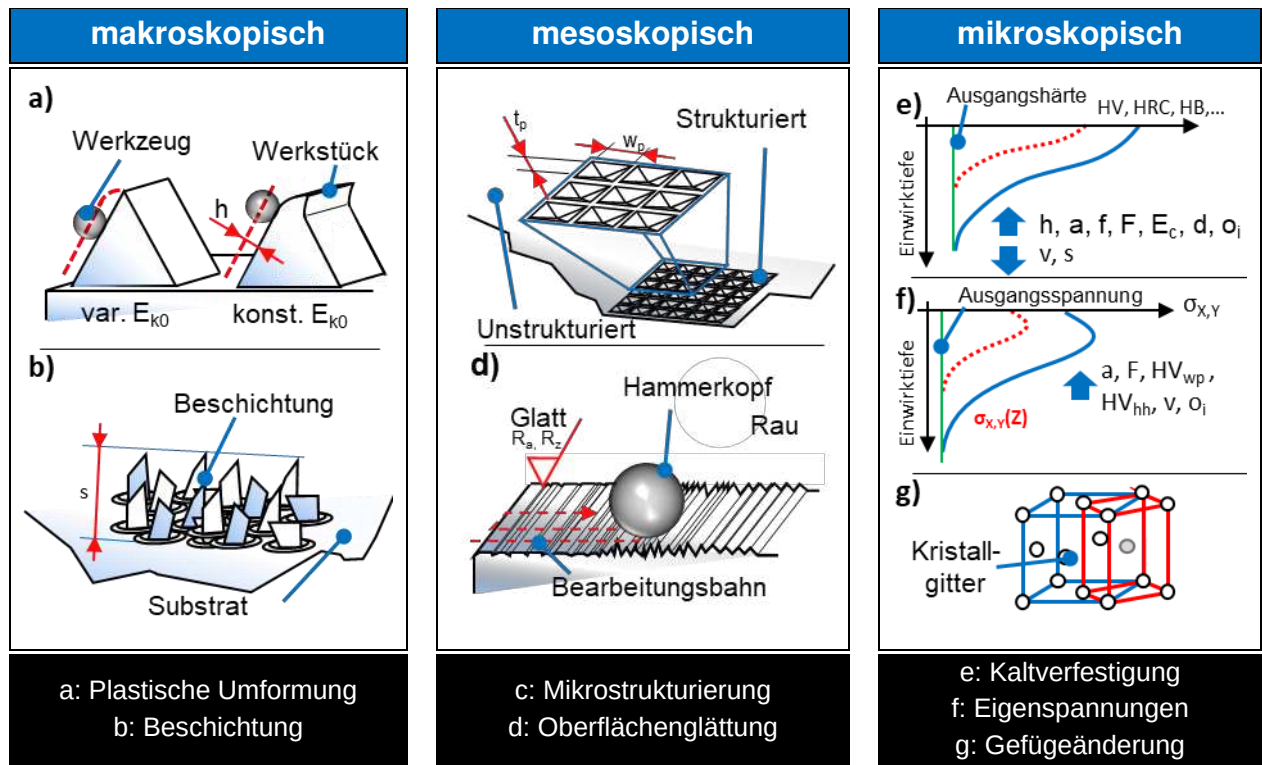


Abbildung 15: Einteilung der Wirkgrößen bei der MHP-Bearbeitung

Neben diesen Effekten bewirkt die MHP-Bearbeitung eine Steigerung der Oberflächenhärte und führt in weiterer Folge zu einer erhöhten Verschleißfestigkeit der bearbeiteten Oberfläche [51]. Durch das definierte Auftreffen des Hammerkopfes auf der Werkstoffoberfläche kommt es zu lokalen Umformungen entsprechend der Form des Hammerkopfes (vgl. [30]). In Abhängigkeit der geometrischen Form des Hammerkopfes und der Bearbeitungsparameter wie etwa der Hämmerfrequenz f , dem Eindrucksabstand a und Bahnabstand s wird auch die Oberflächenrauheit beeinflusst. Einen Überblick über die resultierenden Effekte beim maschinellen Oberflächenhämmern bietet die Abbildung 15. Entsprechend dieser Darstellung werden die Auswirkungen der MHP-Bearbeitung auf die Werkstoffoberfläche in drei Kategorien eingeteilt, welche der Effektgröße zugeordnet werden können. Hierbei erfolgt die Zuordnung der Effektgrößen bei der MHP-Bearbeitung durch die Einteilung in eine mikro-, meso- und makroskopische Ebene.

2.5.1 Plastische deformation durch die MHP-Bearbeitung

Bedingt durch die lokale plastische Umformung im Kontaktbereich der Hammerkopfspitze auf der Werkstückoberfläche ist zwangsläufig mit Formabweichungen zur Ausgangsgeometrie zu rechnen, wie hierzu in [4] und [7],

sowie weiter in [19] und [20] ausgeführt wird. In Abhängigkeit von dem verwendeten Aktorsystem und den eingestellten Prozessparametern nimmt auch der Werkstoff sowie das Maschinensystem Einfluss auf diese lokale Umformung. Im Gegensatz zu der geforderten plastischen Umformung bei der Glättung vorliegender Rauheitsspitzen zur Minimierung der Oberflächenrauheit sind es hier ungewollt auftretende Effekte, welche die Funktion einer bearbeitenden Oberfläche einschränken. In [30] wird bei der MHP-Bearbeitung ein als Materialaufwerfung benannter Effekt beschrieben, welcher in der Übergangszone zwischen bearbeiteten und unbearbeiteten Oberflächenbereich auftritt. Durch den in Bearbeitungsrichtung vorangetriebenen Werkstoff kommt es zu einer Aufstauung eines Materialkammes, wodurch es neben der Absenkung der Bearbeitungsfläche auch zu einer Überschreitung des Ausgangsniveaus kommt.

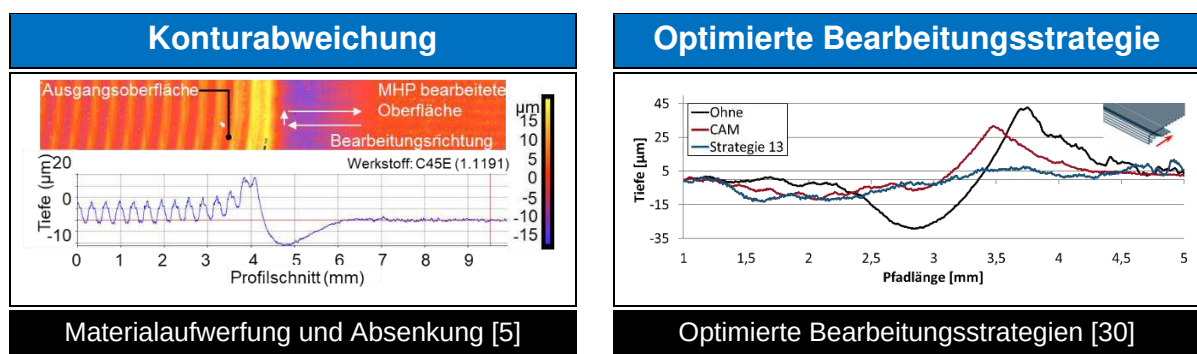


Abbildung 16: Ergebnis der plastischen Umformung durch einen MHP-Prozess, links: Querschnittsprofil einer bearbeiteten Fläche, rechts: Querschnittsprofil einer bearbeiteten Fläche mit und ohne Kantenschutzstrategien

Neben dieser Materialaufwerfung kommt es am Ende zu einer Absenkung der letzten Bearbeitungsbahn in Bezug auf die zuvor bearbeitete Oberfläche (vgl. [5]). Durch die fehlende Materialverdrängung eines nachgelagerten Bearbeitungspfades wird die letzte Bahn nicht aufgefüllt und es entsteht ein Effekt, wie er in dem Profilschnitt in Abbildung 16 links zu sehen ist. WIED [52] zeigt, dass eine Änderung des Bahnabstandes s die Materialaufwerfung beeinflusst. Durch die gezielte Wahl der Bearbeitungsparameter, wie etwa der Reduzierung des Hubes h , kann die kinetische Energie des Werkzeuges und somit auch die geleistete plastische Umformarbeit im Werkstück gesteuert werden. Abbildung 16 rechts zeigt anhand optimierter Bearbeitungsparameter und Bearbeitungsstrategien, dass die lokale plastische Deformation aufgrund der Materialaufstauung bei dem Werkstoff C45E (1.1191) gemindert werden kann. In [53] ist diese Materialaufstauung längs- und quer zur Bearbeitungsrichtung am Werkstoff 1.2379 unter Anwendung eines elektrodynamischen MHP-Aktorsystems zu beobachten. Dabei dient ein Industrieroboter als Werkzeugträger, welcher durch die MHP-Bearbeitung in Schwingung gebracht wird. Diese überträgt sich direkt in die Werkstoffoberfläche und ist als Welligkeit quer zu Bearbeitungsrichtung erkennbar. Im Vergleich dazu zeigt STEITZ [6], dass bei der MHP-Bearbeitung von Grauguss die zu hohe eingebrachte

Umformarbeit in die Werkstückoberfläche zu einer Zerrüttung der Oberfläche führt. Dies resultiert durch eine Überbeanspruchung in einer Rissbildung im Oberflächenbereich, welche zu einer Materialtrennung führt (Risse und Grübchen). Dadurch kommt es wiederum zu einem Anstieg der Oberflächenrauheit. In dem Beispiel aus [6] kommt es durch die zu hohe plastische Umformarbeit bei der MHP-Bearbeitung zu einem Ausbrechen von sphärischen oder auch lamellaren Grafitstrukturen im Gusswerkstoff EN-GJL-250.

2.5.2 Beschichten durch die MHP-Bearbeitung

Gemäß der DIN 8580 ist das Aufbringen eines festen Stoffes (pulverförmiger oder körniger Zustand) auf ein Werkstück in die Hauptgruppe des Beschichtens einzuordnen. Dieses Aufbringen eines pulverförmigen festen Stoffes auf einen Trägerwerkstoff kann unter Anwendung der MHP-Bearbeitung erfolgen. Eine entsprechende Patentschrift zur mechanischen Beschichtung unter Anwendung des maschinellen Oberflächenhämmern findet sich unter [54]. Das Thema des Einbettsens von kleinen Partikeln in eine Werkstoffoberfläche unter Anwendung des MHP-Prozesses wurde in der Vergangenheit mehrfach untersucht. Neben dem Einbetten von Yttrium Oxid (Y_2O_3) in den Stahlguss vom Typ GP4M, eine Sonderlegierung mit verbesserten Duktilitäts- und Zähigkeitseigenschaften für die Herstellung von Walzen [55], ist in [56] und [51] das Beschichten (Einbetten) von WC-Partikeln mit einer Korngröße zwischen 0,9 und 90 μm ausgeführt. Als verwendete Trägerwerkstoffe wurde der Werkzeugstahl vom Typ AISI D2 [56] als auch die Aluminiumlegierung vom Typ Al 6060 sowie die Bronze-Legierung vom Typ CuZn39Pb [30] eingesetzt. Es konnte somit unter Anwendung des MHP-Prozesses eine homogene Oberflächenschicht aufgebaut werden, welche neben der Verbesserung der Verschleißbeständigkeit auch den Zweck zur Erhöhung des Reibwertes bei Werkstoffkontakten verfolgt.

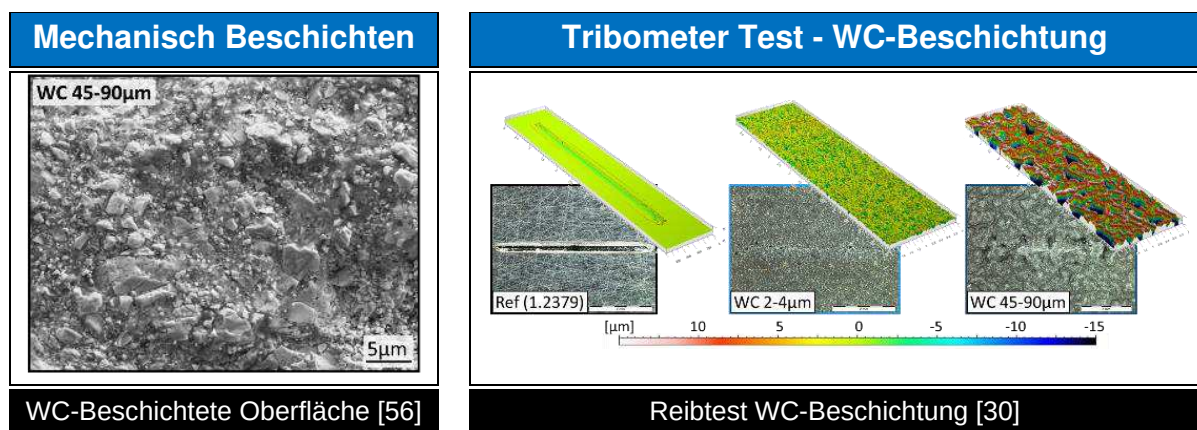


Abbildung 17: Beschichtung von Werkstoffoberflächen durch das MHP-Verfahren, links: Detailaufnahme einer mit WC-Partikel mechanisch beschichteten Oberfläche, rechts: Ergebnisse eines Tribometertests von un- und beschichteten Oberflächen

Der Vorgang zum Beschichten einer weicheeren Werkstückoberfläche mit Hartstoffpartikeln bedingt zunächst einen Schichtauftrag eines Pulver-Binder-Gemisches. Folgend werden die einzelnen Partikel beim Auftreffen des Hammerkopfes in die Werkstoffoberfläche gedrückt. Somit entsteht eine Fügeverbindung zwischen Korn und Werkstoff. Die erhöhte Verschleißfestigkeit der mechanisch beschichteten Oberfläche konnte unter Anwendung eines Tribometers zur Überprüfung der Verschleißfestigkeit festgestellt werden, (vgl. [51]). In Abbildung 17 links zeigt sich, dass unter Einwirkung eines E-MHP - Prozesses ein homogener Schicht-Substratverbund aus WC-Partikel und dem Werkstoff X155CrVMo12-1 (1.2379) erzeugt werden konnte. In Abhängigkeit von der eingesetzten Korngröße der WC-Partikel wird die Oberflächenrauheit beeinflusst. Das Ergebnis einer Schwing-Reib-Verschleiß-Tribometer-Untersuchung (SRV) der in [56] eingebetteten WC-Partikel in den Werkstoff X155CrVMo12-1 (1.2379) wurde in [30] vorgenommen. Bei dieser Untersuchung wird eine Prüfkugel aus dem Werkstoff 100Cr6 bei konstanter Vorspannung oszillierend über die Werkstückoberfläche geführt. Die Auswertung der Verschleißfestigkeit erfolgt über die Messung des abgetragenen Volumens am Werkstück. Das Ergebnis für diesen Werkstoff ist in Abbildung 17 rechts dargestellt. Hierbei ist deutlich der kaum vorhandene Verschleiß an der Oberfläche bei einer WC-Beschichtung zu erkennen.

2.5.3 Oberflächenglättung durch die MHP-Bearbeitung

Das maschinelle Oberflächen-Verfahren ist in der Lage über das gezielte Setzen von Einzeleinschlägen auf der Werkstückoberfläche und der daraus resultierenden plastischen Deformation die Rauheitsspitzen einer Ausgangsoberfläche umzuformen. Durch diese Umformung kommt es zu einer Reduzierung der Oberflächenrauheit. So ist es möglich, in weichen Werkstoffen eine hohe plastische Umformung herbeizuführen, wohingegen bei sehr harten Werkstoffen wie etwa Hartmetall eine geringe plastische Deformation zurückbleibt (vgl. [57]). Um Rauheit und Welligkeit unterscheiden zu können, muss eine Hochpassfilterung entsprechend ISO 4288 vorgenommen werden. Das Thema der Oberflächenglättung unter Anwendung des maschinellen Oberflächenhämmerns ist eine Themenstellung, welche in vielen Veröffentlichungen bereits ausführlich untersucht worden ist. So sind unter anderem der ledeburitische Kaltarbeitsstahl 1.2379 als auch die Aluminiumlegierungen AlMgSi0,5 (3.3206) Teil der Untersuchung in [30], und die beiden Aluminiumlegierungen AlCu4Mg1 (3.1355) und AlMg1SiCu (3.3211) wurden in der Arbeit [6] untersucht. Die Glättung der Oberfläche des Graugusswerkstoffes EN-JS-2070 (GGG70L) wurde in [58] behandelt, die Werkstoffe EN-GJS-HB265 und EN-GJL-250 in [6]. Für die Titanlegierung Ti-6Al-4V wurden mit dem P-MHP System erste Versuche zur Oberflächenglättung in [59] vorgenommen. Wie bereits erwähnt, nehmen die Werkstoffe als auch die gewählten Bearbeitungsparameter gleichermaßen Einfluss auf den Effekt der Oberflächenglättung.

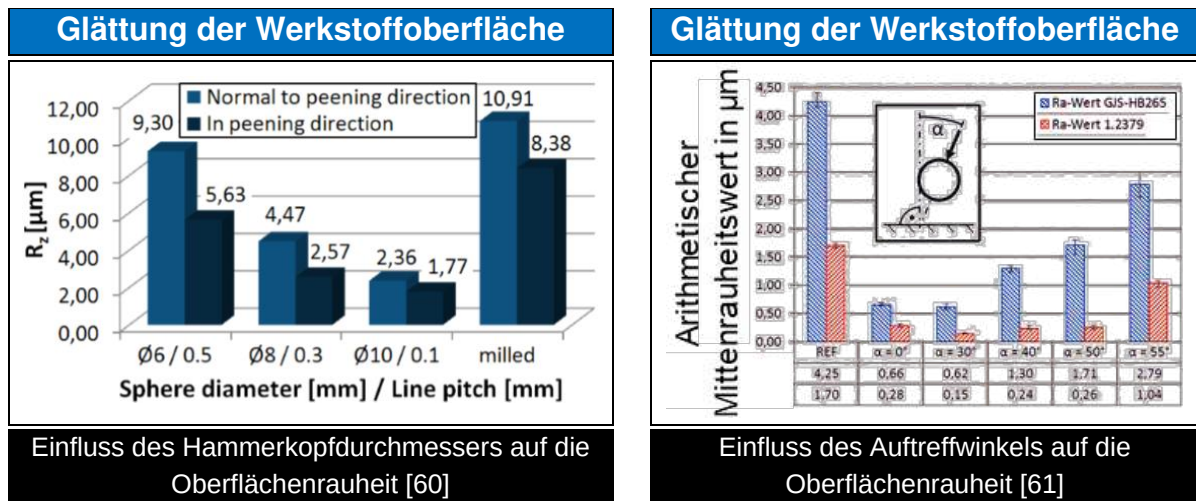


Abbildung 18: Auswirkung der MHP-Bearbeitung auf die Oberflächenrauheit, links: Rauheitswerte in Längs- und in Querrichtung, rechts: Auswirkung des Anstellwinkels auf die Rauheit

So konnte im Allgemeinen nachgewiesen werden, dass bei der Verwendung eines großen Hammerkopfdurchmessers d eine bessere Oberflächenglättung zu erzielen ist. Dies ist für das P-MHP - Verfahren [2], das E-MHP (siehe [60] und [6]) als auch für das Piezopeening [62] zutreffend. Hierzu ist in Abbildung 18 links der Einfluss des Hammerkopfdurchmessers bei der E-MHP - Bearbeitung auf die Oberflächenrauheit bei Messung längs- und quer zur Bearbeitungsrichtung (XY-Ebene) des Werkstoffes C45E (1.1192) dargestellt. Neben dem Einfluss der Größe des Hammerkopfes kann zudem die Auswirkung der Bearbeitungsrichtung auf die Oberflächenrauheit gezeigt werden. So gilt, dass quer zur Bearbeitungsrichtung höhere Rauheitswerte zu erwarten sind als in Längsrichtung. Im Falle des E-MHP - Verfahren führt zudem eine Erhöhung der Hämmerfrequenz bei gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit, zu einer verbesserten Oberflächenglättung, (siehe hierzu [60] und [6]). Gleiches gilt auch für das pneumatische Verfahren und das Piezopeening [2]. Dies kann auf den kleiner werdenden Einzeleindruckabstand a zurückgeführt werden. Es kann jedoch eintreten, dass bei weiterer Reduzierung des Parameters a der Rauheitswert wieder umgekehrt und zunimmt. Dieser Effekt wurde unter anderem in [63] festgestellt. Im Gegensatz dazu führt ein größer werdender Eindruckabstand zu der Möglichkeit, eine gezielte Oberflächenstrukturierung vorzunehmen. Das gilt insbesondere bei periodisch arbeitenden Aktorsystemen, wie mit dem E-MHP-System in [5] gezeigt ist. Neben dem Einfluss des Hammerkopfdurchmessers und der Wahl des Bahnabstandes ist in [61] der Einfluss des Kippwinkels β_t auf die erzielbare Oberflächenrauheit untersucht worden. Das Ergebnis der Veröffentlichung für das E-MHP - System ist in Abbildung 18 rechts zu sehen. Im Falle des Grauguss EN-GJL-250 steigt ab einem Kippwinkel von $\beta_t = 30^\circ$ die Rauheit der Oberfläche an, was auf die zunehmende Zerrüttung der Oberfläche und das Lösen des Graphites zurückzuführen ist. Bei dem Stahlwerkstoff X155CrVMo12-1 (1.2379) liegt ein Optimum der Oberflächenrauheit bei einem Kippwinkel von 30° vor (siehe [61]). Darüber hinaus beschreibt der Autor wiederum,

dass bei steigendem Winkel die Umformarbeit zu gering wird, um die Rauheitsspitzen umzuformen. Die zur Oberflächenglättung notwendige Energie beim maschinellen Oberflächenhämmern einer glatten Fläche wurde in der Vergangenheit unter anderem in [2] näher betrachtet. Zudem existieren analytische Berechnungsmethoden wie die statisch-elastischen Modelle von HERTZ (siehe hierzu [64]), die dynamisch-plastische Betrachtung nach JOHNSON [46] oder die statisch-plastische Modellierung der Kontaktbedingung nach TABOR et al. [65], welche den Kontakt zwischen dem Hammerkopf und der Werkstoffoberfläche definieren. Zur Beschreibung des MHP-Bearbeitungsprozesses bedarf es jedoch einer analytischen Betrachtung eines dynamisch-rauen Werkzeug-Werkstückkontaktes. Eine mögliche Modellierung dieser Kontaktbedingung ist Inhalt der Arbeit [66]. Dabei werden für die analytische Berechnung einfach zu eruiierende Eingangsgrößen, wie Materialkennndaten, Oberflächenbeschaffenheit und Geometriedaten des Bearbeitungsprozesses herangezogen, um die zur Umformung benötigte Energie zu bestimmen.

2.5.4 Erzeugung funktionaler Oberflächen durch Mikrostrukturen

Eine gezielte Strukturierung von Oberflächen durch einen Umformprozess bedingt eine plastische Deformation des Werkstoffes im Kontaktbereich zwischen dem Umformwerkzeug und der Werkstückoberfläche. Wie bereits im Kapitel 2.5.3 erwähnt wurde, kann beim MHP-Prozess durch eine gezielte Erhöhung des Eindruckabstandes a ein definiertes Oberflächenmuster erzeugt werden. Dabei ist es bei periodisch arbeitenden Aktoren möglich, über eine gezielte Steuerung der Hämmfrequenz und/oder über die Variation der Vorschubgeschwindigkeit entlang der Bearbeitungsbahn einen definierten Einzeleindruckabstand einzustellen, wie in [28] oder in [57] gezeigt werden konnte. Dieser umgeformte Einzeleindruck kann über seine Eindrucktiefe und seinen Eindruckdurchmesser (in Abhängigkeit von der Werkzeugform) beschrieben werden. Die Eindrucktiefe ist dabei abhängig von der Form und Größe des Hammerkopfdurchmessers, der Kontaktenergie und des zu bearbeitenden Werkstoffes (siehe [17]). Weist dieser einen höheren Widerstand gegen das Eindringen auf, so erfordert es höhere Kontaktkräfte, um diesen Widerstand zu überwinden. Der MHP-Umformprozess selbst führt zu einer Induzierung von Druckeigenspannungen [4] infolge einer Kaltverfestigung (Härtesteigerung) im Wirkbereich (vgl. [6] und [58]). Kommt Anstelle eines sphärischen Hammerkopfes eine formgestaltete Werkzeugspitze zum Einsatz, so können mikroskopische Schmiertaschen auf der Werkstückoberfläche erzeugt werden, wie dies in Abbildung 19 gezeigt ist. In [67] sind diese Vertiefungen für die Funktion als Mikroschmiertaschen auf der Oberfläche des Werkstoffes X153CrMoV12 unter Verwendung des E-MHP Systems umformtechnisch hergestellt worden. Die Intention dahinter ist die tribologischen Reibverhältnisse zu optimieren. Die resultierende Tiefe der Einzeleindrücke (Pyramidenstumpf (a) und Trapezoid (b)) ist in Abbildung 19 links mit einer maximalen Strukturtiefe in der Oberfläche von $t_p = 3,5 \mu\text{m}$ zu erkennen. In [68]

findet ebenfalls das E-MHP-System bei der Erzeugung von Riblet-Strukturen an metallischen Oberflächen Anwendung.

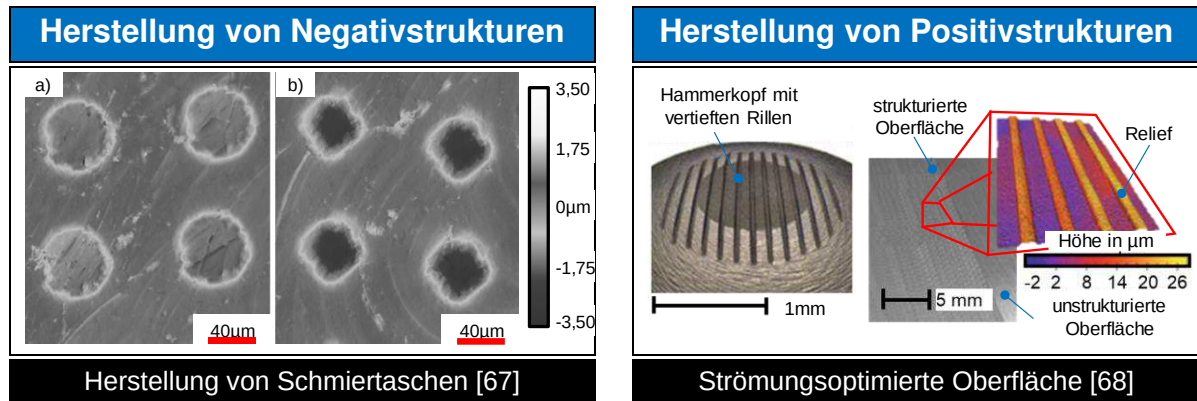


Abbildung 19: Strukturierte Oberflächen unter Anwendung des E-MHP – Verfahren, links erzeugte Schmierstofftaschen mit einer Strukturtiefe von 3,5 µm, rechts: formgestalteter Hammerkopf zur Herstellung von Rillenstrukturen

Durch einen speziell gestalteten Hammerkopf mit eingearbeiteten Rillen werden durch gezieltes Setzen von Einzeleinschlägen erhabene Rillen (Positiv-Struktur) aufgeprägt. Dieser Strukturierungs-Effekt findet in der Strömungstechnik Einsatz, um eine Reduzierung von Reibungsverlusten unter anderem in Flugzeugtriebwerken durch Mikrostrukturierung der Oberfläche zu erreichen. Abbildung 19 rechts zeigt hierzu den formgestalteten Hammerkopf aus HM und die am Werkstoff X3CrNiMo13-4 (1.4313) geprägten Riblet-Strukturen. Wie GÖSSINGER in [69] anhand eines Strömungsversuches zeigen konnte reduziert sich durch eine gezielten Strukturierung der Oberfläche einer Rohrleitung die Rohrreibverluste um 1%. Dies führte letztendlich zu einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades um bis zu 10%. In [60] wird ein weiterer formgestalteter Hammerkopf mit Mikrobohrungen am E-MHP - System eingesetzt, um Mikrospitzen (positive Geometrie) auf der Werkstückoberfläche eines C45E zu erzeugen.

2.5.5 Einfluss der MHP-Bearbeitung auf die Kaltverfestigung

Unter dem Begriff der Härte eines Werkstoffes wird der Widerstand eines Stoffes gegen das Eindringen eines Körpers aus einem härteren Stoff bezeichnet [70]. Um die Oberflächenhärte eines Werkstoffes zu bestimmen, werden entsprechende Prüfverfahren eingesetzt, welche statisch oder dynamisch das Eindringen eines definierten Prüfkörpers in den Werkstoff ermöglichen. Der Effekt der Kaltverfestigung bewirkt eine Festigkeitssteigerung, die somit den Widerstand gegen das Eindringen eines Körpers in eine Oberfläche verstärkt. Bei der Kaltumformung kommt es mit steigendem Verformungsgrad zu einer Steigerung der Versetzungsdichte ρ (Länge der Versetzungslinien/Volumen in m/m^3). Die Notwendige Spannung für eine plastische Deformation steigt an. Diese ist in etwa proportional der Quadratwurzel der Versetzungsdichte, welche durch die Umformung hervorgerufen wird [71],

(Taylor-Beziehung). Die durch die MHP-Bearbeitung hervorgerufene plastische Umformung führt zu einer Kaltverfestigung im Bereich der Umformung und nimmt zudem Einfluss auf die Korngröße (vgl. [72]). Aufgrund der gebildeten Gitterversetzungen kommt es zu einer Steigerung der Streckgrenze im Werkstoff (Festigkeitssteigerung). Neben diesen Eigenschaften stellt sich zudem auch eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen abrasiven als auch adhäsiven Verschleiß ein [73]. Eine Zunahme der Festigkeit kann auf die steigende Versetzungsdichte in der Gitterstruktur sowie auf eine Feinkornverfestigung zurückgeführt werden. Aufgrund der vermehrten Korngrenzflächen bei einem feinkörnigeren Gefüge kommt es zu einer Behinderung der Versetzungsbewegung. Unter Anwendung der Hall-Petch-Formulierung kann der Einfluss der Korngröße – für Korngrößen zwischen 100 µm und 1 µm – auf die Zunahme der Festigkeit abgeschätzt werden (siehe [74]).

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_{HP} D_K^{-1/2} \quad (10)$$

Mit: σ_y ... Streckgrenze σ_0 ... Startspannung der Versetzungsbewegung ; D_K ... mittlerer Korndurchmesser; k_{HP} ... Hall-Petch-Konstante

σ_0 beschreibt die Fließspannung eines unverformten Einkristalls und ist werkstoffabhängig. Die Konstante k_{HP} definiert die Hall-Petch-Konstante und beschreibt damit die Steigung einer Geraden zwischen der Fließspannung und der Korngröße. Typische Werte für Werkstoffe sind der Literatur zu entnehmen. ($k_{HP} = 2 \text{ N/mm}^{3/2}$ für Al, $5 \text{ N/mm}^{3/2}$ für Cu, $10 \text{ N/mm}^{3/2}$ für α -Messing (30%Zn) [74, S. 150], $12,6 \text{ N/mm}^{3/2}$ für Ti [76, S. 220]). In [73] die Auswirkung eines UIP-Verfahrens auf die Martensittransformation eines AISI 321 mit der damit verbundenen Härtesteigerung beschrieben. Mit Hinblick auf die MHP-Bearbeitung kann festgehalten werden, dass mit einer Steigerung der Bearbeitungsparameter wie der Amplitude h , der Frequenz f , der Kontaktenergie E_c sowie einer Erhöhung der Überdeckung o_i die Kaltverfestigungsmechanismen zunehmen. Dieser Effekt kann zudem durch eine Verringerung des Hammerkopfdurchmessers d , mit sinkender Vorschubgeschwindigkeit v und kleiner werdendem Bahnabstand s verstärkt werden, wie dies in [17] gezeigt werden konnte. Der Einfluss der zuvor genannten Parameter auf die Kaltverfestigungsmechanismen ist Inhalt der Untersuchung in [80]. Darin wird neben dem Einfluss der Parametervariation des E-MHP - Systems auch die Auswirkung einer Mehrfachbearbeitung auf den Härtezustand des Werkstoffes X5CrNi18-10 (1.4301) in den oberflächennahen Randzonen betrachtet. Der Einfluss des MHP-Prozesses auf die Kaltverfestigung unterschiedlicher Werkstoffe ist Bestandteil der Arbeit [3]. Hierbei wird die maximal erzielbare Härtesteigerung an der Oberfläche in Prozent bezogen auf die Ausgangshärte des Werkstoffes, welche durch das E-MHP - System erzielt werden kann, beschrieben. Die Ergebnisse der Messungen (Abbildung 20 links) der Härtesteigerung ist in einem Balkendiagramm dargestellt.

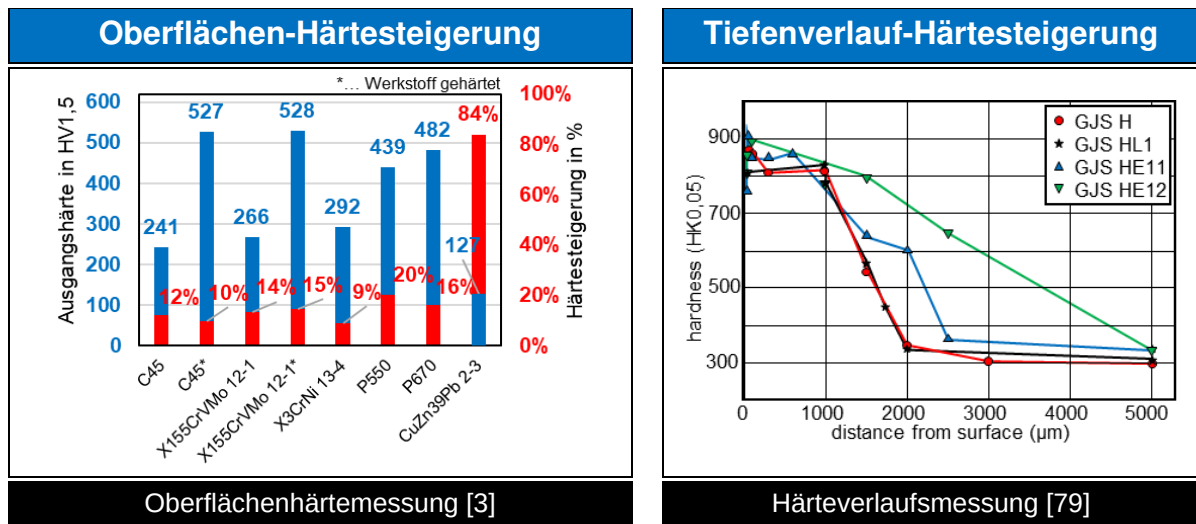


Abbildung 20: Einfluss der MHP-Bearbeitung auf die Kaltverfestigung, links Ergebnisse von Oberflächenhärtemessungen im Vergleich zur Ausgangshärte, rechts: Ergebnis einer Tiefenverlaufsmessung zur Bestimmung der Härte in der Randschicht

Darin ist ersichtlich, dass eine Härtesteigerung bei den Stahlwerkstoffen von 9 - 20% erreicht werden kann. Hervorzuheben ist bei dieser Auflistung der Härtesteigerungen, dass die CuZn-Legierung eine hohe Neigung zur Kaltverfestigung zeigt. Neben einer Steigerung der Oberflächenhärte ist in [79] der Einfluss einer lokalen Druckumformung auf die Kaltverfestigung in den oberflächennahen Randzonen für den Werkstoff EN-GJS-HB265 untersucht. Hierzu ist in Abbildung 20 rechts das Resultat für eine induktionsgehärtete Probe (HL1), einer gehärteten und E-MHP-bearbeiteten Probe ($f = 150$ Hz) sowie zwei festgewalzten Proben (HE11 mit $p = 300$ bar; HE12 mit $p = 400$ bar) abgebildet. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass eine Steigerung der Härte bis zu einer Tiefe von etwa 2 mm nachweisbar ist.

2.5.6 Beeinflussung des Spannungszustandes

Eine plastische Umformung an der Werkstückoberfläche wird durch normal und parallel zur Werkstückoberfläche wirkende Kräfte hervorgerufen. Diese führen zu Dehnungen bei zugleich maximalen auftretenden Spannungen an der Wirkstelle der Oberfläche (siehe [17]). Im Falle des maschinellen Oberflächenhämmerns mit einer normal zur Werkstückoberfläche wirkenden Kraft findet eine axial symmetrische Verteilung der Scher- und der Normalspannungen in der Oberflächenrandzone statt. Das Ergebnis der Analyse zur Spannungsverteilung unter Anwendung geeigneter Software ist beispielsweise Inhalt der Arbeit [79]. Das Simulationsergebnis eines Hämmerprozesses mit der Auswertung der Normal- und Scherspannungen ist in Abbildung 21 dargestellt. Findet eine Aneinanderreihung einzelner Einschläge in Bearbeitungsrichtung statt, so stellt sich eine anisotrope Druckeigenspannungsverteilung ein. Entlang der Bearbeitungsrichtung (entspricht der Richtung der Vorschubbewegung) findet eine geringere Ausprägung als quer dazu statt. Entsprechende experimentelle Untersuchungsergebnisse hierzu finden sich in

[3] und [81]. Diese Ausprägung der Eigenspannungen ist in Abbildung 21 bei der UNSM-Bearbeitung IN718 dargestellt. Die Induzierung von Druckeigenspannungen des E-MHP - Systems hängt unabhängig vom Bahnorientierungswinkel α von der Werkstückoberfläche ab [5]. Gleich den Ergebnissen aus [82] konnte auch in [5] nachgewiesen werden, dass eine Mehrfachbearbeitung einer Oberfläche zu keinem proportionalen Anstieg der Druckeigenspannungen führt. Dies konnte auch in [57] bei der Bearbeitung von Ti-Al-N-beschichteten Hartmetallschneidwerkstoffen beobachtet werden.

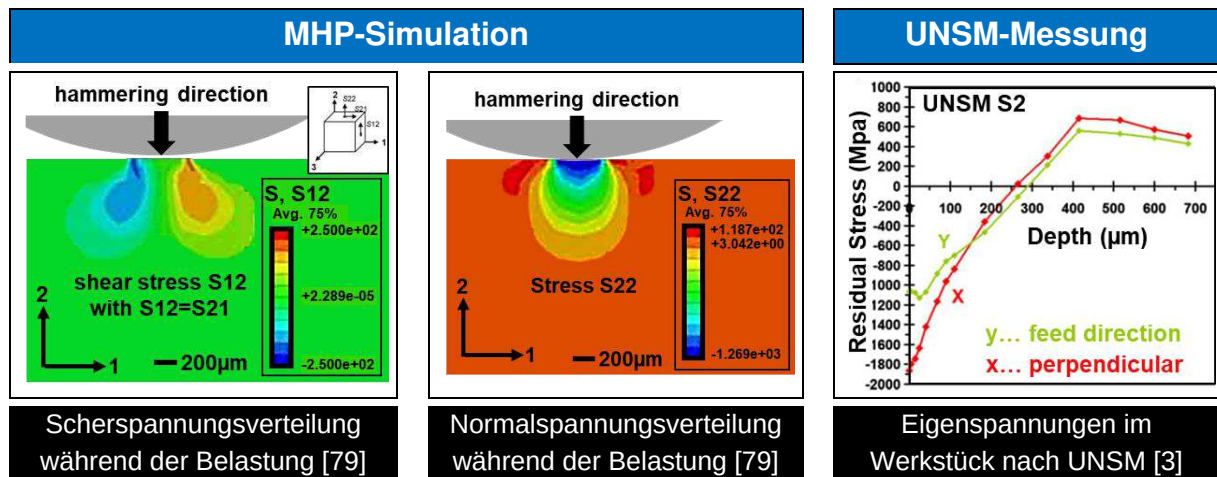


Abbildung 21: links: Ergebnisse einer Simulation des MHP-Prozesses zur Ermittlung der Scher- und Normalspannungsverteilung in der Kontaktzone, rechts: Messergebnisse von Druckeigenspannungen im Werkstück nach der UNSM-Bearbeitung

Unter Anwendung des E-MHP Systems konnte an den bearbeiteten Wendeschneidplatten in [57] Druckeigenspannungen in Querrichtung zur MHP-Bearbeitung von -1598 ± 80 MPa bei einer Einfachbearbeitung sowie -1984 ± 143 MPa bei Mehrfachbearbeitung unter Anwendung der Röntgendiffraktometrie ermittelt werden. Der verbesserte Schicht-Substratverbund mindert den Verschleiß an der Werkzeugschneide und erhöht somit dessen Einsatzfähigkeit. In [83] konnte gezeigt werden, dass der Betrag der Druckeigenspannung mit sinkender Vorschubgeschwindigkeit zunimmt, was bei gleichbleibender Frequenz zu einer Minimierung der Abstände der Einzeleindrücke a für das E-MHP System und dem Piezopeening führt [38]. Zudem stellten beide Arbeiten fest, dass auch im selben Zuge die Eindringtiefe der Druckeigenspannungen zunimmt.

2.5.7 Änderung des Werkstoffgefüges

Maschinelle Oberflächenbearbeitungsverfahren, wie etwa das UNSM-Verfahren, bewirken durch die plastische Deformation eine Verformung der Kornstruktur, wie Untersuchungen in [84] gezeigt haben. Hierzu ist in Abbildung 22 links ein Schlibbild einer UNSM-bearbeiteten Kupferlegierung vor und nach dem Bearbeitungsprozess

dargestellt. Im Bereich der bearbeiteten Randzone oben lässt sich gut die plastische Deformation und die Wirtiefe der Umformung der einzelnen Körner im Gefügeschliff erkennen. In [85] konnte für additiv gefertigte Strukturen aus den Aluminiumlegierungen vom Typ 4034 und AA 3219 unter Verwendung des P-MHP - Systems eine Minimierung der Porosität an der Oberfläche bis über 1 mm festgestellt werden (Abbildung 22 rechts).

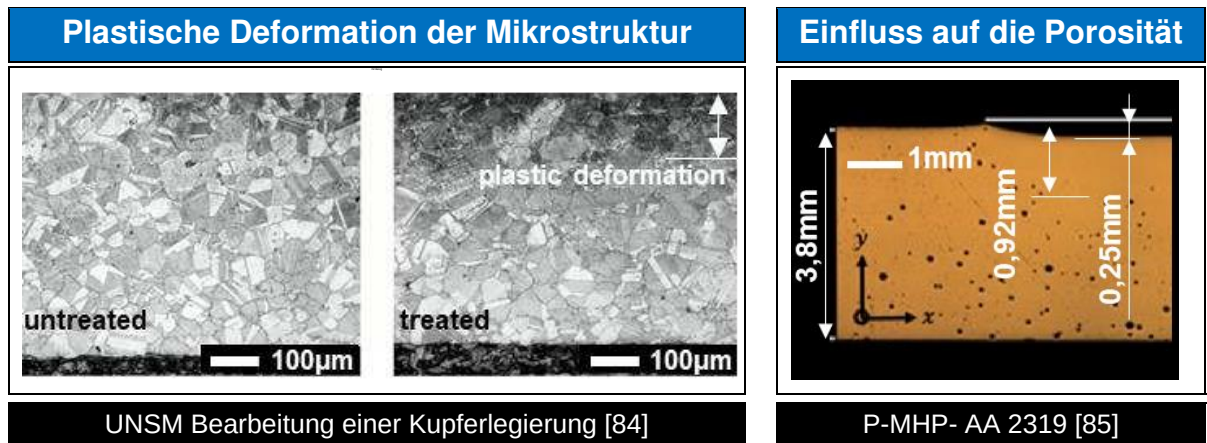


Abbildung 22: Beeinflussung des Werkstoffgefüges durch MHP, links: Gegenüberstellung eines unbearbeiteten zu einem bearbeiteten Gefüge einer Kupferlegierung, rechts: Einfluss der MHP-Bearbeitung auf die Porosität einer Aluminiumlegierung

Neben dieser lokalen plastischen Umformung können, in Abhängigkeit von der Werkstoffzusammensetzung und der vorhandenen Werkstoffphase auch Phasentransformationen stattfinden. Eine durch den MHP-Prozess mögliche Erscheinung ist die spannungsinduzierte Martensitbildung (siehe [77]). Der Effekt der verformungsinduzierten Umwandlung des Werkstoffgefüges hin zu einem Martensit ist im Bereich der Blechumformung durch Kaltverfestigung bei austenitischen Stählen bemerkbar, wie dies in [86] formuliert ist. Diese Form der Gefügeumwandlung tritt im Besonderen in der Blechverarbeitung bei Kaltverformungen von metastabilen Austeniten und vor allem beim Tiefziehen und Walzen in Erscheinung [87] und kann unter der Bezeichnung TRIP-Effekt geführt werden (Transformation Induced Plasticity). Der Effekt der Martensitumwandlung kann mittels einem nachgelagerten mechanischen oder thermischen Bearbeitungsprozess reversibel gemacht werden [88]. Eine Beeinflussung der Werkstoffphase eines metastabilen austenitischen Werkstoffes durch Umformung wurde unter anderem in [87] und [89] untersucht. Die Umwandlung eines austenitisch-ferritischen Gusseisens hin zu einem verformungsinduzierten martensitischen Gefüge unter Anwendung der MHP-Bearbeitung konnte zudem in [90] nachgewiesen werden. In [80] wurde dieser Umwandlungsmechanismus an einem metastabilen austenitischen Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) untersucht.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Zielsetzung

Das maschinelle Oberflächenhämmern als mechanisches Oberflächenbearbeitungsverfahren erlangte im Bereich der Forschung und der industriellen Anwendung über den Zeitraum der letzten sieben bis zehn Jahre vermehrt Aufmerksamkeit. Spätestens seit der Veröffentlichung der VDI Richtlinie 3416 [1] im Jahr 2018 kann dieses Verfahren als Stand der Technik angesehen werden. So ist mit der Veröffentlichung eines CIRP Keynote-Papers unter dem Titel „Surface Modification by Machine Hammer Peening and Burnishing“ (siehe [17]) ein Werk verfügbar, welches aktuelle Forschungsthemen sowie Anwendungsgebiete aufgreift. Aus den Ergebnissen aktueller Studien kann die Eignung der Technologie des maschinellen Oberflächenhämmerns in Bezug auf die gezielte Beeinflussung der Oberflächen- und der Randschichteigenschaften abgeschätzt werden. So liegen auch Informationen über die verwendeten MHP Aktorsysteme und deren Einsatzfähigkeit vor. Wenngleich die Aktorik einen wesentlichen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis nimmt, so ist es doch vielmehr die Kombination aus Aktorik, Maschinensystem und Werkstoff, welche zum gewünschten Resultat führt und welcher Beachtung geschenkt werden muss.

Ziel dieser Arbeit ist es, die verschiedenen Einflüsse des MHP Prozesses zu untersuchen. Hierfür werden zunächst jene von Maschinen- und Aktorsystemen auf das Bearbeitungsergebnis an anwendungsrelevanten Werkstoffen betrachtet, um auf Basis dieser Informationen eine Erweiterung des Prozessverständnisses für den Anwender dieser Technologie zu schaffen. Obgleich die in Kapitel 2.5 genannten Einsatzgebiete der MHP Bearbeitung bereits ein breites Feld der Anwendung aufspannen, steht dies nicht zwingend für die Auslotung der Prozessgrenzen des Verfahrens. Besonders im Bereich der Oberflächenstrukturierung soll das Potential zur Herstellung von Mikrostrukturen mit einem Aspektverhältnis von annähernd 1 gezeigt werden, da dies zum aktuellen Stand mit aktuellen Hämmerverfahren und Aktoriken nicht umgesetzt werden konnte. Neben dieser Erweiterung der Prozessgrenze im Bereich der Oberflächenbeschaffenheit gilt es im weiteren neue Anwendungsfelder als auch Anwendungsmöglichkeiten der Technologie zu schaffen. Dies soll einerseits durch die detaillierte Betrachtung der erzeugten Oberflächenstrukturierung von Formeinlegern für Spritzgusswerkzeuge eines Warmarbeitsstahles X38CrMoV5-1 unter der Anwendung neuer Aktoriken erfolgen, um darauf aufbauend die hergestellten Strukturen auf der Oberfläche von Kunststoffbauteilen abzuformen. Neben den, an der Oberfläche beeinflussten Strukturen, gilt es auch die Auswirkung des Bearbeitungsprozesses auf eine Beeinflussung des Werkstoffgefüges zu untersuchen. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf einem metastabilen austenitischen CrNi Werkstoff X5CrNi18-10, um den Effekt der verformungsinduzierten Martensittransformation unter Anwendung der MHP Bearbeitung zu untersuchen und neue Anwendungsmöglichkeiten daraus abzuleiten.

Vorgehensweise

Um die formulierte Zielsetzung zu erreichen, ist es zunächst notwendig, den Prozess der MHP-Bearbeitung und deren Auswirkung auf das Bearbeitungsergebnis zu beschreiben. Zunächst behandelt Kapitel 4 die Untersuchung der Einflüsse des Maschinensystems als Werkzeugträger, der Aktorik selbst –welche den mechanischen Umformprozess gestaltet– als auch die Einflüsse der zu bearbeitenden Werkstoffe und wie diese auf die MHP-Bearbeitung hinsichtlich Kaltverfestigung, Strukturierung und Glättung der Oberfläche reagieren. Im Hauptfokus steht zunächst die Untersuchung eines Knickarmroboters mit geringer Traglast (KUKA KR 30-3) als Trägersystem der MHP-Aktorik. Anhand dieses Systems werden die Anforderungen an die MHP-Aktorik als auch an das Maschinensystem aufgezeigt, um bestmöglich eine gleichmäßige Oberflächenbearbeitung (Struktur und Formgebung) umformtechnisch herzustellen und einen gleichmäßigen Energieeintrag in den Werkstoff durch die Aktorik zu gewährleisten. Um in weiterer Folge neben dem Maschinensystem auch den Einfluss der MHP-Aktorik zu beschreiben, wird eine simulationsbasierte Energiebetrachtung des elastisch-plastischen Umformprozesses erstellt. Die Betrachtung der Umformung findet unter Anwendung der FEM-Software ANSYS WB statt und setzt sich das Ziel den Einfluss des mechanischen Aufbaus eines Hammersystems zu untersuchen. Neben den zuvor betrachteten Themen wird der Fokus letztlich auf den zu bearbeitenden Werkstoff gerichtet. Auf Basis einer definierten Bearbeitung von unterschiedlichen Werkstoffen und unter Anwendung von zwei industrieerprobten MHP-Aktorsystemen mit unterschiedlicher Wirkungsweise wird der Einfluss dieser Systeme auf die Kaltverfestigung sowie auf die Oberflächenglättung untersucht. Auf Basis statistischer Methoden erfolgt die Auswertung der Daten und anschließend die Anfertigung einer Bearbeitungsrichtlinie für die untersuchten Werkstoffe.

Als zentraler Punkt neben der Betrachtung des Einflusses des Maschinensystems, der Aktorik und des Werkstoffes wird in Kapitel 5 unter Anwendung eines piezoelektrischen MHP-Aktors mit einem Fünf-Achs-Bearbeitungszentrum die Herstellung von Mikrostrukturen auf der Oberfläche eines Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-1 untersucht. Im Vergleich zu den Strukturierungsversuchen aus Kapitel 4.2 welche mit einem Hammerkopfdurchmesser von 1 mm erfolgen, finden hier kleinste HM-Werkzeuge Einsatz dessen Spitzen zu wenigen μm als Werkzeugspitzenradius geschliffen sind.

Das Kapitel 6 behandelt abschließend die Beeinflussung der Mikrostruktur des Gefüges eines metastabilen austenitischen CrNi-Werkstoffes. Im Detail wird hier der Nachweis und die Eigenschaften einer verformungsinduzierten Martensitbildung durch die gezielte MHP-Bearbeitung untersucht und nach einer Möglichkeit gesucht örtlich gesteuert eine definierte Phasenumwandlung vorzunehmen um Werkstoffe zu codieren. Auf Basis von Messungen erfolgt zudem eine analytische Beschreibung der in den Werkstoff eingebrachten Energie.

4 Prozess des maschinellen Oberflächenhämmerns

Der Prozess des maschinellen Oberflächenhämmerns kann, wie in Abbildung 2 dargestellt ist, in Eingangs- und Ausgangsgrößen eingeteilt werden. So ist es die Aufgabe des Maschinensystems die Bahnführung zu übernehmen und die resultierenden Kräfte über die Struktur aufzunehmen. Die MHP-Aktorik übernimmt die zentrale Aufgabe der Oberflächenbearbeitung. Diese stellt die geforderte Umformenergie bereit und bringt diese über eine gezielte Bewegung des Hammerkopfes in die Wirkstelle. Genau diese Wirkstelle wird über die Kontaktbedingung zwischen Hammerkopf und Werkstückoberfläche definiert. Zuletzt liegt es an den Eigenschaften des bearbeiteten Werkstoffes, welcher gemeinsam mit den genannten Stellgrößen das Ergebnis der Bearbeitung definiert. Eine Übersicht zu den Systemgrößen des MHP-Prozesses ist in Abbildung 23 dargestellt.

Das Maschinensystem als Technologieträger muss in der Lage sein, eine genaue Bahnführung vorzunehmen und letztlich die Reaktionskräfte bei der Bearbeitung bestmöglich aufzunehmen. Im Gegenzug dazu ist es die Aufgabe der MHP-Aktorik, eine gezielte Bewegung des Hammerkopfes sicherzustellen und die kinetische Energie der bewegten Schlageinheit möglichst verlustfrei in eine elastisch-plastische Formänderungsarbeit auf der Werkstückoberfläche umzusetzen. Durch eine entsprechende Wahl der geometrischen Form und Werkstoff des Hammerkopfes ist es möglich, kleinste Oberflächenstrukturen bis hin zu einer großflächigen Oberflächenglättung zu realisieren. Der Werkstoff selbst muss hingegen in der Lage sein, die bereitgestellte Energie durch die Aktorik aufnehmen sowie entsprechend seines Werkstoffverhaltens in eine geforderte Wirkgröße umwandeln zu können. Welche Einflüsse diese Systemgrößen des MHP-Bearbeitungsprozesses auf das Bearbeitungsergebn nehmen, wird in diesem Kapitel näher betrachtet.

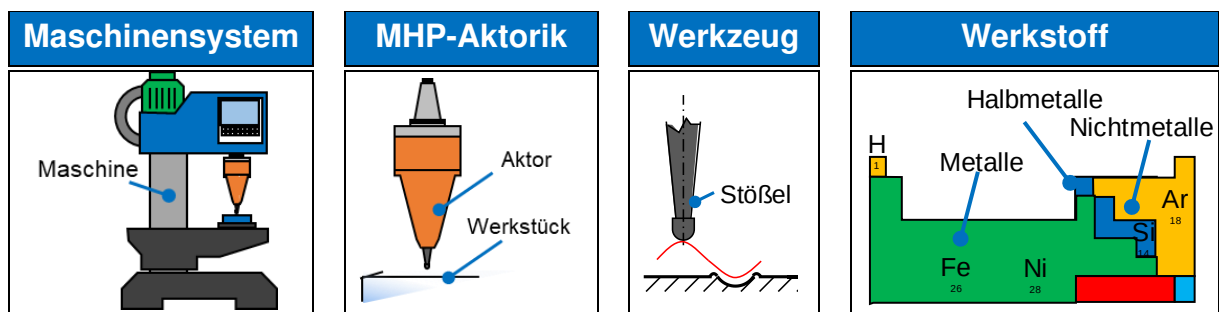


Abbildung 23: Systemgrößen bei der MHP-Bearbeitung mit der Aufteilung in Maschinensystem, Aktorik, Werkzeug und Werkstoff

4.1 Maschinensystem als Werkzeugträgersystem

Der Einfluss eines Maschinensystems auf das Bearbeitungsergebnis an der Werkstoffoberfläche wird in diesem Kapitel näher beschrieben. Es erfolgt zunächst eine Gegenüberstellung zweier Maschinenkonzepte mit unterschiedlichen kinematischen Ketten in Form als Werkzeugmaschine und Industrieroboter. In einem weiteren Schritt wird eine Betrachtung des statischen und des dynamischen Verhaltens sowie deren Auswirkungen auf das Ergebnis bei der MHP-Bearbeitung durchgeführt. Bei den unterschiedlichen Maschinenkonzepten handelt es sich um ein Drei-Achs-Bearbeitungszentrum (BAZ) Haas VF3, ein Fünf-Achs-BAZ Hermle C20U sowie um einen Sechs-Achs-Knickarmroboter mit geringer Traglast der Firma Kuka vom Typ KR30-3. Der Hauptfokus der Maschinenuntersuchung liegt jedoch auf dem seriell-kinematischen-Robotersystem. Aus diesem Grunde zeigt Abbildung 24 den Arbeitsraum des Roboters mit dem E-MHP-Aktor Typ 1600 von accurapuls, welcher als MHP-System für die folgenden Untersuchung herangezogen wurde.

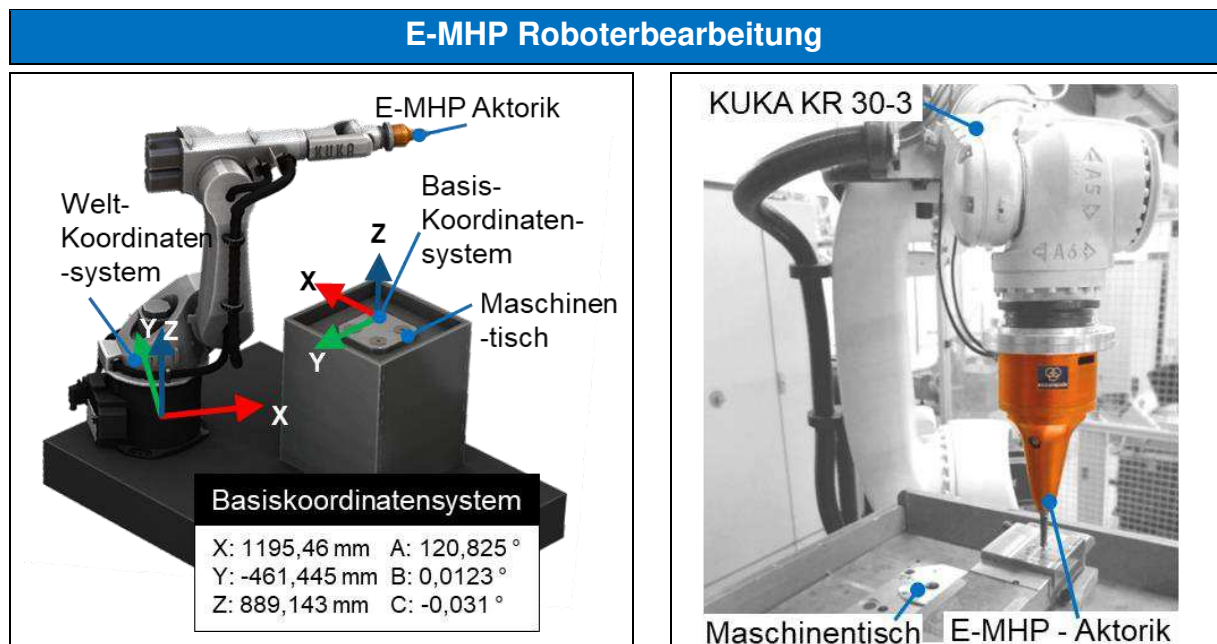


Abbildung 24: Sechs-Achs-Roboter KUKA KR30-3 mit E-MHP-Aktor (Typ 1600), links: schematische Darstellung des Arbeitsraumes, rechts: MHP-Roboterbearbeitung

Der Arbeitsraum für die Bearbeitung ist mit dem Maschinentisch abgegrenzt und ist mit einem Nullpunkt-Spannsystem zur Werkstückmontage ausgestattet (Abbildung 24 links). Das Rastermaß der vier Spannbolzen liegt bei 200 mm. Zur Bestimmung des statischen und des dynamischen Maschinenverhaltens finden im weiteren Verlauf der Arbeit Sensoren, Messverstärker und Auswertesoftware entsprechend der angeführten Tabelle 9 Anwendung. Das dynamische Verhalten eines Maschinensystems hängt maßgeblich von dessen mechanischem als auch kinematischem Aufbau ab. So basieren in der Regel klassische Werkzeugmaschinen auf seriell-kinematischen Strukturen. Ein Knickarmroboter besteht wie der hier

eingesetzte KUKA KR30-3 aus sechs seriell geschalteten Rotationsachsen, welche mittels einzelner Gelenke verbunden sind.

Bezeichnung	Typ	Messgröße	Anwendung
Induktiver Messtaster	Tesa GT22	Weg	statische Messgrößen
Wirbelstromsensor	NCDT 3300 μ Epsilon	Weg	dynamische Messgrößen
Laserinterferometer	Renishaw ML10	Geschwindigkeit	dynamische Messgrößen
DMS-Kraftmesszelle	HBM U2B	Kraft	statisch\dynamische Messgrößen
Messverstärker	HBM Quantum X	Spannung	-
Datenverarbeitung	LabView 2010	-	-

Tabelle 9: Messkette zur Bestimmung der statischen Eigenschaften

Aufgrund des unterschiedlichen kinematischen Aufbaus der Systeme ist auch deren dynamisches Verhalten zu unterscheiden. Auftretende Beschleunigungskräfte, welche während des Auftreffens des Hammerkopfes auf der Oberfläche entstehen beeinflussen die Prozessfähigkeit und spiegeln sich in Maschinenverformungen sowie Schwingungsformen der Maschine wider. Aus diesem Grund ist es für die MHP-Bearbeitung notwendig, einen über den Bearbeitungsverlauf konstanten Energieeintrag zu erreichen. Im Falle des E-MHP-Aktors kann dies unter anderem über den Parameter Hub h beeinflusst werden. Eine Variation dessen führt zwangsläufig zu einer Veränderung der Hammerkopfgeschwindigkeit und damit zu einer Variation der eingebrachten Energie in das Werkstück. Eine solche Prozessänderung kann gegebenenfalls zu instabilen Prozessbedingungen führen. Um diese Eigenschaften darzustellen, erfolgt zunächst eine Betrachtung des Schwingungsverhaltens des Maschinensystems während der MHP-Bearbeitung normal zur Werkstückoberfläche. Die Untersuchung erfolgt an beiden Maschinenkonzepten (Werkzeugmaschine und Roboter) unter Anwendung des E-MHP-Aktors. Die bei der MHP-Bearbeitung geforderte konstante Distanz zwischen der Werkstückoberfläche und des Aktorsystems wird unter Verwendung eines Wirbelstromsensors gemessen und daraus die Auswirkungen auf das Bearbeitungsergebnis näher betrachtet. Abbildung 25 zeigt den Messaufbau am Roboter KUKA KR 30-3, welcher auch analog an der Werkzeugmaschine (Haas VF3) ausgeführt wurde. Der Sensor zur Wegmessung sitzt nahe der Hammerkopfspitze und misst die Distanz zur Oberfläche während der Bearbeitung. Somit ist es möglich das Schwingungsverhalten des Maschinensystems zu bestimmen. Das Ergebnis der Messung für beide Maschinensysteme mit den Parametern aus Abbildung 25 sind in der Abbildung 26 dargestellt. In dieser ist – neben der Darstellung der kinematischen Bewegung des Aktors auf einer vorgegebenen Bearbeitungsbahn – auch das Schwingungsverhalten der beiden Maschinensysteme im Zeit- als auch im Frequenzbereich abgebildet. Dabei zeigt sich, dass beim Auftreffen der Hammerkopfspitze auf die Werkstückoberfläche Reaktionskräfte in die Roboter- als auch in die Werkzeugmaschinenstruktur eingeleitet werden und diese eine Schwingung des Maschinensystems und somit auch eine Schwingung des

Werkzeuges selbst (MHP-Aktor) verursachen. So ist in Abbildung 26 links der Start des MHP-Prozesses in drei Teilschritte unterteilt.

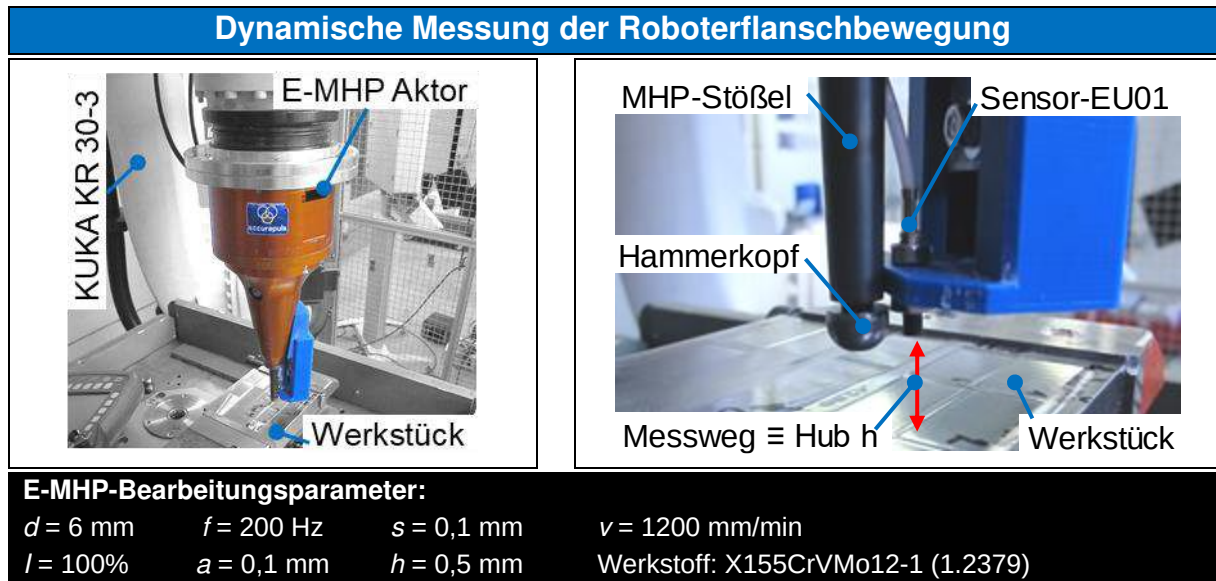


Abbildung 25: Messung der Position des Roboterflansches bei der MHP-Bearbeitung unter Verwendung eines Wirbelstromsensors

Schritt Nr.1 beschreibt das vertikale Anfahren der E-MHP-Aktorik über die Maschinenachse hin zur Werkstoffoberfläche. Bedingt durch das Wirkprinzip des E-MHP-Systems ist es erforderlich, den Hammer-Prozess zu starten, indem die Werkzeugspitze etwa 0,1 - 0,3 mm über die Werkstückoberfläche positioniert wird. Dies wird umgangssprachlich als ein „Zünden“ des Prozesses bezeichnet. In Schritt Nr.2 wird, wiederum über die Maschinenachse, die Position der Hammerkopfspitze auf die eigentliche Bearbeitungshöhe ($\equiv$ Hub h) gebracht. Bis zum nächsten Schritt Nr.3, der horizontalen Bewegung des Aktors über die Werkstückoberfläche, kommt es zwischen den Schritten Nr.1 und Nr.2 zu mehreren Einschlägen an der Startposition entsprechend der verstrichenen Zeit der Vertikalbewegung zur Bearbeitungshöhe. Dieser Umstand verursacht lokal einen erhöhten Energieeintrag und führt somit zu einer stärkeren plastischen Umformung. Betrachtet man nun das Verhalten des Robotersystems (Abbildung 26 rechts), so zeigt sich ein deutlicher Unterschied zur Werkzeugmaschine. Nach dem ersten Auftreffen des Hammerkopfes auf der Werkstückoberfläche (Zünden des Prozesses, Prozessschritt 1) verharrt dieser im Vergleich zur Werkzeugmaschinelänger in dieser untersten Position. In dieser Zeitdauer von etwa 0,075 s werden finden rund 15 Einschläge an der gleichen Position durch den Hammerkopf statt. Damit wird deutlich, dass durch diese Eigenschaft es zu einer erhöhten plastischen Umformung an dieser Stelle kommt. Wird letztendlich der für den Prozess festgelegte Hub von 0,5 mm angefahren, so variiert dieser anfänglich durch die instabile kinematische Kette des Roboterarms um etwa 0,2 mm (Spitze-Spitze). Das dynamische Verhalten des Robotersystems ist durch die rote Kurve in Abbildung 26 abgebildet.

Werkzeugbewegung und Schwingungsverhalten bei der MHP-Bearbeitung

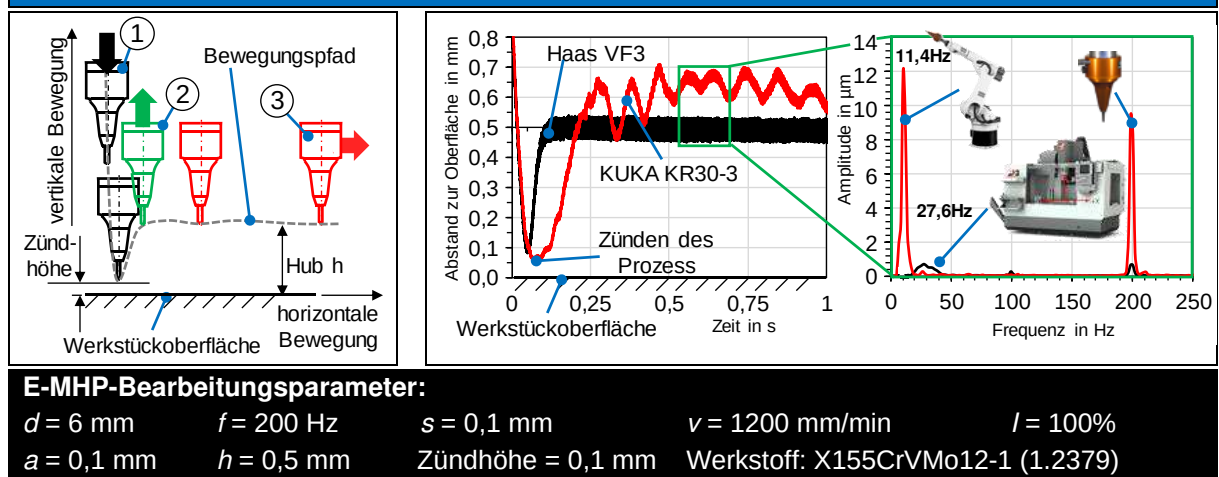


Abbildung 26: Vergleich des dynamischen Verhaltens von Maschinensystemen, links: Bahnbewegung der Maschinenachse mit der E-MHP Aktorik zur Prozessstart, rechts: Verlagerung des Maschinenflanschs bezogen zur Werkstoffoberfläche

Führt man in weiterer Folge einen definierten Abschnitt des Zeitsignals der beiden Signale unter Anwendung der Fourier-Transformation in den Frequenzbereich über, so kann das dynamische Verhalten der Maschine weiter beschrieben werden. Im Frequenzbereich kann neben der Anregung von $f = 200 \text{ Hz}$ durch das E-MHP-System (Parameter in Abbildung 26) auch eine deutliche Amplitudenüberhöhung im unteren Frequenzbereich bei etwa $11,4 \text{ Hz}$ des Roboters sichtbar gemacht werden. Wie aus dieser Gegenüberstellung zur Werkzeugmaschine ersichtlich (schwarze Kurve in Abbildung 26), treten am Roboter deutlich höhere Schwingungsamplituden auf, welche neben der Anregungsfrequenz auch das Trägersystem selbst beeinflussen. Um die Eignung des Sechs-Achs-Roboters sowie dessen Auswirkungen auf das Bearbeitungsergebnis zu bewerten, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Roboter KUKA KR30-3 näher betrachtet.

4.1.1 Einfluss des dynamischen Maschinenverhaltens

Die Fähigkeit, das deterministische Verhalten des Aktorsystems und der Hammerkopfbewegung auf die Werkstückoberfläche zu übertragen, wird – neben der sicheren Ausführung der programmierten Bearbeitungsbahn – auch durch eine konstante Bahngeschwindigkeit beeinflusst. Liegt bei einer konstanten Hämmerfrequenz eine gleichbleibende Bahngeschwindigkeit vor, so sind Einzeleinschläge mit konstantem Eindrucksabstand auf der Werkstückoberfläche realisierbar. Hingegen variieren die Abstände der Einzeleindrücke bei einer Änderung der Bahngeschwindigkeiten. Um die Fähigkeit einer konstanten Bahngeschwindigkeit des Roboters beurteilen zu können, wurde eine lineare Bahnbewegung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten mittels eines Laserinterferometers vom Typ Renishaw ML10 gemessen.

$v = \text{mm/min}$	1200	2400	3600	4800
Abweichung in mm/min	372	428	387	407
Abweichung in %	31	18	11	8

Tabelle 10: Abweichung der Bahngeschwindigkeit zum Vorgabewert

Eine Auswertung dieser Daten des Robotersystems über die Länge einer Bearbeitungsbahn von rund 500 mm ist in Tabelle 10 zusammengefasst. Die Geschwindigkeitsabweichung des Robotersystems liegen bei etwa 10 - 30% des programmierten Vorgabewertes. Es ist erkennbar, dass diese Abweichung mit steigender Bahngeschwindigkeit abnimmt. Findet eine MHP-Bearbeitung mit konstanter Hämmerfrequenz statt, so resultiert eine Abweichung der Bearbeitungsgeschwindigkeit in unregelmäßigen Eindrucksabständen. Es ergibt sich somit – bei einer Hämmerfrequenz von $f = 200 \text{ Hz}$ und einer Abweichung von 372 mm/min im Geschwindigkeitsprofil ($v = 1200 \text{ mm/min}$) – eine Abweichung im Eindruckabstand von $31 \mu\text{m}$ bei einem festgelegten Wert von $a = 100 \mu\text{m}$. Eine Abweichung von etwa $31 \mu\text{m}$ ist für den Effekt einer Oberflächenglättung noch tolerierbar, hingegen kann diese Abweichung für eine gezielte Herstellung von Mikrostrukturen (siehe Kapitel 6) bereits eine Überschreitung eines Toleranzbandes des Eindruckabstandes bedeuten. Neben der Charakterisierung der Bahngeschwindigkeit erfolgt eine detailliertere Betrachtung des eingangs beschriebenen Schwingungsverhaltens des Roboters. Um die Auswirkungen eines Richtungswechsels bei einer Bahnumkehr abbilden zu können und um daraus auf die dynamischen Eingeschalten des Roboters Rückschlüsse zu ziehen, wurde eine konstante Bahngeschwindigkeit am TCP von $v = 1200 \text{ mm/min}$ eingestellt und nach kurzer Fahrt abrupt gestoppt. Als Ergebnis ist in Abbildung 27 links der Ausschnitt der des das Ausschwingungsverhalten in Fahrtrichtung des Endeffektors im Zeitbereich dargestellt. Nach einer Verarbeitung der Messdaten mit LabVIEW wurde unter Anwendung einer exponentiellen Kurvenanpassung die Abklingkurve ermittelt. Aus dieser angepassten Funktion konnte eine Abklingkonstante von $\delta = 3,8 \text{ }^1/\text{s}$ bestimmt werden. Zur Annäherung kann die Abklingkonstante auch Dekrement über eine Schwingungsperiode bestimmt werden.

$$\delta = \frac{\Lambda}{T} \quad (11)$$

T entspricht dabei der Periode der Schwingung und Λ kann durch die Bildung des natürlichen Logarithmus aus dem Verhältnis zwischen zwei Amplitudenwerten (x_1, x_2) bestimmt werden.

$$\Lambda = \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (12)$$

Wird dieses Zeitsignal unter Anwendung der Fourier-Transformation in den Frequenzbereich übergeführt, so zeigt sich deutlich eine Amplitudenüberhöhung bei

11,4 Hz (Abbildung 27 rechts). Diese Frequenz bildet die Hauptschwingung des Roboterflansches in der aufgezeichneten Bewegungsrichtung ab.

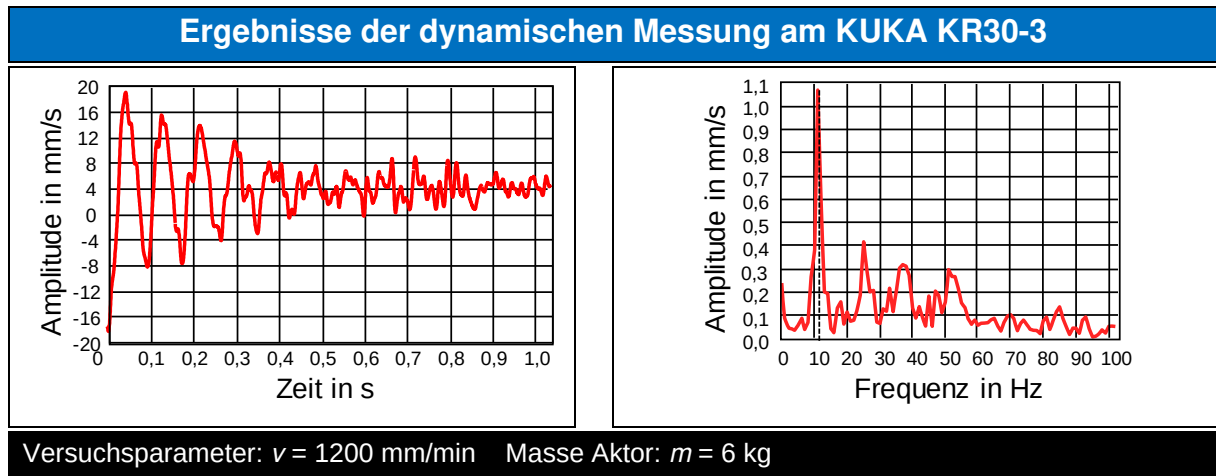


Abbildung 27: Schwingungsverhalten des Roboters, links: Abklingkurve im Zeitbereich, rechts: Frequenzspektrum des Zeitsignals

Die hohen Schwingungsamplituden des Robotersystems, bedingt durch die große Nachgiebigkeit bei gleichzeitig geringer Dämpfung, können sich bei der MHP-Bearbeitung auf die Werkstückoberfläche übertragen. Eine Gegenüberstellung der ungedämpften Schwingung $A \cdot \sin(\omega t)$ zur gedämpften Funktion $A \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\delta t}$ ist in Abbildung 28 im Zeitbereich dargestellt.

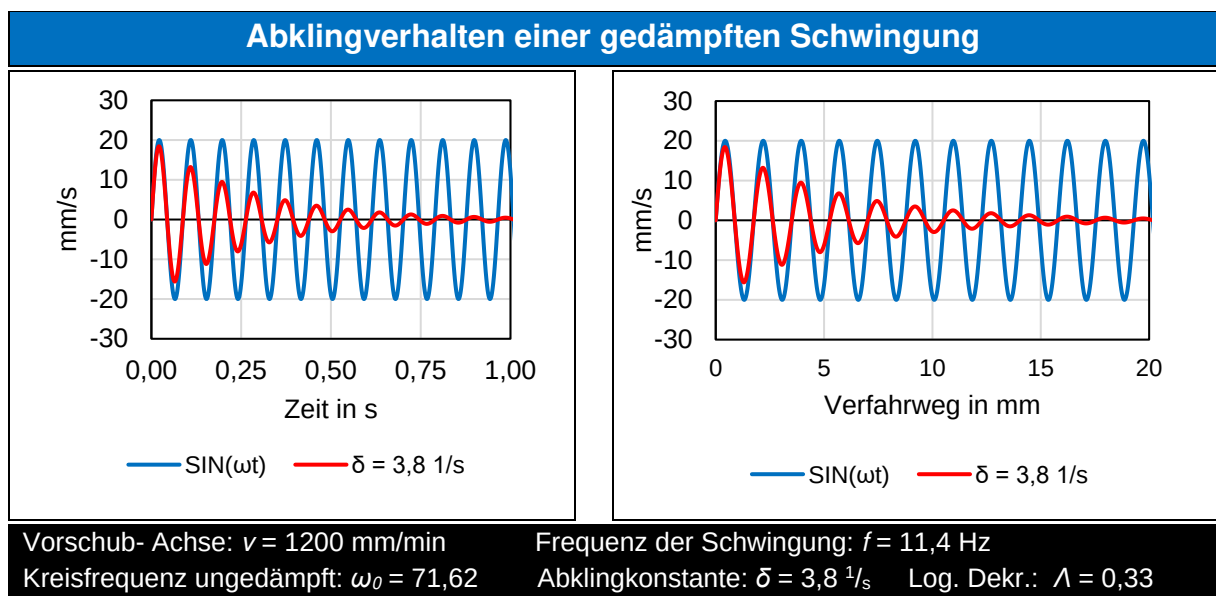


Abbildung 28: Darstellung der gedämpften und ungedämpften Schwingungsamplitude über die Zeit (links) und über den Weg (rechts) aufgetragen

Die gedämpfte Schwingung weist die ermittelte Abklingkonstante von $\delta = 3,8 \text{ 1/s}$ auf. Hingegen ist in der rechten Darstellung die Zeitachse mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1200 \text{ mm/min}$ zu einem Weg umgerechnet worden.

Daraus ist ersichtlich, dass bei einer Schwingungsanregung und einer konstanten Bahnbewegung die Amplitude nach etwa 5 mm erst um 50% reduziert ist. Für eine Bearbeitung einer Werkstückoberfläche bedeutet dies, dass es hierzu zu variierenden Kontaktverhältnissen kommt und eine Welligkeit der Oberfläche in diesen Bereichen nach der Bearbeitung vorliegen kann.

4.1.2 Einfluss des statischen Maschinenverhaltens

Die statischen Maschinenuntersuchungen umfassen die Bestimmung der Steifigkeit des Roboterflansches im Arbeitsbereich als auch den Einfluss der ersten Hauptdrehachse auf das Ergebnis der MHP-Bearbeitung. Die Bestimmung der Steifigkeit bezieht sich dabei auf eine Ausrichtung des Roboterflansches im rechten Winkel zur Werkstückoberfläche. Die Untersuchung der Steifigkeit des Systems ist insofern von Interesse bei der MHP-Bearbeitung, da durch die vorliegenden hohen Kontaktkräfte diese über das Maschinensystem aufgenommen werden müssen. Die Untersuchung der statischen Steifigkeit im Arbeitsraum des Roboters (Abbildung 24) wurde an vier Messpunkten vorgenommen und ist dem Nullpunktspannsystem zugeordnet. Dabei entspricht die erste Messposition dem festgelegten Basiskoordinatensystem. Die Kennzeichnung der Steifigkeitsmessung wird mit folgender Symbolik k_{zzx} beschrieben. Dabei steht k für das Symbol der Steifigkeitsmessung. Der erste Index beschreibt die Krafteinleitungsrichtung, der zweite die Messrichtung. Der letzte Index gibt Auskunft über den untersuchten Messpunkt. So beschreibt k_{zz1} den Steifigkeitswert für den ersten Punkt mit der Wirk- und Messrichtung in Z-Richtung des Basiskoordinatensystems. Für diesen Messpunkt liegt ein Wert von $k_{zz1} = 0,91 \text{ N/}\mu\text{m}$ ohne montierten MHP-Aktor vor. Betrachtet man nun die Gesamtsteifigkeit von Roboter inklusive E-MHP-Aktorik, so sinkt diese für diesen Messpunkt auf $k_{zz1} = 0,64 \text{ N/}\mu\text{m}$ ab. Wirken nun hohe Reaktionskräfte auf den Roboterflansch, wie diese beim MHP-Prozess vorliegen, so führen diese zu großen Verlagerung und letztendlich zu Positionsabweichungen. Eine genaue Auflistung der Steifigkeiten für den Arbeitsraum mit und ohne MHP-Aktor sind in der nachfolgenden Tabelle 11 zusammengefasst. In der letzten Zeile sind die jeweiligen Koordinaten des Krafteinleitungspunktes angeführt. Im Falle der Steifigkeitsmessung mit MHP-Aktor verschiebt sich die Z-Koordinate um 320 mm in die positive Z-Richtung. Neben dem Einfluss der statischen Steifigkeit eines Roboters auf die MHP-Bearbeitung, ist die Positionsgenauigkeit der einzelnen Maschinenachsen ein weiterer wichtiger Punkt.

	$k_{zz1} \text{ (N/}\mu\text{m)}$	$k_{zz2} \text{ (N/}\mu\text{m)}$	$k_{zz3} \text{ (N/}\mu\text{m)}$	$k_{zz4} \text{ (N/}\mu\text{m)}$
ohne Aktor	0,91	0,73	0,81	1,10
mit Aktor	0,64	0,63	0,68	0,76
X/Y/Z (mm)	1195,46/- 461,44/1319,04	1297,94/- 633,19/1319,04/	1126,17- 735,67/1319,04/	1023,74/- 563,89/1319,04

Tabelle 11: Ergebnis der Steifigkeitsmessung am Roboter mit und ohne E-MHP Aktor

Im Speziellen gilt es, das Getriebespiel der einzelnen Drehachsen als große Einflussgröße auf das Bearbeitungsergebnis zu nennen. Insbesondere die ersten drei Hauptachsen (A1 - A3) sind für die Hauptausrichtung des Roboters verantwortlich und bestimmen die Positioniergenauigkeit und damit maßgeblich die Positionierung des Hammerkopfes während des Bearbeitungsprozesses. Im Falle einer gezielten Oberflächenstrukturierung, bei der jeder Einzeleinschlag innerhalb eines Toleranzfeldes liegen muss, führen Abweichungen im Eindrucksabstand zu Unregelmäßigkeiten in der Strukturierung. Fehlerhafte oder nicht spielfreie Getriebekomponenten können mögliche Abweichungen in der Positioniergenauigkeit hervorrufen [92]. Für den Roboter KUKA KR30-3 wurden aus den genannten Gründen die Auswirkungen des Getriebespiels auf eine Oberflächenstrukturierung in weiterer Folge näher betrachtet. Ziel dieser Untersuchung ist es, neben der Größe des Getriebespiels auch den Einfluss auf die Strukturierung festzustellen. Die Messung des Umkehrspiels der ersten Hauptachse (A1) erfolgte unter Verwendung der eingangs beschriebenen Messkette. Das Ergebnis der Umkehrspielmessung zeigt, dass am Nulldurchgang der Messkurve eine Verschiebung von $\Delta = 29,4 \mu\text{m}$ vorliegt. Bei einem Radius des positionierten Wegmesssensors zur Drehachse A1 von $r = 291 \text{ mm}$ ergibt sich somit eine Verdrehung von:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\Delta}{r}\right) = 0,005789^\circ \quad (13)$$

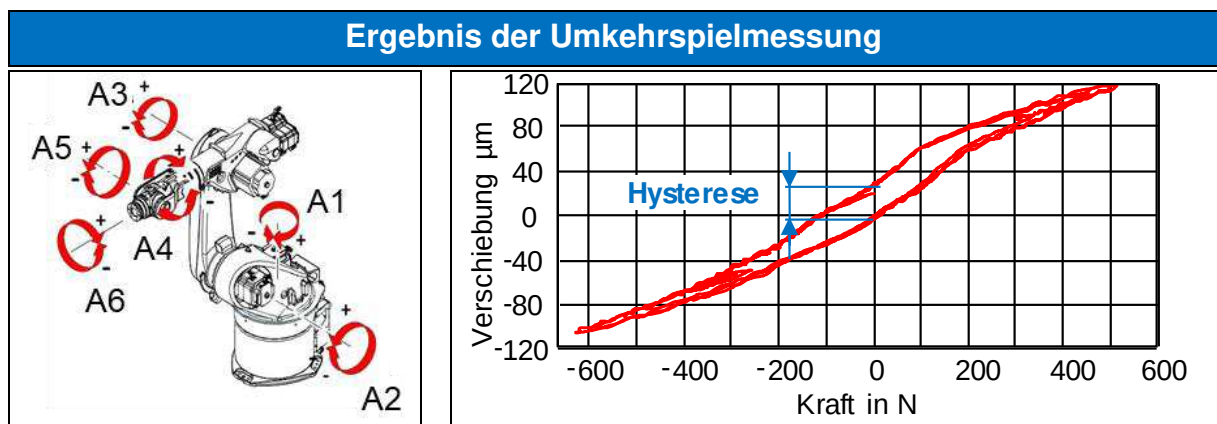


Abbildung 29: Hysterese der 1. Hauptdrehachse des Roboters KUKA KR30-3, links: schematische Darstellung der Roboterachsenbezeichnung, rechts, Kraft-Verschiebungsdiagramm der Hauptdrehachse A1

Findet nun eine mäanderförmige Bearbeitung einer Werkstückoberfläche statt, um eine gezielte Oberflächenstrukturierung zu erzeugen, so kann durch die vorliegende Umkehrspanne an der Hauptdrehachse ein Versatz zwischen den Einzelbahnen entstehen. Das Ergebnis der Umkehrspielmessung ist in Abbildung 29 als Hysterese der Verschiebung über die Kraftwirkung dargestellt. Um diese Auswirkung auf das Ergebnis bei der MHP-Bearbeitung besser darstellen zu können, wird der Versuch gestartet, eine Strukturierung der Oberfläche einer Al-2024-T351-Legierung durch den Einsatz des E-MHP-Aktor am Roboter durchzuführen. Die Bedeutung dieses

mechanischen Spiels für die Positioniergenauigkeit und in weiterer Folge für das Ergebnis der MHP-Bearbeitung ist in Abbildung 30 zu sehen. Findet nun eine mäanderförmige Bearbeitungsstrategie statt (anfahren aus variierender Richtung), so ist aufgrund des vorhandenen mechanischen Spiels kein konstanter Zeilenabstand realisierbar. Es liegt hier ein variabler Zeilenabstand von 721 μm und 475 μm vor. Der in der Abbildung 30 angeführte Parameter für den Zeilenabstand s von 0,6 mm wird in diesem Fall nicht erreicht. Es liegt in beiden Fällen eine Abweichung zum Vorgabewert von etwa 120 μm vor. Diese Abweichung (Δx) lässt sich direkt auf die Umkehrspanne zurückführen, indem der Abstand der Achse des Hammerkopfes zur Hauptdrehachse $A1$ (r) mit der Winkelabweichung γ über folgende trigonometrische Funktion in Beziehung gesetzt wird.

$$r \cdot \tan(\gamma) = \Delta x \quad (14)$$

Mit den gegebenen Werten für $r = 1195 \text{ mm}$ und $\gamma = 0,005789^\circ$ ergibt sich eine Abweichung von 120,7 μm . Findet hingegen eine Bearbeitung aus der gleichen Drehrichtung der Achse $A1$ statt (Strategie 2 in Abbildung 30 rechts), so kann eine gleichmäßige Oberflächenstruktur erzeugt werden und der Effekt der Umkehrspanne kommt nicht zum Tragen.

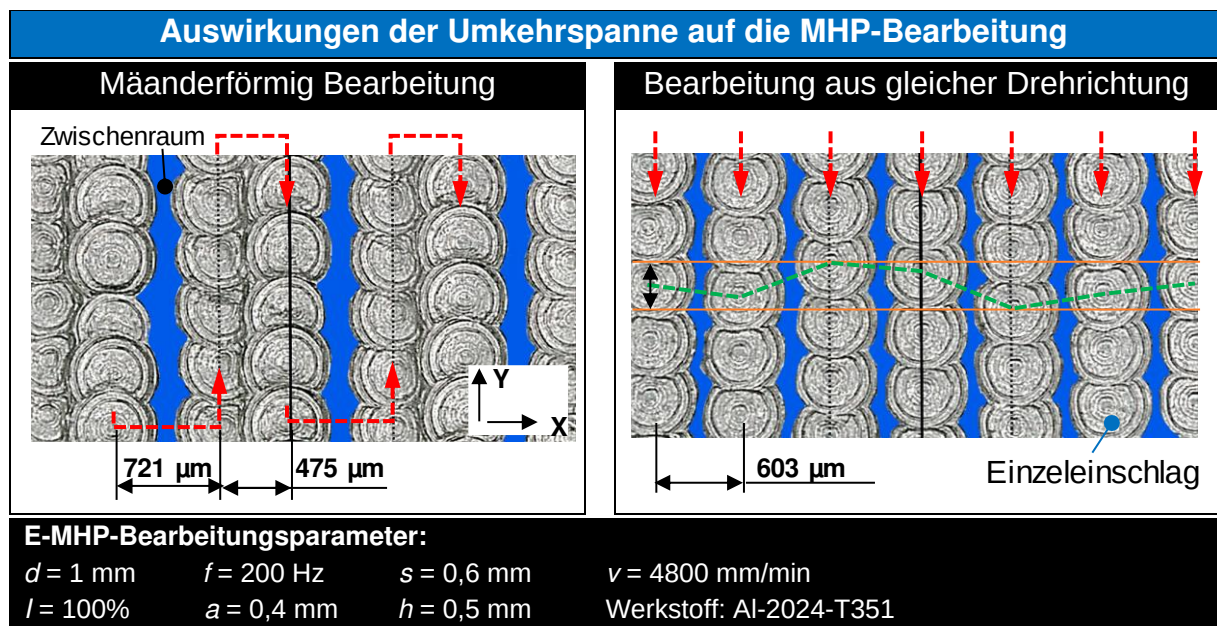


Abbildung 30: Einfluss der Bearbeitungsstrategie zur Oberflächenstrukturierung, links: Ergebnis der Positionierung in gegengleicher Richtung, rechts: Anfahrt aus einheitlicher Richtung

Der Bereich zwischen den Einzeleindrücken ist farblich markiert, um den Effekt der Strukturierung besser hervorzuheben. Unabhängig von der Auswirkung der Anfahrtstrategie (mäanderförmig oder gerichtet) ist in beiden Fällen eine ungleichmäßige horizontale Ausrichtung der Einzeleindrücke zu erkennen.

4.1.3 Einfluss der Bahninterpolation und der Bearbeitungsstrategie

Neben dem Einfluss der strukturdynamischen Eigenschaften des Maschinensystems nehmen auch die Bearbeitungsstrategie als auch die Bahninterpolation einen gezielten Einfluss auf das erzielbare Bearbeitungsergebnis. Wie sich die Wahl der Interpolationsart auf das Ergebnis auswirkt und welche zusätzlichen Bearbeitungsstrategien angewendet werden können, um eine optimale Oberflächenbearbeitung zu gewährleisten, wird folgend behandelt. Einen maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeit einer Bahnbewegung nehmen neben den gezeigten mechanischen auch steuerungstechnische Kenngrößen. Die Wahl eines geeigneten Interpolators der Maschinensteuerung ist von großer Bedeutung [93]. Dieser berechnet für eine vorgegebene Bearbeitungsbahn die notwendigen Bewegungen der einzelnen Maschinenachsen, um den Endeffektor auf einer genau definierten Bahn zu führen. Wie in [94] ausgeführt dominieren im Falle eines Roboters zwei Interpolationsarten, um eine programmierte Bewegung umzusetzen. Bei der Punkt zu Punkt-Steuerung (engl. Point to point, PTP) werden Bewegungen des Endeffektors möglichst rasch ausgeführt und dabei ein nicht definierter Verlauf der Bahnbewegung in Kauf genommen. Die PTP-Steuerung wird in eine asynchrone, synchrone und vollsynchrone Bewegung unterteilt [94]. Im Falle der zweiten Interpolationsart der Bahnsteuerung wird zwischen einzelnen vorgegebenen Punkten auf der Bearbeitungsbahn eine definierte mathematische Beziehung aufgestellt, auf der sich der Endeffektor bewegen soll. Gängige Definitionen sind linear-, zirkularer oder spline-interpolierte Bewegungspfade. Zwischen den beiden definierten Punkten wird in Abhängigkeit von der Orientierungseinstellung die Ausrichtung des Endeffektors vom Anfangspunkt in den Endpunkt kontinuierlich übergeführt. Diese Ausrichtung kann jedoch auch konstant gehalten werden und ist bei der Festlegung der MHP-Bearbeitungsstrategie zu berücksichtigen, da der Auftreffwinkel eine entscheidende Rolle bei der MHP-Bearbeitung spielt [30]. Bei einer splineinterpolierten-Bearbeitungsbahn wird die Bahnkontur über ein Polynom angenähert und dabei versucht, eine konstante Geschwindigkeit zwischen den einzelnen Bahnpunkten aufrecht zu halten. Im Gegensatz zur linearinterpolierten Bahn kann unter Verwendung einer Spline-Interpolation ein deutlich homogeneres Geschwindigkeitsprofil bei der Bearbeitung erreicht werden.

Der Einfluss der Interpolation auf die MHP-Bearbeitung einer Oberfläche wird anhand einer ebenen Flächenbearbeitung des Werkstoffes X155CrVMo12-1 (1.2379) untersucht. Der eingesetzte E-MHP-Aktor, adaptiert am Roboter, wird in einer mäanderförmigen Bearbeitungsstrategie über die Werkstoffoberfläche geführt. Es werden zwei Felder mit einer Größe von 16 mm x 30 mm bearbeitet, wobei ein Feld mit einer reinen linearinterpolierten Bahn und das zweite Feld mit zusätzlichem Überschleifbefehl der Bahnpunkte (KUKA-Syntax „\$C_DIS“) programmiert wurde. Unter Anwendung dieses Programmierbefehls wird eine Bahn and die programmierten Stützpunkte angenähert. Diese wird mittels dem Radius einer Kugel definiert, welcher

es der Steuerung des Roboters erlaubt, innerhalb dieses Bereiches von der Sollkontur abzuweichen. Unter diesen Umständen ist es möglich, eine vorgegebene Bahngeschwindigkeit besser abzubilden. Dieses verbesserte Geschwindigkeitsverhalten steht jedoch einer ungenaueren Bahntreue gegenüber. Die Programmierung des Roboters erfolgte offline in kartesischen Raumkoordinaten. Das Ergebnis der bearbeiteten Oberflächen mit den beiden unterschiedlichen Bahnplanungsmethoden ist in Abbildung 31 zu sehen. Unter Auswertung der Oberflächentopografie und Erstellung eines Profilquerschnittes ist es möglich, die plastische Deformation der Oberfläche durch den lokalen Umformvorgang besser zu beschreiben. Ein erstelltes Querschnittprofil des Bearbeitungsfeldes mit der angenäherten Bahn (linearinterpoliert inkl. Überschleifen, Abbildung 31 rechts) weist vom Bahnumkehrpunkt in Längsrichtung der Bearbeitung eine deutlich bemerkbare Welligkeit auf. Diese nimmt in Bearbeitungsrichtung ähnlich einer gedämpften Schwingung ab. Hingegen ist quer zur Bearbeitungsrichtung diese Welligkeit nicht ersichtlich. Lediglich die vergrößerte Umformung der letzten Bearbeitungsbahn ist erkennbar. Im Falle der Längswelligkeit liegt eine Wellenlänge dieses Profil von 1,866 mm vor. Diese kann bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1200$ mm/min in eine Frequenz f von 10,7 Hz umgerechnet werden.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\Delta l / v} = \frac{1}{1,866 / 20} = 10,7 \text{ Hz} \quad (15)$$

Dabei bezeichnet T die Periodendauer und Δl die Wellenlänge der gemessenen Welligkeit des Profils auf der Werkstückoberfläche. Es liegt hier nahe, dass diese Profilierung an der Oberfläche durch eine Schwingungsanregung des Roboters hervorgerufen wird. Dieses charakteristische Merkmal ist lediglich im Bereich der Bahnumkehrpunkte zu erkennen, welche charakteristische Beschleunigungs- und Bremseffekte aufweisen.

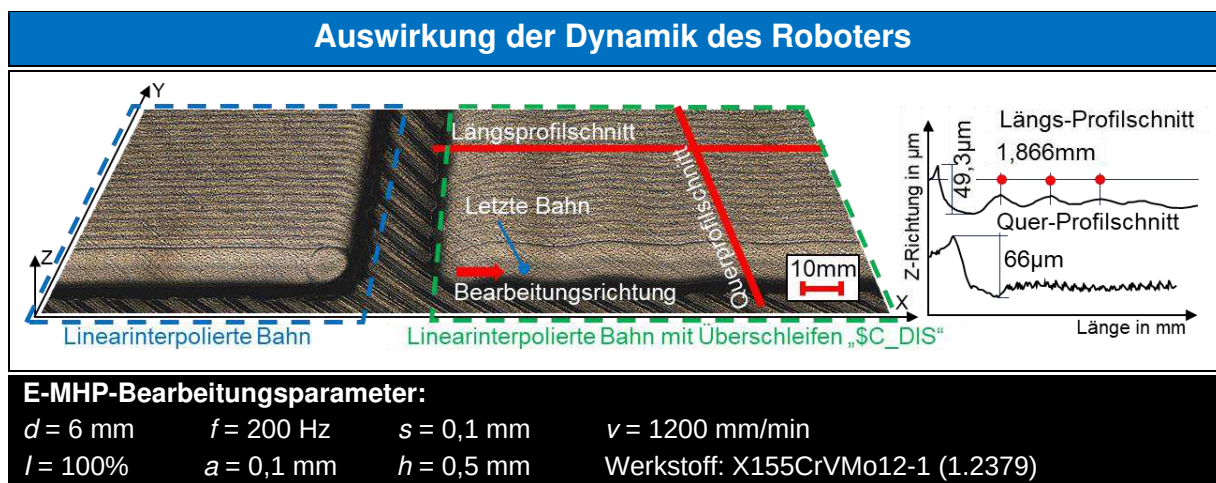


Abbildung 31: Auswirkung der Interpolationsart auf die MHP-Bearbeitung (linearinterpoliert und inkludierter Überschleifbefehl) sowie Profilschnittdarstellungen zur Bewertung der Oberflächenwelligkeit

Das erste Bearbeitungsfeld (Abbildung 31 links) ist vollständig linearinterpoliert. Zwar ist in dieser Oberfläche im Längs- als auch im Querprofilschnitt keine Welligkeit auszumachen, doch ist an den Bahnumkehrpunkten eine deutlich größere Umformung als bei den zuvor gezeigten Bearbeitungsfeldern erkennbar. Dies ist der linearinterpolierten Bahn geschuldet, welche einen Geschwindigkeitseinbruch an den Umkehrpunkten mit sich bringt. Dieses Verhalten der Verringerung der Bahngeschwindigkeit an den einzelnen Interpolationspunkten wird im Folgenden anhand einer Bearbeitungsbahn eines wellenförmigen Bauteils in Abbildung 32 dargestellt. Zu sehen ist hierbei eine Darstellung der TCP-Geschwindigkeit in vektorieller Darstellung einer Einzelbahn. Die hier gewählte Art der Profilform ist in Anlehnung an die Mittelschneide eines Bechers eines Peltonlaufrades erstellt und soll einen möglichen Anwendungsfall zur MHP-Bearbeitung im Bereich der Energieerzeugung zeigen.

Peltonturbinen finden im Bereich der hydraulischen Energieerzeugung Anwendung und besitzen aufgrund der optimierten Formgebung der Schaufeln einen hohen Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung [95]. Neben dieser optimierten Formgebung ist ein wichtiger Punkt, die Lebensdauer der Peltonlaufräder zu erhöhen, um ungeplanten Wartungsarbeiten und damit verbundene Stillstandszeiten entgegenzuwirken. Ein Hauptaugenmerk bei der Bearbeitung von Peltonschauflern gilt der beschriebenen Hauptschneide, welche aufgrund möglicher Fertigungsungenauigkeiten von der idealen Form abweicht und dadurch Kavitationsschäden fördert [68].

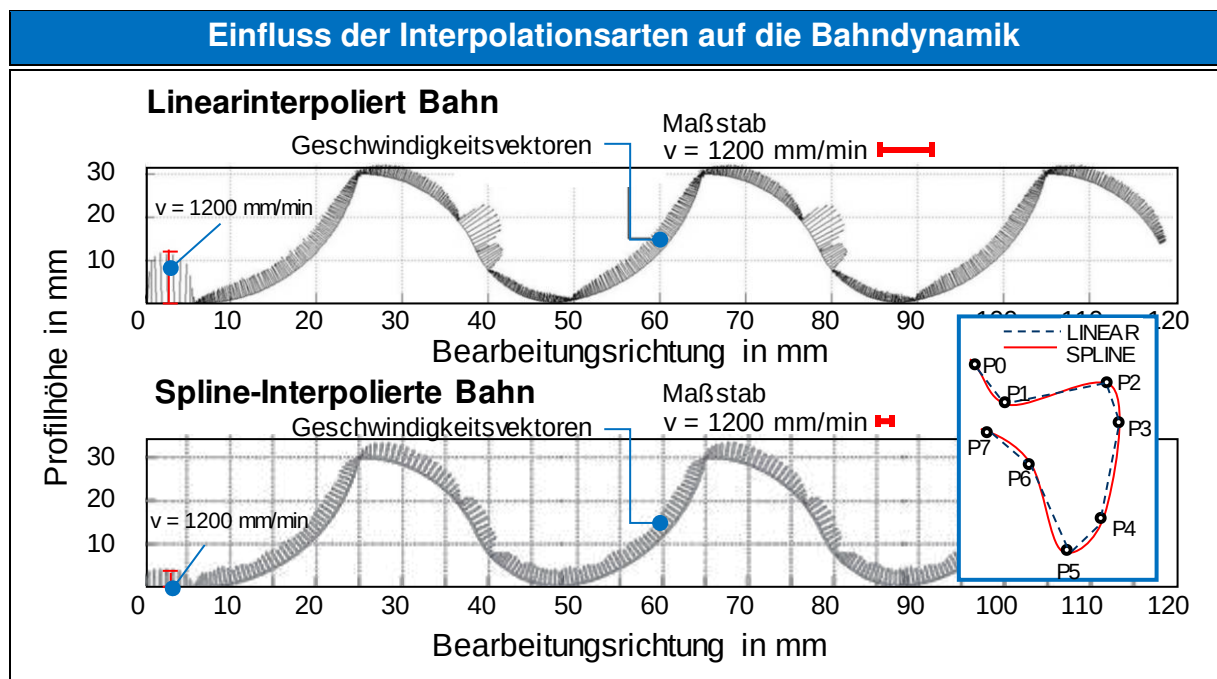


Abbildung 32: Bahndynamik unterschiedlicher Interpolationsarten am Roboter, Bild oben: linearinterpolierte Bahnvektoren überlagern die Bahnkurve, unten: splineinterpolierte Bahnvektoren überlagern die Bahnkurve

Durch eine mögliche MHP-Bearbeitung kann eine verbesserte Oberflächeneigenschaft (Kaltverfestigung) bei den hochbelasteten Schaufeln aufgrund der Kaltverfestigungsmechanismen herbeigeführt werden. Bevor jedoch eine Bearbeitung dieser definierten Geometrie durchgeführt werden kann, bedarf es eines definierten Bearbeitungsprozesses und grundlegender Untersuchungen des Bearbeitungsvorganges. Neben dieser geometrischen Herausforderung zur Bearbeitung dieser komplexen Geometrieform, wird in Kapitel 4.4 der Werkstoff X3CrNiMo13-4 (1.4313) als ein Beispiel für einen CrNi-Werkstoff für die Herstellung von Turbinen für Wasserkraftwerke näher untersucht. Die in Abbildung 32 der Bahn überlagerten Vektoren stellen einerseits die Ausrichtung des Hammerkopfes und somit den Auftreffwinkel des Hammerkopfes auf die Werkstückoberfläche dar und andererseits repräsentiert ihre Länge die Bahngeschwindigkeit zur jeweiligen Position. Diese Darstellung entspringt einer Bahnbewegung mit dem KUKA KR30-3 Roboter bei linearer sowie einer splineinterpolierten Bahn. Es fällt zunächst sofort auf, dass sich die Länge der Vektoren bei beiden Interpolationsarten im Bereich der Tangentenübergänge zwischen den variierenden Radien voneinander unterscheiden.

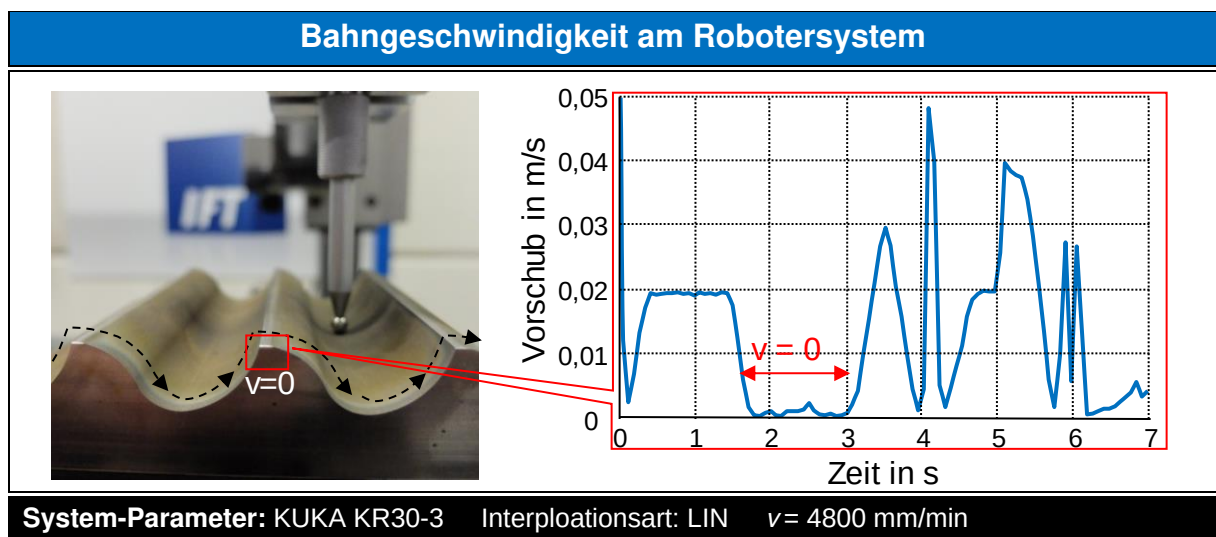


Abbildung 33: Ausschnitt einer Geschwindigkeitsdarstellung eines linearinterpolierten Bahngeschwindigkeitsverlauf entlang einer Kante und dem damit verbundenen Einbruch der Bahngeschwindigkeit durch Umlagerung der Maschinenachsen eines Roboters (KUKA KR30-3)

Dies bedeutet für die MHP-Bearbeitung, dass sich an diesen Stellen ein variabler Eindruckabstand a einstellt und somit keine gleichmäßige Bearbeitung stattfindet. Unter Anwendung der splineinterpolierten Bahn wird ein deutlich geglättetes, homogeneres Geschwindigkeitsprofil ermöglicht. Im Bereich großer Orientierungswinkel des Aktors (Änderung des Auftreffwinkels), wie etwa dem Scheitelpunkt der Kontur, kommt es dennoch zu einer Absenkung der Geschwindigkeit. In diesem Fall muss das MHP-System in der Lage sein die Hämmerfrequenz f entsprechend der Bahngeschwindigkeit zu steuern. Betrachtet man

im Detail den Verlauf der Bahngeschwindigkeit im Bereich der Kante, so erkennt man, dass hier ein Einbruch der Geschwindigkeit vorliegt und diese ein Minimum annimmt (Abbildung 33). Diese Darstellung der Bahngeschwindigkeit ist lediglich ein kurzer Ausschnitt der gesamten Bearbeitung und dennoch ist bereits gut zu erkennen, wie sehr die Bahngeschwindigkeit variiert. Bei Auswertung des Sollwertes der Vorschubgeschwindigkeit über den gesamten Bearbeitungsprozess zeigt sich, dass diese bei einer linearinterpolierten Bahnplanung am TCP lediglich auf 14,8% der Bearbeitungsbahn erreicht wird. Wie gezeigt werden konnte, nimmt die Interpolationsart Einfluss auf die Bahngeschwindigkeit. Aufgrund des periodischen Kontaktes des Hammerkopfes finden durch diesen Einbruch der Bahngeschwindigkeit mehrere Einzeleinschläge statt. Dies führt zu einer erhöhten Umformung an der Oberfläche. Um diesem unerwünschten Effekt entgegenzuwirken, wird durch die Wahl von geeigneten Bearbeitungsstrategien versucht, eine optimierte Oberflächenbearbeitung durchzuführen. Wie bereits LECHNER [30, S. 75] zeigen konnte, führt die kontinuierliche Reduzierung des Hubes h und die Anpassung des Bahnabstandes s bei Verwendung des E-MHP-Systems zu einer optimierten Bearbeitung von Kanten und Übergangsbereichen.

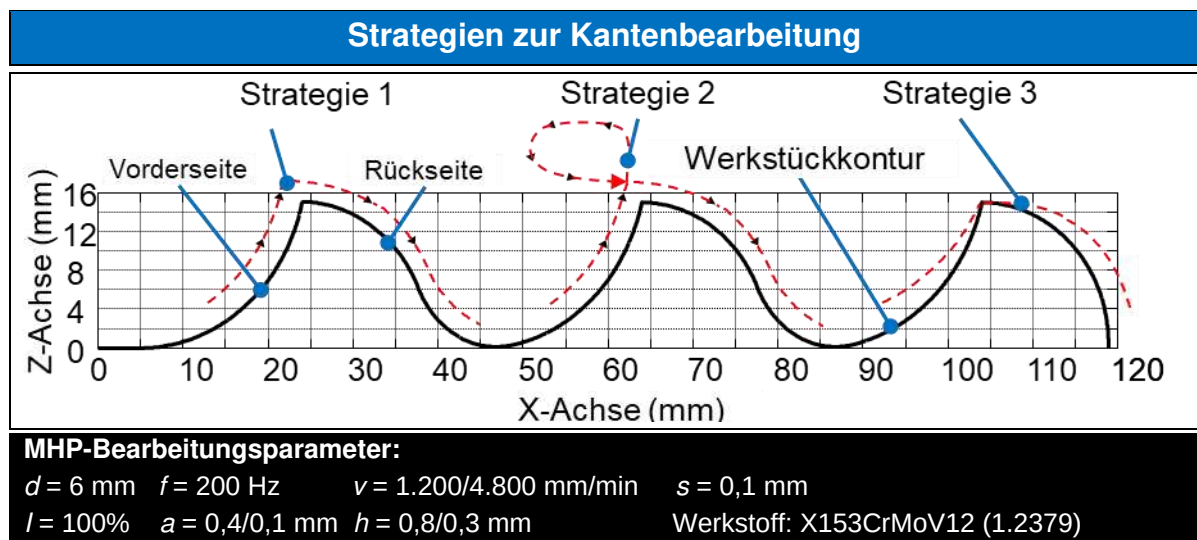


Abbildung 34: Festgelegte Bearbeitungsstrategien zur Kantenbearbeitung

Dieser Ansatz wurde auch im Folgenden aufgegriffen, um die Bearbeitung der Wellengeometrie zu optimieren. Um neben der Bearbeitungsstrategie auch eine Aussage über den Einfluss der Bearbeitungsmaschine treffen zu können, erfolgte eine Bearbeitung des Bauteiles auf einer Werkzeugmaschine vom Typ Hermle C20U mit einer Heidenhain Steuerung iTNC530 als auch auf dem genannten Industrieroboter KUKA KR30-30 mit KRC2-2005 Steuerung. Das in Abbildung 34 gezeigte Profil der Wellenform wurde mit drei unterschiedlichen Strategien bearbeitet. Strategie 1 beschreibt die Referenzbearbeitung mit konstantem Hub. Strategie 2 wurde im Bereich der Kante tangential ab- und angefahren, um bestmöglich eine konstante Bahngeschwindigkeit aufrecht zu erhalten und Strategie 3 ist in Anlehnung an

LECHNER [30, S. 75] mit einer Reduzierung des Hubes hin zur Kante ausgeführt. Das Ergebnis der Bearbeitung der Kanten ist in Abbildung 35 dargestellt. In dieser ist jeweils eine Aufnahme der drei Wellenbereiche von der Rückseite abgebildet. Bei den hier gezeigten Aufnahmen handelt es sich um Abbildungen von der konvexen Fläche der Geometrie (Rückseite), welche im oberen Randbereich die Kante der Wellenform zeigt. Des Weiteren sind vier bearbeitete Flächenbereiche zu erkennen, welche mit den Bearbeitungsparameter aus Abbildung 35 erzeugt wurden. Die beiden linken bearbeiteten Bereiche sind unter Verwendung der Werkzeugmaschine (Hermle C20U) erstellt, rechts unter Verwendung des Robotersystems (KUKA KR30-3).

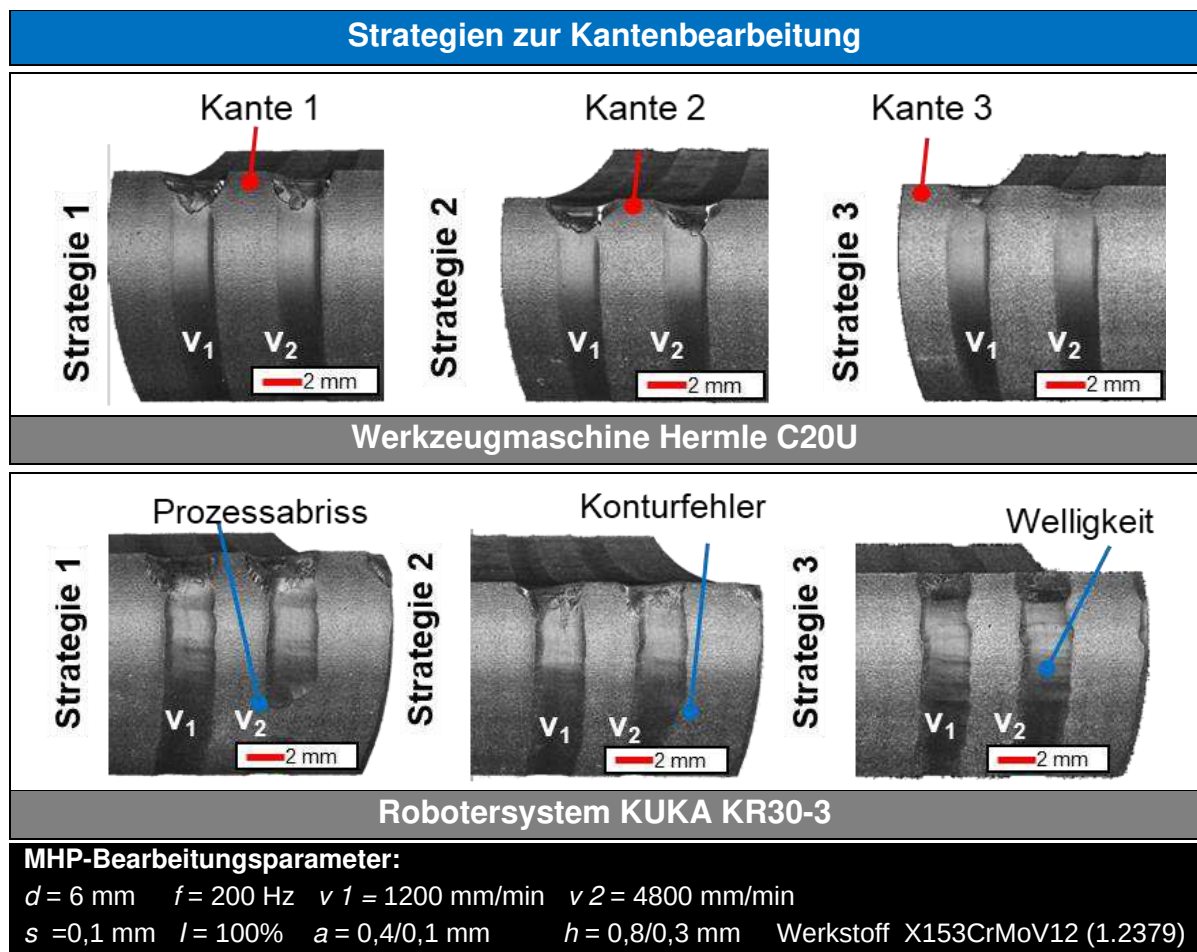


Abbildung 35: Ergebnis der unterschiedlichen Bearbeitungsstrategien zur Kantenbearbeitung, oben: Ergebnis der MHP-Bearbeitung mit dem E-MHP-System auf der Werkzeugmaschine Hermle C20U, unten: Ergebnis der MHP-Bearbeitung mit dem E-MHP-System auf dem Roboter KUKA KR30-3

Diese einzelnen Bahnen sind in der gezeigten Abbildung mit der der Bezeichnung v_1 – v_2 gekennzeichnet. Diese entsprechen der jeweils eingestellten Bahngeschwindigkeit v in mm/min (Abbildung 35). Insgesamt wurden die vier Bearbeitungsbahnen mit 10 Einzelbahnen und einem Bahnabstand von 0,1 mm erzeugt. Das Ergebnis der Bearbeitung mit konstantem Hub h in der Strategie 1 zeigt sowohl bei der Werkzeugmaschine als auch beim Roboter im Bereich der Kante eine

hohe Formabweichung. Es ist zudem eine geringere Bahntreue bei der Bearbeitung durch den Roboter ersichtlich. Diese Abweichung ist vom dynamischen Verhalten des Roboters abhängig und führt bei einer Bahngeschwindigkeit $v = 4800 \text{ mm/min}$ zu einer undefinierten Bearbeitung der Flächenbereiche. Auch Strategie 2 (konstanter Hub mit tangentialem Abheben) zeigt, dass trotz der eingesetzten Kantenschutzstrategie ein hoher Umformgrad an der Kante vorliegt. Zudem kann auch bei dieser Bearbeitung eine geringere Bahntreue bei der Bearbeitung durch das Robotersystem sowie eine Prozessinstabilität bei einer Bahngeschwindigkeit von $v = 4800 \text{ mm/min}$ ausgemacht werden. Letztendlich weist die Kantenschutzstrategie mit verringertem Hub zur Kante (Strategie 3) das beste Ergebnis hinsichtlich Geometrieerhaltung der Kante auf. Die eingesetzte Kantenschutzstrategie bewirkt eine Minimierung der Umformenergie, welche durch die kontinuierliche Reduzierung des Hubes geschieht. Diese geringere Umformarbeit führt bei einem Einzeleinschlag zu einer Minimierung der Eindrucktiefe und des Eindruckdurchmesser (siehe [65] und [46]). In der Abbildung 36 sind zur Beurteilung des Bearbeitungsergebnisses die Abweichungen der bearbeiteten Kanten im Bezug zu unbearbeiteten Kanten als Abweichungen in der Y- und Z-Koordinate dargestellt. Dabei bezeichnet jeder eingezeichnete Punkt die maximale Abweichung zur Originalkontur. Diesen ist zur besseren Beurteilung ein Profilschnitt der Originalkontur eines einzelnen Kantenbereiches gegenübergestellt.

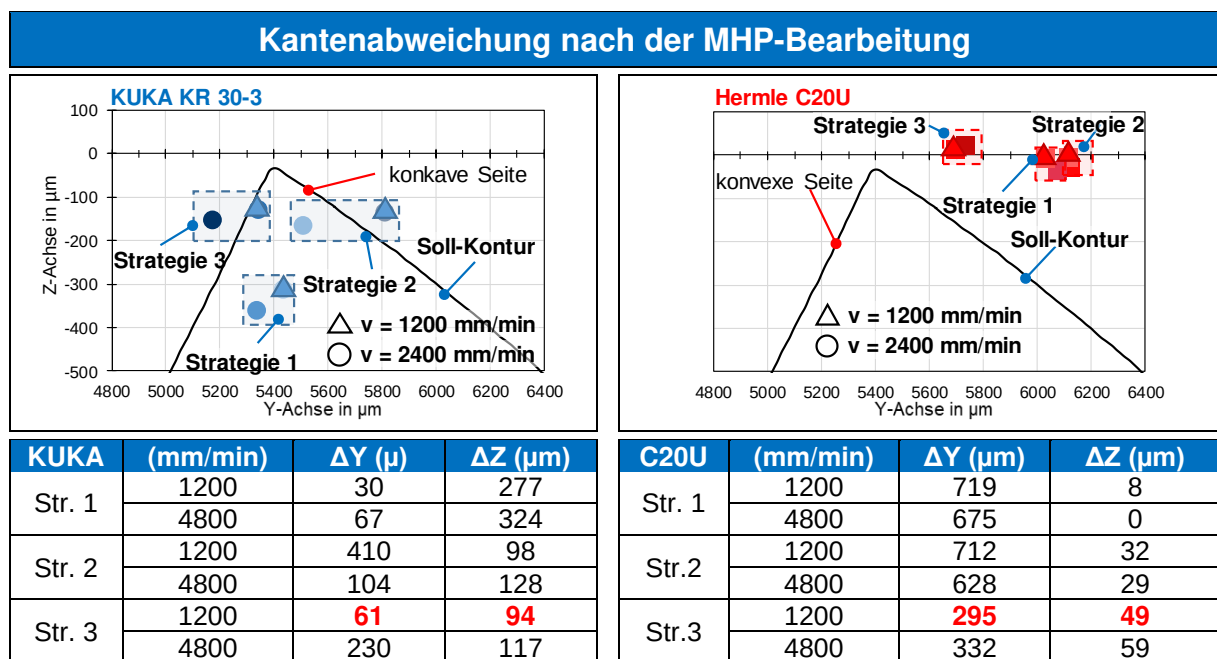


Abbildung 36: Abweichungen der umgeformten Kante in Bezug auf die Sollkontur für beide Maschinensysteme (Hermle C20U und KUKA KR30-3)

Es fällt hier zunächst auf, dass bei der Bearbeitung mit dem Roboter die Kante in der Z-Achse sehr stark deformiert wird. Hingegen zeigt die Bearbeitung mit der Werkzeugmaschine eine Verschiebung dieser in Richtung der Y-Achse. Zudem bestätigen diese Ergebnisse die Annahme, dass die Strategie 3 hinsichtlich

der Formerhaltung im Vergleich das beste Ergebnis liefert. Somit lassen sich die von LECHNER [30] gezeigten Bearbeitungsstrategien auch auf die Mehrachsbearbeitung überführen und bestätigen. Wie hier gezeigt werden konnte, ist es durch eine geeignete Wahl der Interpolationsart und der Bearbeitungsstrategie möglich, eine Verbesserung des Bearbeitungsergebnisses zu erzielen. Obwohl durch die gezeigten Methoden ein verbessertes Bearbeitungsergebnis erzielt werden kann, treten durch nicht konstante Bahngeschwindigkeiten lokal hohe plastische Verformungen sowie variable Eindrucksabstände auf (siehe [53]). Um eine weitere Optimierung des Prozesses erreichen können durch eine gezielte Steuerung der Bearbeitungsparameter gleichmäßige Einzeleindrücke und eine gleichbleibende plastische Umformung auf der Werkstückoberfläche erzielt werden. Durch eine Anpassung der Hämmerfrequenz f und der Intensität I (Spulenspannung) des E-MHP-Systems an die realen Vorschubgeschwindigkeiten auf der Bearbeitungsbahn ist es möglich gleichmäßige Eindruckabstände zu erzeugen, sowie einen gezielten Einfluss auf den Energieeintrag in die Werkstückoberfläche zu nehmen.

4.2 Steuerung des Einzelschlages der E-MHP-Aktorik

Das E-MHP-System ist für eine Bearbeitung mit konstanter Frequenz und Intensität ausgelegt [24]. Eine Einstellung der Parameter Frequenz f und der Intensität I wird über ein manuelles Bedienelement vorgenommen. Dieses Handbediengerät ist mit der Leistungselektronik des E-MHP Systems über eine serielle Schnittstelle verbunden. Über zwei auf dem Bediengerät angebrachte Inkrementalgeber (Drehknöpfe) können die Parameter manuell voreingestellt werden. Dies erfolgt jeweils mit einer Schrittweite von 1 Hz und 1%. Der einstellbare Frequenzbereich liegt zwischen 20 Hz und maximal 500 Hz. Die Intensität kann von 0% (entspricht keiner Spannung an der Tauchspule) und 100% (maximal Spannung liegt an, in diesem Fall 60 VAC) variiert werden. Zusätzlich steht dem Bediener ein Multiplikator zur Verfügung, welcher bei gedrückter Stellung beide Einstellgrößen mit dem Faktor 20 multipliziert. Das Schaltverhalten des Inkrementalgebers entspricht einem phasenversetzten AB-Signal. Bei einer geforderten Erhöhung der Frequenz oder der Intensität wird beim Drehen des Gebers in die entsprechende Richtung ein Rechteck-Signal (A vor B) ausgegeben. Bei einer geforderten Minimierung der Werte ist die Phase der Signale invertiert (B vor A). Die Ausgangssignale sind standardmäßig auf high gesetzt und entsprechen einen Spannungswert von 5 V. Die Schaltfolge der drei Funktionen Frequenz, Intensität und Multiplikator ist demzufolge von high auf low und retour (5 – 0 – 5 V). Um in weiterer Folge diese Stellgrößen variabel zur Bearbeitungsposition oder Bearbeitungsgeschwindigkeit gestalten zu können, muss eine einfache Koppelung der Hammerparameter und der maschinenspezifischen Prozessgrößen wie etwa der Bahngeschwindigkeit möglich sein. Über die beschriebene serielle Schnittstelle des Handbediengerätes ist es möglich, auf die Parameter Frequenz und Intensität zuzugreifen. Ziel ist es, diese Parameter in Abhängigkeit von der



TU
WIEN
Bibliothek
Your knowledge hub



Seite 69

Die interpolierte Bahngeschwindigkeit des KUKA KR30-3 kann in dem hier vorliegenden Fall über eine Schnittstelle in Form eines DeviceNet-Buskoppler, aus der Steuerungseinheit abgegriffen werden. Das Geschwindigkeitssignal wird mittels einer Analschnittstellenkarte als geschwindigkeitsproportionales Spannungssignal im Bereich 0 – 10 V ausgegeben. Neben dieser Option besteht zudem auch die Möglichkeit, die Bahndaten mittels einer in der Steuerungssoftware integrierten Oszilloskopfunktion aufzuzeichnen und die Daten manuell an die Datenverarbeitung zu übergeben. Die vorliegenden Geschwindigkeitsdaten, als Spannungssignal vorliegend, müssen in weiterer Folge in eine Pulsfolge umgewandelt werden.

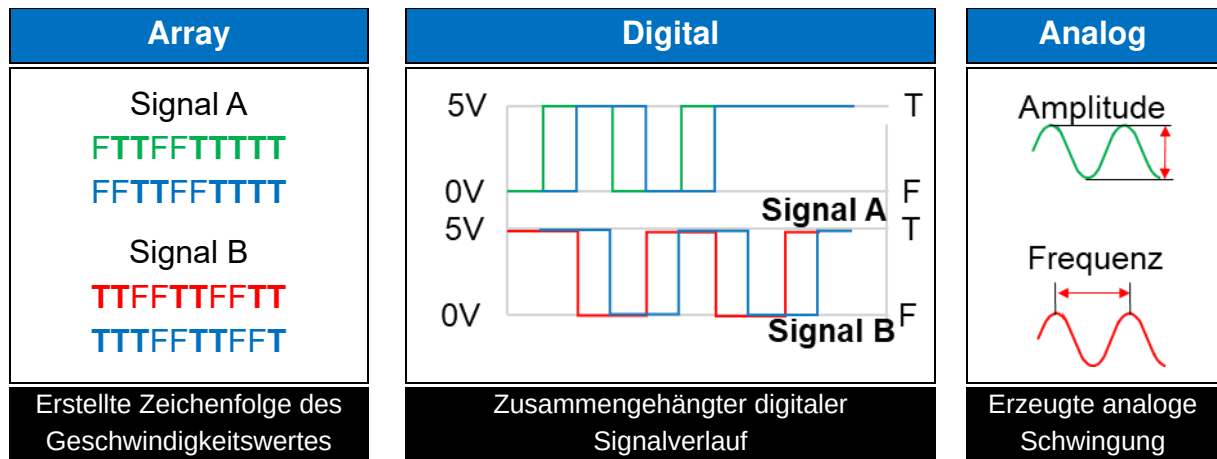


Abbildung 38: links: Signallogik der Datenverarbeitung zur Anpassung der Steuersignale des E-MHP-Systems, mitte: Steuerungssignal des E-MHP-Systems zur Frequenz und Intensitätssteuerung, rechts: analoge Signaldarstellung der Hammerkopfbewegung

Dieser Berechnungsvorgang geschieht unter Anwendung der grafischen Programmiersoftware LabVIEW 2016. Über ein E/A-Modul (Pos.4) werden diese aufbereiteten Daten direkt an die Aktorsteuerung (6) übergeben, welche letztendlich die Hammerkopfbewegung am Aktor (Pos.7) selbst steuert. Nach erfolgter Übertragung liegt am Eingang der Steuerung des Hammersystems das Signal für die Frequenz oder die Intensität in digitaler Form vor, wie Abbildung 38 zeigt. *F* und *T* repräsentieren den Status des Signals, mit *T* für True und *F* für False. Die Notwendigkeit der doppelten Einträge der Variablen ist dem Phasenversatz zur Richtungssteuerung des Signals geschuldet. Die Ansteuerung der Hämmerparameter in Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeit am TCP des Hammerkopfes wird mittels eines Triggersignal auf Softwareebene der Robotersteuerung gestartet.

Die umgesetzte Lösung des Ansteuerungskonzeptes des E-MHP-Systems wird folgend getestet und ein Vergleich zu einer ungesteuerten Bearbeitung angestellt. Mit einer Bearbeitung einer Einzelbahn in der XY-Ebene wird versucht, die Fähigkeit der Steuerungslogik darzustellen. So ist neben der Erzeugung eines äquidistanten Eindrucksabstands *a* in mm auch ein definierter Energieeintrag pro Flächeneinheit zu erzeugen. Dies kann nur bei einer gleichmäßigen Ausprägung der Einzeleinschläge sichergestellt werden. Um das Potential der Steuerungslogik herauszufinden wird eine einzelne Bearbeitungsbahn in der Ebene ausgeführt. In Abbildung 39 ist ein Geschwindigkeitsverlauf eines Bearbeitungspfad in der XY-Ebene mit den Punkten 1 - 4 dargestellt. Dabei repräsentiert 1 den Start-, 3 den Bahnumkehr- und 4 den Bahnendpunkt der Bearbeitung. Speziell in diesen Bereichen ist mit Geschwindigkeitsänderungen zu rechnen. Der Punkt 2 zeigt den Bereich, in welchem eine konstante Vorschubgeschwindigkeit und somit ein gleichmäßig verteilter Einzeleinschlag vorliegt. Bei einer konstant eingestellten Hämmerfrequenz ist davon auszugehen, dass die Bereiche 1, 3 und 4 mehrfach bearbeitet werden. Um diesen Umstand zu vermeiden, wird versucht, in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

die Hämmerfrequenz als auch die Schlagintensität anzupassen. In Abbildung 39 links ist die gemessene Vorschubgeschwindigkeit des KUKA-KR30-3-Roboters mit drei verschiedenen Frequenzverläufen des E-MHP-Systems überlagert.

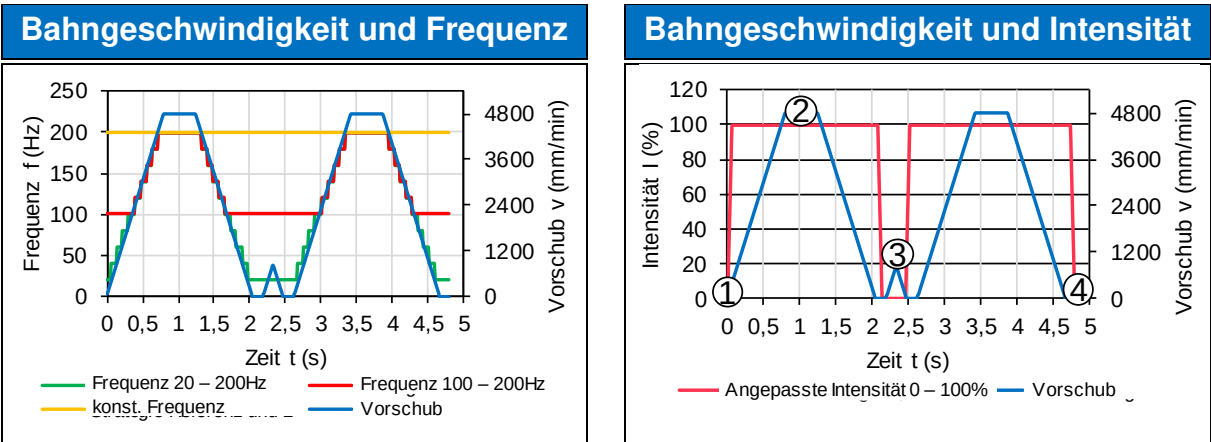


Abbildung 39: Ansteuerungsverhalten des E-MHP-Systems, links: Bahngeschwindigkeit mit überlagerten Frequenzverhalten der Aktorik, rechts: Bahngeschwindigkeit mit überlagerten Intensitätsverlauf der Aktorik

Dabei wird deutlich, dass zwischen einer konstant eingestellten Hämmerfrequenz mit $f = 200$ Hz und den beiden variierenden Frequenzverläufen ein deutlicher Unterschied besteht. Im Gegensatz zum konstanten Frequenzverlauf passen sich die beiden angepassten Frequenzkurven der Vorschubgeschwindigkeit an. In dem hier dargestellten Fall sind beide Frequenzverläufe in 20 Hz Schritten diskretisiert. In Abbildung 39 rechts hingegen ist der Verlauf der Vorschubgeschwindigkeit mit einem angepassten Verlauf der Intensität I in % überlagert.

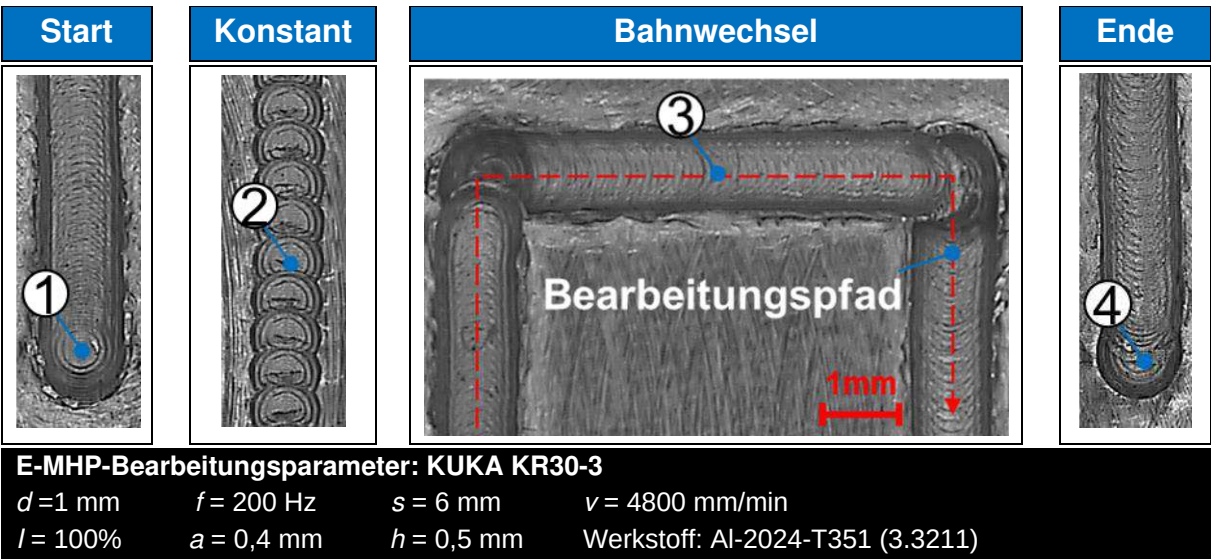


Abbildung 40: Ergebnis einer ungesteuerten E-MHP-Bearbeitung am KUKA KR30-3 am Werkstoff Al-2024-T351 auf Basis des Verlaufs der Bahngeschwindigkeit aus Abbildung 39

Diese angepassten Verläufe der Frequenz als auch der Intensität bilden die Basis für die folgenden Bearbeitungsversuche. Um zunächst jedoch eine Beurteilung einer Referenzbearbeitung vornehmen zu können, erfolgt eine Bearbeitung mit konstanter Frequenz und Intensität des E-MHP-Systems. Das Ergebnis dieser Bearbeitung mit konstanter Hämmerfrequenz und Intensität ist für den Werkstoff Al-2024-T351 (3.3211) in Abbildung 40 zu sehen. Darin ist in den Bereichen 1, 3 und 4 die hohe Überdeckung der Einzeleinschläge sichtbar, welche durch die Beschleunigungsvorgänge des Werkzeuges auf der Bearbeitungsbahn resultieren. Um folgend die Ansteuerung des E-MHP System zu testen, wurden ausgehend von dieser Referenzbearbeitung vier zusätzliche Bearbeitungsstrategien definiert, welche neben der Anpassung der Hämmerfrequenz auch eine Änderung der Schlagintensität vorsehen (siehe Abbildung 39).

Strategie	f in Hz	v in m/min	I in %
Referenz	200	4800	100
Strategie 1	100 - 200	4800	100
Strategie 2	200	4800	0 – 100
Strategie 3	100 – 200	4800	0 – 100
Strategie 4	20 - 200	4800	0 - 100

Tabelle 12: Bearbeitungsparameter für die 2D-Strukturierung

Eine genaue Übersicht der Bearbeitungsparameter für die Bearbeitung bietet die Tabelle 12. Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass die Frequenz zwischen 20 und 200 Hz und die Intensität zwischen 0 und 100% angepasst werden. Es ist anzumerken, dass der Vorgabewert der Vorschubgeschwindigkeit als konstante Größe unverändert bleibt und der reale Eindruckabstand a von der tatsächlichen Vorschubgeschwindigkeit v_{IST} beeinflusst wird. Während sich in den beiden ersten Strategien lediglich nur ein Parameter ändert, so findet in den beiden letzten Strategien eine Kombination aus beiden statt. Die Versuche werden unter Anwendung eines WC-Co-Hammerkopfes mit einem Durchmesser von 1 mm im Werkstoff Al-2024-T351 vorgenommen, um den Einfluss der Ansteuerung bestmöglich zu demonstrieren. Abbildung 41 zeigt die Start- und Endbereiche der einzelnen Bearbeitungsstrategien als Resultat einer optischen Aufnahme in Falschfarbendarstellung unter Anwendung des Messmikroskops Infinite Focus G5. Die Farbskala gibt Auskunft über die Höheninformation im Bild. Bei der Betrachtung der Referenzbearbeitung fällt sofort auf, dass im Anfangs- und im Endbereich der Bearbeitung eine hohe Umformung stattfindet, welche aufgrund der Beschleunigungseffekte – bei konstanter Frequenz und Intensität – resultieren. Zudem kann auch ein sehr geringer Eindrucksabstand ausgemacht werden, welcher ebenfalls mit der Beschleunigung des TCP einhergeht. Es sind keine einzeln separierten Eindrücke erkennbar. Dieser Effekt der ungleichförmigen Eindruckabstände kann durch die Anpassung der Frequenz zwischen 100 – 200 Hz verbessert werden, wie in dem Ergebnis der Strategie 1 ersichtlich ist.

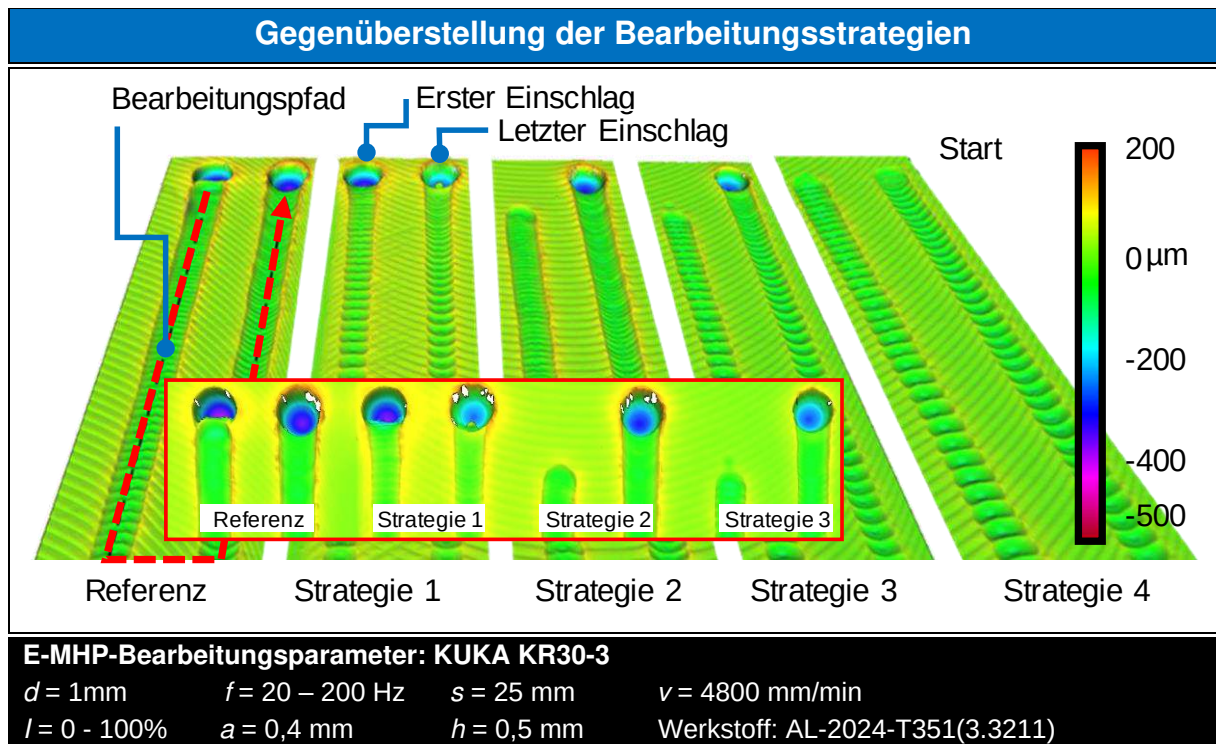


Abbildung 41: Ergebnis unterschiedlicher Bearbeitungsstrategien des E-MHP-Aktors am Werkstoff AL-2024-T351 auf Basis des Verlaufs der Bahngeschwindigkeit aus Abbildung 39

Strategie 2 fällt dadurch auf, dass eine hohe Umformung im Startbereich entfällt und der erste Einzeleindruck vom vorgegebenen Startpunkt abweicht. Dies ist der zu geringen Schwingungsamplitude des Hammersystems geschuldet, welche bei einer zu niedrigen Spulenspannung – entspricht einer niedrigen Intensität des Aktors – den Start des Prozesses verzögert und somit einen örtlichen Versatz auf der Bearbeitungsbahn mit sich bringt. Diese beiden Strategien kombiniert ergeben das Resultat der Strategie 3. Auch in dieser Kombination sind die Start- und Endbedingungen noch nicht optimal umgesetzt. Um das Problem des Versatzes des ersten Eindruckes in den Griff zu bekommen, erfolgte in Strategie 4 die Herabsetzung der Hämmerfrequenz auf $f = 20 \text{ Hz}$. Dies hat neben der besseren Abstimmung zur Vorschubgeschwindigkeit den Vorteil, dass das E-MHP-System mit seinem Tauchspulenantrieb bei niedrigerer Frequenz eine höhere Schwingungsamplitude des Werkzeuges ermöglicht. Somit kann selbst bei geringerer Schlagintensität das Starten des Prozesses sichergestellt werden. Um neben dem Startpunkt auch den Endpunkt zu optimieren, wird die Intensität des E-MHP-Systems bei Erreichen der Zielkoordinaten auf 0% (keine elektrische Leistung) gestellt. Der Aktor wird folgend mit keiner elektrischen Energie versorgt und der Hammerkopf führt keine axial oszillierende Bewegung mehr aus. Dies führt dazu, dass bei einer reinen vertikalen Abfahrt des Hammersystems keine Mehrfacheinschläge auf der Werkstückoberfläche entstehen und somit die plastische Deformation vergleichbar zu den bereits erzeugten Umformschritten ist. Wird in die Bearbeitungspfade der in Abbildung 41 aufgenommenen Oberflächensegmente ein Profilschnitt in Bearbeitungsrichtung

gelegt, so ist es möglich, Rückschlüsse sowohl auf die Eindrucktiefe als auch über den Verlauf der Eindruckabstände zu ziehen. Eine Auswertung der Strukturtiefe (t_p) der einzelnen Bearbeitungsstrategien ist in Tabelle 13 gegenübergestellt. Δt_p beschreibt die Differenz der Strukturtiefe zur Referenzbearbeitung.

Strategie	Strukturtiefe Start t_p in mm	Δt_p in mm	Δt_p in %
Referenz	0,481	-	-
Strategie 1	0,454	0,03	5,6
Strategie 2	0,096	0,39	80,0
Strategie 3	0,102	0,38	78,8
Strategie 4	0,051	0,43	89,4

Tabelle 13: Messung der Eindrucktiefe t_p an der Startposition

Dabei ist analog zur Abbildung 41 deutlich die verbesserte Startbedingung bei den Strategien mit der angepassten Schlagintensität zu beobachten. Im Falle der Strategie 4 kann dieser Wert während der gesamten Bearbeitungsbahn nahezu konstant gehalten werden. Bezogen auf die Referenzbearbeitung wird somit eine Reduzierung der Eindrucktiefe bei Anwendung der Strategie 4 um rund 90% erreicht. Bei der Erzeugung von äquidistanten Schlagabständen zeigt auch die Strategie 4 deutlich die Potentiale, welche eine Anpassung der Hämmerfrequenz an die reale Vorschubgeschwindigkeit bietet.

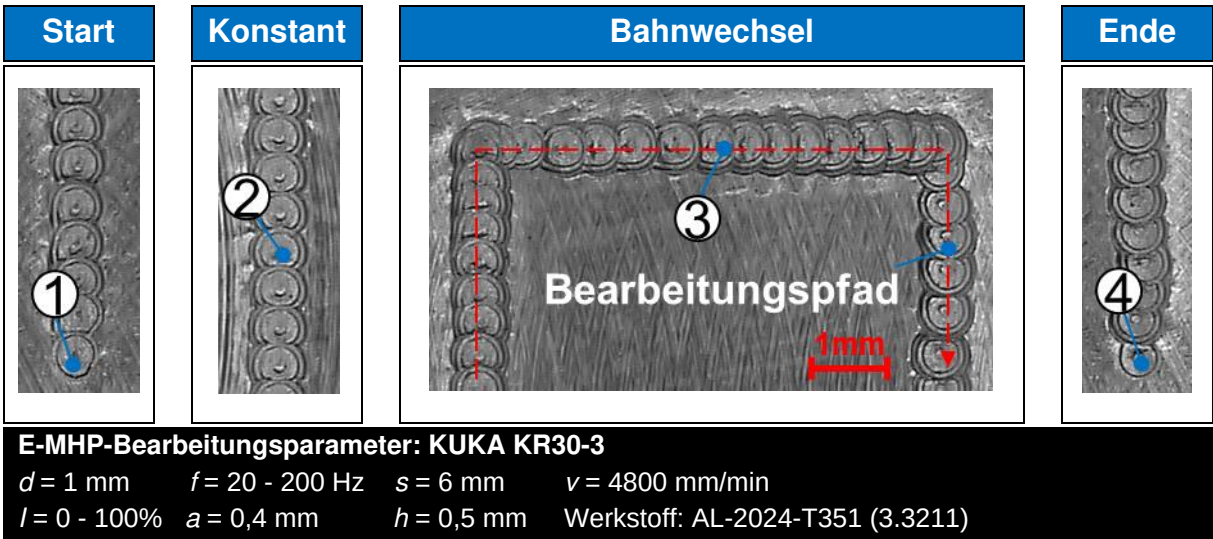


Abbildung 42: Ergebnis einer gesteuerten E-MHP-Bearbeitung am KUKA KR30-3 am Werkstoff Al-2024-T351 auf Basis des Verlaufs der Bahngeschwindigkeit aus Abbildung 39

Eine Auflichtmikroskopie-Aufnahme der Bearbeitungsstrategie 4 ist analog zur Darstellung der Referenzstrategie aus Abbildung 40 in Abbildung 42 zu sehen. Es ist hier deutlich das optimierte Bearbeitungsergebnis zu erkennen. Im Speziellen sind es die Start- und Endbereiche, welche einen gleichmäßig verteilten Schlagabstand aufweisen. Um den Effekt der Frequenzansteuerung deutlich hervorzuheben, sind in

Abbildung 43 zeigt zwei Profilschnitte der Referenzbearbeitung sowie der Strategie 4 dargestellt. Im Vergleich zur Referenzbearbeitung zeigt die Strategie 4 ein von Beginn an homogeneres Strukturmuster. Ab dem zweiten Einzeleindruck kann bedingt durch das Herabsetzen der Startfrequenz auf $f = 20$ Hz ein nahezu äquidistantes Eindrucks muster erzeugt werden. Hingegen wird bei der Referenzbearbeitung erst ab einer Distanz von rund 27,1 mm ein gleichmäßiger Schlagabstand erreicht. Neben dieser Ausprägung ist zudem der erste Einschlag an der Startposition der Bearbeitung deutlich zu erkennen. Aus diesen Erkenntnissen der 2D-Bearbeitung mit dem Ziel, eine möglichst gleichmäßige Strukturierung an der Oberfläche zu erzeugen, wird in weiterer Folge die Bearbeitung einer 3D-Kontur verfolgt. Bei dieser Bearbeitung liegt der Fokus auf einer optimierten Bearbeitung von Kantenbereichen. Die bei der 2D-Bearbeitung gezeigten Bearbeitungspotentiale werden nun auf die der zuvor erwähnten Profilform angewendet. Die in Abbildung 32 abgebildete Profilform einer Spline-interpolierten-Bahn dient als Ausgangssituation für die folgende MHP-Bearbeitung.

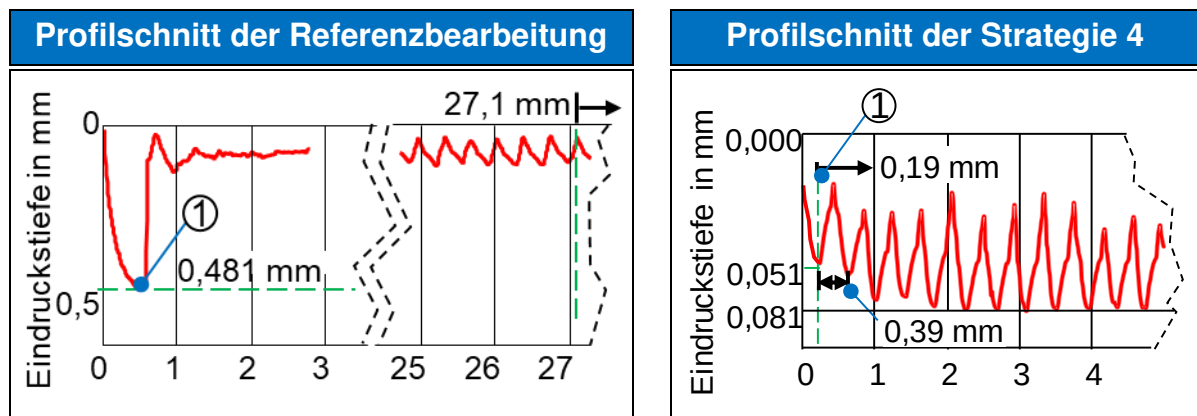


Abbildung 43: Vergleich der Profilschnitte der Referenz- und der optimierten Bearbeitung ab Start der Bearbeitung der Referenzstrategie aus Abbildung 41 (links) und der optimierten Bearbeitungsbahn (Strategie 4) aus Abbildung 41 (rechts)

Im Gegensatz zur Erzeugung von gezielten Einzeleindrücken zur Oberflächenstrukturierung liegt hier der Fokus primär auf der Glättung der Oberfläche und Erhaltung der Geometrieform der Kante. Zur Bearbeitung der Kante wurde ein Bearbeitungspfad mit konstantem Hub zur Werkstückkontur programmiert, um den Einfluss von Kantenschutzstrategien auszuklammern und um lediglich die Ansteuerungsmaßnahme beurteilen zu können. Die Bearbeitung der Kontur erfolgt aus den genannten Aspekten unter Verwendung einer konstanten Hämmerfrequenz und einer variablen Schlagintensität, welche an die Vorschubgeschwindigkeit angepasst ist. Das Ergebnis der MHP-Bearbeitung ist in Abbildung 44 im Vergleich zur Bearbeitung mit konstanter Schlagenergie am Fünf-Achs-BAZ vom Typ Hermle C20U und am Roboter dargestellt. Neben den beiden unterschiedlichen Maschinensystemen ist auch eine Variation der Vorschubgeschwindigkeit zwischen $v = 1200$ mm/min und 2400 mm/min vorgenommen worden. Wie bereits erwähnt, kommt es im Bereich der Kante aufgrund der Umorientierung des Hammerkopfes und der damit verbundenen

Minimierung der Vorschubgeschwindigkeit auf der Bearbeitungsbahn zu einer erhöhten plastischen Umformung (Abbildung 33). Werkzeugmaschine als auch Roboter liefern bei einer konstant eingestellten Intensität und der damit verbundenen Energie ein unzureichendes Bearbeitungsergebnis der Kante. Findet nun eine Anpassung der Schlagintensität des E-MHP-Systems in Abhängigkeit der real vorliegenden Vorschubgeschwindigkeit statt, so kann im Bereich der Kante die Energie reduziert werden, um letztendlich eine geringere geometrische Formabweichung vorzufinden. Betrachtet man nun das optimierte Ergebnis der Kantenbearbeitung in Abbildung 44 rechts, bei gesteuertem Schlagprozess und konstanter Hämmerfrequenz, so kann deutlich eine verbesserte Konturtreue erkannt werden.

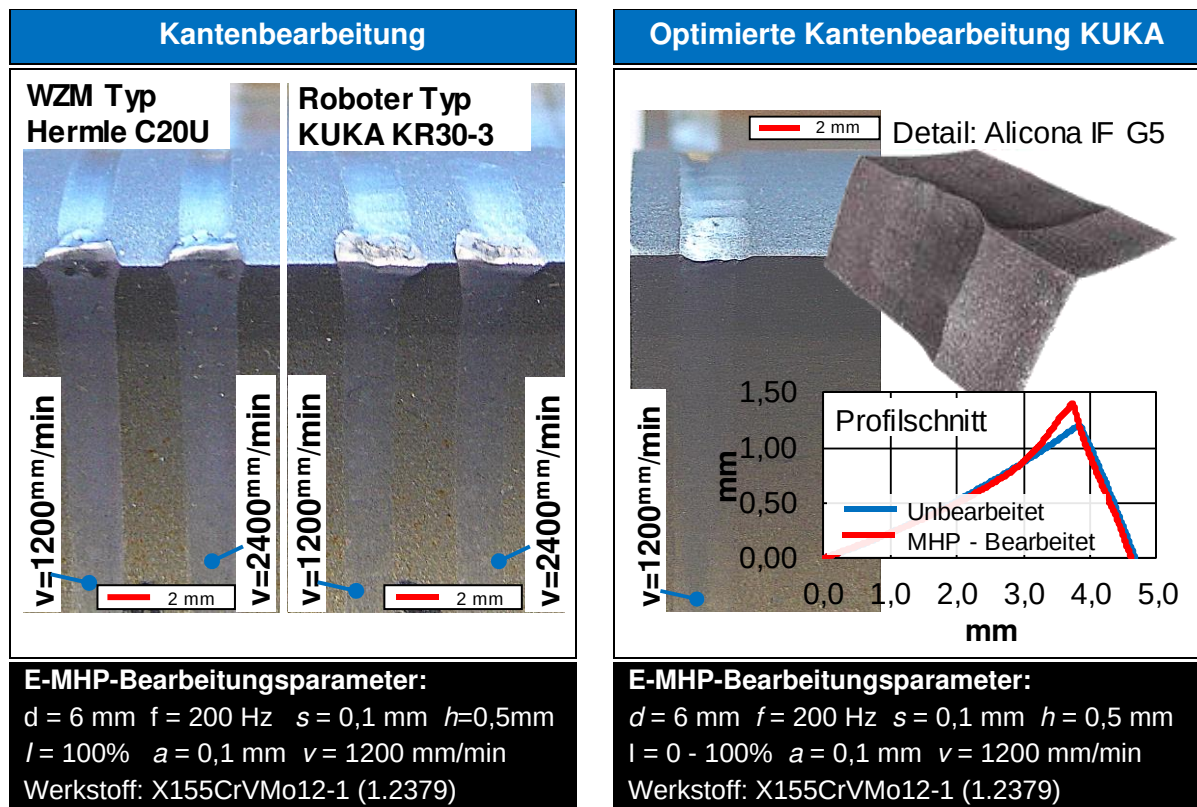


Abbildung 44: Optimierte Kantenbearbeitung mit dem E-MHP System, links: Gegenüberstellung der Kantenbearbeitung des sichelförmigen Bauteils aus Abbildung 33 durchgeführt am Roboter und der Werkzeugmaschine, rechts: gesteuerte Kantenbearbeitung des sichelförmigen Bauteils am Roboter

4.3 Modellbasierte Beschreibung

Neben der Beeinflussung des Bearbeitungsergebnisses durch das Maschinensystem nimmt zudem die Aktor-Technologie durch ihren Aufbau und dem zugrundeliegenden Wirkprinzip Einfluss auf die erzielbaren Oberflächeneffekte am bearbeiteten Werkstoff. Um den Einfluss des mechanischen Aufbaus der Aktorik auf das Bearbeitungsergebnis zu kennen, liegt in diesem Kapitel der Fokus auf der Energie-Dissipation durch die

eingesetzte Aktor-Technologie. Um den Einfluss des mechanischen Aufbaues der Aktorik auf die Umformarbeit zu bestimmen, wird ein modellbasierter Ansatz verfolgt.

Das Wirkprinzip der Aktor-Technologie nimmt maßgeblich Einfluss auf das erzielbare Bearbeitungsergebnis. Es wird der Einfluss des Aktors selbst näher analysiert, um den Prozess der Energieumwandlung während der Bearbeitung beschreiben zu können. In diesem Abschnitt erfolgte eine modellgestützte Betrachtung eines MHP-Prozesses mit dem Ziel, den Energieanteil zu beschreiben, welcher durch die Form der Aktorik aufgenommen wird und somit die plastische Umformarbeit im Werkstoff mindert.

4.3.1 Prozessmodell auf Basis der Energiebilanz

Die geforderte Schwellenenergie E_T , welche in [66] beschrieben ist, um eine elastische und plastische Formänderungsarbeit durch den MHP-Prozess zu erreichen, bezieht neben den werkstoffspezifischen Einflussgrößen wie etwa dem Umformgrad φ_r auch geometrischen Größen wie etwa den Radius des Indenters r_i mit ein. Diese Schwellenenergie E_T muss von einem Aktorsystem bereitgestellt werden und wird in weiterer Folge als E_{k0} (Energie vor dem Auftreffen auf die Werkstückoberfläche) bezeichnet. Wird nun eine zu große Energie der Werkstückoberfläche zugeführt, so kann es zu einer Rissbildung an der Oberfläche des bearbeitenden Werkstoffes kommen [6]. In [24] findet eine genaue Beschreibung des elektrodynamischen Aktorsystems und der dabei verfügbaren Energiegrößen statt. Bei dieser Betrachtung wird jedoch von einem optimalen geometrischen und nicht deformierbaren Umformwerkzeug ausgegangen. Durch diese Annahme werden elastische Energieverluste durch das Aktorsystem während des Umformprozesses nicht berücksichtigt. Tatsächlich ist jedoch von einem Werkstoff des Werkzeuges auszugehen, welcher einen Anteil der Bewegungsenergie in elastische Formänderungsarbeit zulässt. Unabhängig von der eingesetzten MHP-Aktorik ist das Ziel, bei der MHP-Bearbeitung möglichst viel kinetische Energie des Werkzeuges in Umformarbeit im Werkstück umzuwandeln. Entsprechend der Energiebilanzierung für ein geschlossenes bewegtes System bleibt die Summe der Energien der Systeme konstant, lediglich der Energieanteil der Einzelsysteme verändert sich.

$$dU + dE_a = \delta Q + \delta W \quad (16)$$

mit: dU ... Innere Energie, dE_a ... Äußere Energie, δQ ... Wärme, δW ... Arbeit

Wird nun die Bewegungsenergie zu Beginn des Aufprallvorgangs entsprechend der Energieerhaltung weiter aufgeschlüsselt, so kann diese in eine Bewegungsenergie der Rückprallbewegung E_{k1} , in eine Umformarbeit im Werkzeug $E_{Innen-WZ}$, in eine Umformarbeit im Werkstück $E_{Innen-WS}$ sowie in Reib- und Dämpfungsarbeit $E_{\mu r}$, E_{Damp} weiter aufgeschlüsselt werden.

$$E_{k0} = E_{k1} + E_{Innen-WZ} + E_{Innen-WS} + E_{\mu r} + E_{Damp} \quad (17)$$

Für Umformwerkzeuge gilt, dass keine plastische Deformation im Werkzeug vorliegen soll und somit das Werkzeug lediglich elastische Deformation erfährt. Bei der vereinfachten Annahme, dass Reib- und Dämpfungsarbeit vernachlässigbar sind ($E_{\mu r}$, $E_{Damp} = 0$) und sich die Umformarbeit in einen elastischen (E_{el}) als auch in einen plastischen (E_{pl}) Teil im Werkstück aufschlüsseln lassen, kann die Formulierung der Bewegungsenergie vor dem Aufprall weiter vereinfacht werden zu:

$$E_{k0} = E_{k1} + E_{el-WZ} + E_{el-WS} + E_{pl-WS} \quad (18)$$

In dieser Aufstellung beschreibt nun E_{k1} die Bewegungsenergie beim Rückprall, E_{el-WS} die elastische Umformarbeit im Werkstück, E_{pl-WS} die plastische Umformarbeit im Werkstück und E_{el-WZ} den Energieanteil, welchen das Werkzeug durch elastische Formänderung aufnimmt. Um den Anteil der elastischen Formänderung zu beschreiben, erfolgt eine detaillierte Betrachtung unterschiedlicher Systeme unter Anwendung der FEM-Methode.

4.3.2 FEM-Modell der Energieumsetzung im Einzeleinschlag

Im Falle einer Hammerkopfspitze oder einer fallenden Kugel auf eine Stahlplatte wird äußere Energie dE_a in Form von kinetischer Bewegungsenergie dem System zugeführt und beim Auftreffen auf die Oberfläche in Wärme als auch in Umformarbeit umgewandelt. Um in weiterer Folge die Frage beantworten zu können, welchen Einfluss das System auf den Umformvorgang nimmt, wird ein explizites FEM-Simulationsmodell vorgestellt, welches einen Umformvorgang von drei unterschiedlichen Bearbeitungssystemen vergleicht. Da ein System herangezogen werden soll, welches möglichst geringe Energieverluste verursacht und somit einen idealen Umformvorgang abbildet, wird ein Falltest einer Kugel als Referenzwert definiert. Als Vergleich zu diesem kommt ein am Markt verfügbares Aktorsystem, welches auf Basis des elektrodynamischen Wirkprinzips arbeitet, zum Einsatz. Neben diesen beiden Systemen wird als zusätzlich betrachtetes System die Antriebseinheit einer neuen am IFT entwickelten MHP-Aktorik in die Simulation aufgenommen, welche in [33] angeführt ist und als Deterministic Impact Peening-MHP-System bezeichnet wird. Dieses System ist mittels einer Festkörperlagerung aus dem Werkstoff Ti-6Al-4V in axialer als auch in radialer Richtung geführt. Eine genaue Beschreibung des Systems ist im Stand der Technik unter Kapitel 2.3.1 gegeben. Die Lagerung dieses Systems im Anhang A ausführlich erläutert. Eine Übersicht zum Simulationsaufbau der drei unterschiedlichen Modelle ist in Abbildung 45 dargestellt. Wie in Abbildung 45 zu erkennen ist, unterscheiden sich die hier zu vergleichenden Systeme maßgeblich in ihrem Aufbau und ihrer Länge. So besteht zum Beispiel das Referenzsystem aus einer homogenen Kugel. Hingegen sind die beiden Vergleichssysteme aus unterschiedlichen Werkstoffen und Fügestellen aufgebaut. Um nun trotz dieser variierenden Systemaufbauten eine Vergleichbarkeit zu schaffen, werden die bewegten Massen aller drei gezeigten Systeme konstant mit $m = 0,2521 \text{ kg}$ definiert.

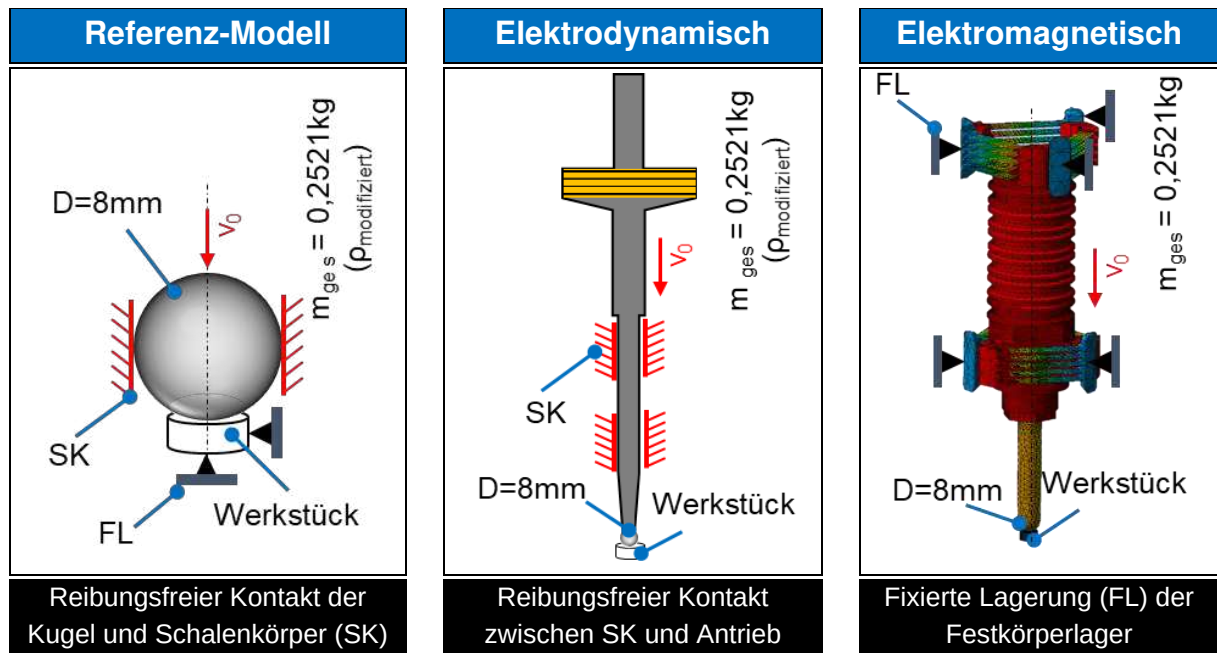


Abbildung 45: Modellaufbau der explizit transienten Energiesimulation, links: Kugel als Referenzmodell, mitte: Bewegungseinheit des E-MHP-System, rechts: Bewegungseinheit des elektromagnetischen Aktorsystem aus Kapitel 2.3.7

Im Falle der Referenzkugel wird die Dichte des Werkstoffes modifiziert. Die Referenzmasse wird aus dem DIP-MHP-Bearbeitungssystem abgeleitet, welches in Abbildung 45 rechts dargestellt ist. Als weitere Randbedingungen der Simulation werden folgende Annahmen getroffen.

- explizites Rechenverfahren mit reduziert linearer Integration (ANSYS WB)
- Anfangsgeschwindigkeit des Werkzeuges $v_0 = 1,45 \text{ m/s}$
- Abstand der Kugeloberfläche zum Werkstück $h = 0,01 \text{ mm}$
- Führung des MHP-Systems mittels Schalenkörper (SK)
- reibungsfreier Kontakt zwischen Schalenkörper und dem MHP-System
- Durchmesser der Kugel bzw. Halbkugel 8 mm (Werkzeug)
- Stößel- und Kugelwerkstoff Wolframcarbide (WC)
- viskoplastisches Materialmodell nach JOHNSON und COOK
- Bauteilvernetzung mittels Hexaederelementen vom Typ Solid 185 8DR3
- Werkstückwerkstoff 40NiCrMo6 (1.6944)

Das Target, ein zylindrischer Körper mit den Abmessungen $6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, ist mit einem Abstand zur Hammerkopfspitze bzw. zur Kugel von $10 \text{ }\mu\text{m}$ platziert und ist für alle drei untersuchten Systeme gleich definiert. Als Werkstoff wurde Vergütungsstahl 40NiCrMo6 gewählt, welcher eine hohe Neigung zur Kaltverfestigung zeigt und nach WINTER [96] eine hohe Rückfederung aufweist. Somit rückt die Aufnahme der Energie durch das MHP-Werkzeug noch mehr in den Fokus. Beim Auftreffen der Kugel oder der Hammerkopfspitze auf die Werkstückoberfläche wird dem bewegten System

Bewegungsenergie zugeführt und in Verformungsenergie im Werkstück als auch im Werkzeug umgewandelt. Da in diesem Fall eine Vergleichbarkeit der Systeme im Vordergrund steht und die durch die Struktur aufgenommene Energie festgestellt werden soll, wird entgegen veröffentlichter Studien – wie etwa in [91] – der Hammerkopf nicht als Starrkörper angenommen. Die Kontaktbedingung zwischen dem Hammerkopf und dem Target ist als reibungsfrei und mittels des in ANSYS Workbench 19.1 implementierten Kontaktalgorithmus „Penalty“ definiert. Zur Berechnung des Energieeintrages in die Werkstoffoberfläche findet ein explizites Rechenverfahren Anwendung. Neben den in Abbildung 45 vorgestellten Randbedingungen zur Lagerung der Systeme beeinflussen insbesondere die in Abbildung 46 beschriebenen Eigenschaften des Kontaktbereiches das Ergebnis der Umformsimulation. Darin ist auf Basis der Referenzkugel der Kontaktbereich der Umformsimulation in der Ausgangsstellung abgebildet. Beim MHP-Prozess handelt es sich um einen Umformprozess, welcher lokal am Werkstück eine elastisch-plastische Deformation erwirkt, welche bei hohen Dehnraten durchgeführt wird. Aus diesem Grund ist es notwendig, ein geeignetes Materialmodell anzuwenden, um die Energieeinträge im Werkstoff abschätzen zu können. Die Bestimmung der eingebrachten inneren Energien erfolgt mit dem Ansatz nach JOHNSON und COOK zur Beschreibung des Materialverhaltens duktiler Werkstoffe. Die für das thermo-mechanische Materialverhalten benötigten Modellparameter (A , B , C , n , m), wie sie in der Abbildung 46 und Gleichung 19 dargestellt sind, sind aus der ANSYS Werkstoffbibliothek für den Vergütungsstahl 40NiCrMo6 (1.6944) entnommen.

A (N/mm ²)	B (N/mm ²)	C	n	m	E (/s)	T (C°)
792	510	0,014	0,26	1,03	1	1520

Tabelle 14: Johnson-Cook-Parameter für den Werkstoff 1.6944 nach ANSYS WB

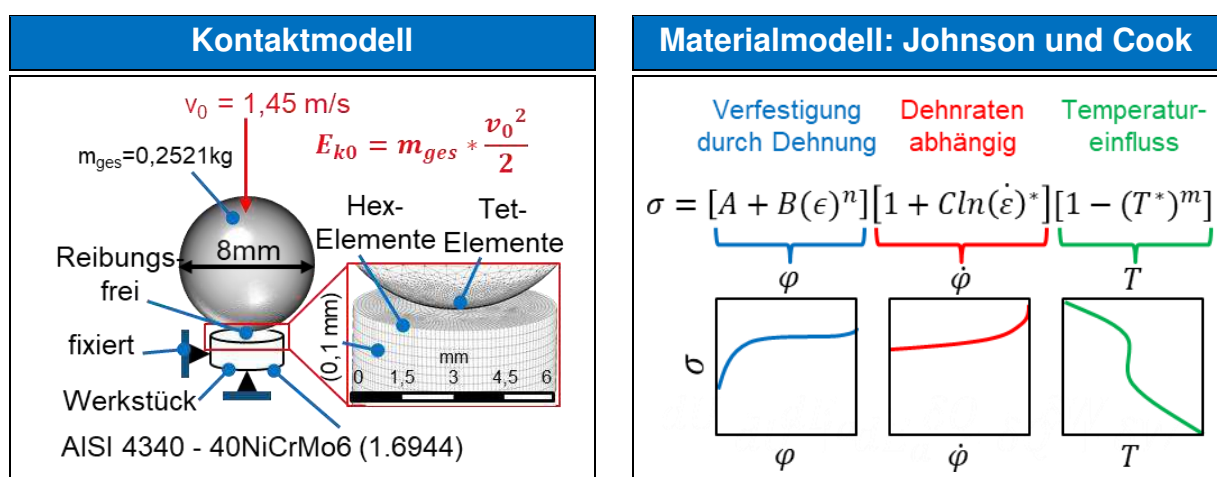


Abbildung 46: Kontaktmodell und Materialmodell der Simulation, links: schematische Darstellung der Kontaktmodellierung, rechts: Materialmodell nach Johnson und Cook

$$\sigma = [A + B(\epsilon)^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon})^*][1 - (T^*)^m] \quad (19)$$

Diese in dem Materialmodell verwendeten Parameter nehmen Einfluss auf die Fließspannung σ in Abhängigkeit der Dehnung φ , der Dehnrates $\dot{\varphi}$ als auch der Temperatur T . Der Parameter A beschreibt in dem Fall die Streckgrenze, B und n beschreiben den Verfestigungsmodul und den Verfestigungsexponenten und C und m sind weitere Konstanten, welche die Fließspannung in Abhängigkeit von der Dehnrates sowie der Temperatur beschreiben [98]. Die Referenzdehnung wird durch den Parameter ε beschrieben. Thermische Einflüsse sind in dieser Modellbeschreibung zu vernachlässigen, da das Umformen durch die MHP-Bearbeitung gleich dem Prozess des Kugelstrahlens als Kaltschmiede-Prozess beschrieben werden kann [99]. In Abbildung 47 ist für eine explizite Umformsimulation, gleich dem Referenzfalltest, die Energieübersicht aufgestellt. Daraus geht hervor, dass sich die Gesamtenergie aus einem kinetischen, einem inneren Energieanteil sowie der Kontaktenergie und aus der Hourglassenergie zusammensetzt. Die Hourglassenergie beschreibt dabei die Energie, welche durch den expliziten Solver aufgewendet werden muss, um das Phänomen Hourglassing zu dämpfen. Unter Hourglassing versteht man eine physikalisch undefinierte Verschiebung der Vernetzungselemente, bei denen ein Einzelelement so deformiert wird, dass die Differenzen gleich bleiben und daher keine Dehnungsänderung am Element feststellbar ist [97].

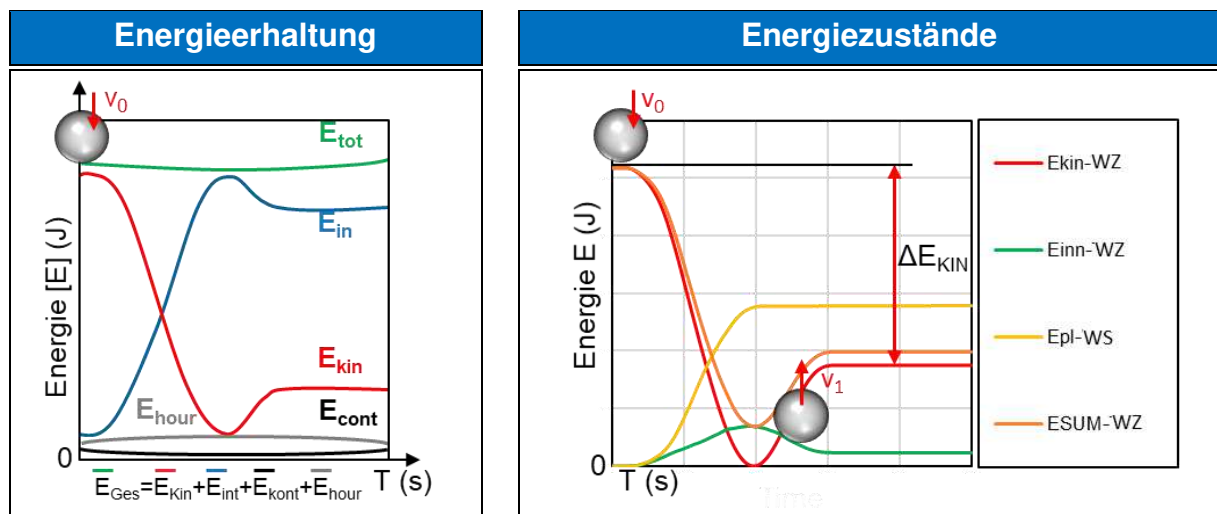


Abbildung 47: Transiente Energiedarstellung während des Aufpralls, links: Energieübersicht aus den Lösungsinformationen aus ANSYS WB nach der Umformung, rechts: zugeordnete Einzelenergien im Werkstück und Werkzeug

Bei der expliziten Dynamik gibt es nur die reduzierte Integrationsmethode, welche bedingt durch den Solver (Autotyp-Solver) vorliegt. Dementsprechend ist auch immer die Hourglass-Kontrolle in den Analysis Settings zu beachten. Diese Übersicht kann über die Lösungsinformationen der Simulation in ANSYS abgerufen werden. Als Faustregel ist anzumerken, dass der Anteil der Hourglassenergie nicht über 5 % der Summenenergie betragen soll, wie in [97] empfohlen wird. Entsprechend der Energieübersicht in Abbildung 47 links sind auf der rechten Seite die Teilenergiezustände aufgestellt. Der Aufprallvorgang ist dabei grundsätzlich in drei

Bereiche zu unterteilen: Vor dem Kontakt, der Kontaktvorgang an sich und der Rückprallvorgang. Dieser Ablauf ist anhand des Verlaufes der kinetischen Energie des Werkzeuges $E_{kin-WKZ}$ sehr gut erkennbar. So haben am Umkehrpunkt der Bewegungsrichtung der Kugel (Rückprallvorgang) die geleistete plastische Umformarbeit im Werkstück sowie die innere Energie im Werkzeug ihr Maximum erreicht. Nach der Restitutionsphase stellt sich im Werkstück und im Werkzeug wieder ein konstanter Zustand ein, welcher im Fall des Werkstückes über die plastische Deformation und im Werkzeug aus der Summe der kinetischen Energie und der elastischen Formänderungsarbeit zusammengesetzt werden kann. Es ist davon auszugehen, dass die kinetische Energie im Werkstück als auch die plastische Formänderungsarbeit im Werkstück inklusive Reibungs- und Dämpfungsenergien als vernachlässigbar anzusehen sind. Somit ist festzuhalten, dass der elastische Anteil im Werkzeug die ins Werkstück eingebrachte Energie und somit auch die Effizienz des Umformvorganges mindert.

4.3.3 Ergebnis der Simulation zur Energiebeschreibung

Betrachtet man nun das Ergebnis der Simulation, so kann in Abbildung 48 links festgestellt werden, dass die darin dargestellte kinetische Energie der drei Systeme einen unterschiedlichen Endwert nach der Rückfederung annehmen. Es ist zu erkennen, dass sich die Kontaktphase aller drei Systeme in einer Verlaufsänderung der kinetischen Energie zeigt.

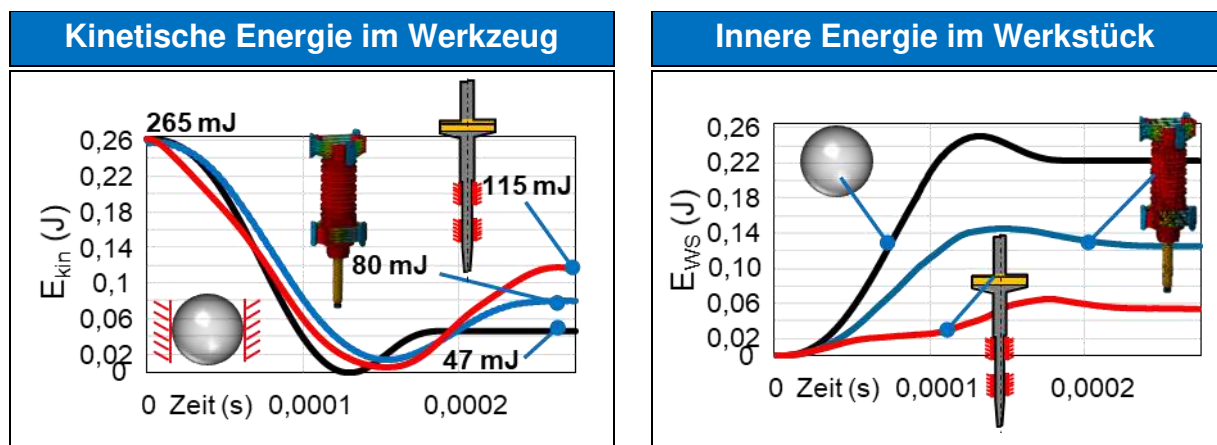


Abbildung 48: Ergebnis der transienten Verläufe der kinetischen und der inneren Energien im Werkstück, links: Verlauf der kinetischen Energie des Umformwerkzeuges, rechts: Verlauf der inneren Energie im Werkstück bei Umformung

So ist für die Referenzkugel eine leicht steilere Funktion der kinetischen Energie hin zum Umkehrpunkt als beide untersuchten MHP-Systeme zu erkennen. Die vorhin angesprochene Unterscheidung der kinetischen Energien nach der Umformung macht bereits deutlich, dass die Referenzkugel den größten Teil ihrer Anfangsenergie in Formänderungsarbeit umwandelt. Betrachtet man nun die ins Werkstück eingebrachte innere Energie (Abbildung 49 rechts), so bestätigt sich hier diese Annahme. Die

Kurvenverläufe weisen im Zeitpunkt der Bewegungsumkehrung ein Maximum an innerer Energie auf und sinken hin zu einem konstanten Wert, welcher die ins Werkstück eingebrachte Energie darstellt, die hauptsächlich die plastische Deformation repräsentiert. Wie bereits erwähnt, zeigt auch hier die Referenzkugel mit den höchsten Wert, gefolgt von dem DIP-MHP-System. Dieses Systemverhalten ist einerseits dem kompakten Aufbau und der Masseverteilung des DIP-Aktors geschuldet, sowie andererseits durch die eingesetzte Festkörperlagerung, welche im Anhang A genauer beschrieben ist. Unter der getroffenen Annahme, dass keine plastische Umformung im Werkzeug vorliegt, das System reibungsfrei arbeitet und die Dämpfungsmechanismen im Werkstoff vernachlässigbar sind, ist die durch das Werkzeug dissipierte Energie aus den in Abbildung 47 dargestellten Kurvenverläufen bestimmbar, welche als Ergebnis der Simulation abrufbar sind.

$$E_{\text{innen-WZ}} = E_{\text{kin}(t_0)} - E_{\text{kin}(t_1)} - E_{\text{innen-WS}(t_1)} \quad (20)$$

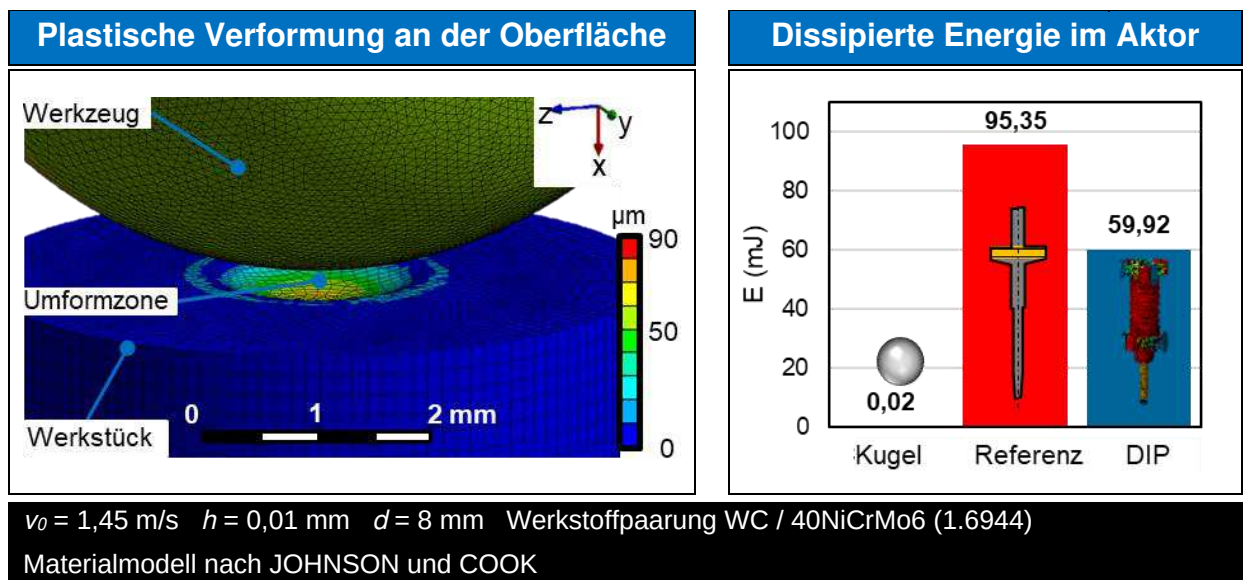


Abbildung 49: Aufgenommenen Arbeit durch das Werkzeug, links: Darstellung der plastisch verformten Oberfläche mit der farblichen Zuordnung gemäß der Skala als Ergebnis der Simulation aus ANSYS WB, rechts: dissipierte Energie durch die Umformwerkzeuge

Die Ergebnisse der bestimmten Energiewerte sind zusammen mit einer Darstellung des Umformbereichs nach der Bearbeitung in Abbildung 49 zu sehen. Unter der Annahme, dass keine plastische Umformung in den drei Systemen stattgefunden hat, repräsentieren diese dargestellten Werte der Energie die elastische Formänderungsarbeit im Werkzeug. Aus diesen Ergebnissen ist der Einfluss der Systeme auf den Umformvorgang zu erkennen. Dabei nimmt das elektrodynamische Aktorsystem die meiste Energie in sich auf und mindert somit die Umformung im Werkstück. Dies ist unter anderem den Werkstoffeigenschaften der Aktorsysteme und vor allem dem – im Vergleich zur Kugel – langen, schlanken Aufbau geschuldet. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse ist es nun möglich, ein Geschwindigkeitsäquivalent zu bestimmen, welches die Vorgabegeschwindigkeit des Läufers vor dem Auftreffen auf

der Werkstoffoberfläche beschreibt. Diese kann aus der äquivalenten Energie berechnet werden, welche sich folgendermaßen zusammensetzt:

$$E_{\text{äqu}} = E_{\text{kin}(t_0)} + E_{\text{innen-WZ}} \quad (21)$$

Das sich daraus ergebende Energieäquivalent und das Geschwindigkeitsäquivalent sind in Tabelle 15 dargestellt. Der in den Klammern dargestellte Bereich beschreibt den zusätzlichen Betrag der jeweiligen Größe, welche durch das Aktorsystem im Vergleich zur Referenzkugel aufgebracht werden muss, um einen vergleichbaren Energieeintrag in den Werkstoff einzubringen.

Bezeichnung	Energie [$E_{\text{äqu}}$] (J)	Geschwindigkeit [v_{neu}] (m/s)
Ref. Kugel	265,0	1,45
Ref. MHP-System	360,4 (+95,35)	1,69 (+0,24)
DIP-System	325 (+65)	1,61 (+0,19)

Tabelle 15: Äquivalente Energiegrößen auf Basis der Simulationsergebnisse

Aus den gezeigten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass der Aufbau der Struktur der Aktorik einen erheblichen Einfluss auf die Umformung auf der Werkstückoberfläche nimmt. Lange schlanke Aktorsysteme wandeln einen größeren Teil der Energie in elastische Formänderungsarbeit um als kleine kompaktere Systeme. Ähnlich zweier belasteter Federn aus gleichem Werkstoff und Querschnittsfläche ist die Federenergie der längeren Feder geringer als jene der kürzeren (siehe Gleichung 22).

$$W_{\text{Feder}} = \int_0^x k dx = \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} \frac{EA}{L} x^2 \quad (22)$$

Die Ergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse aus der FEM-Simulation zeigen, dass der Aufbau der MHP-Aktorik einen erheblichen Einfluss auf die Energieeinbringung in den Werkstoff nimmt. Für eine Erreichung einer maximalen Umformenergie des Aktors (Verhältnis aus Dynamik und Massenverteilung des beweglichen Stößels) ist einerseits eine geometrische Optimierung des dynamischen Systems (Läufer, Stößel, Lagerung) erforderlich um eine optimierte Massenverteilung zu erreichen und andererseits ist jedoch auch die Manipulationsfähigkeit des Aktors in einem Maschinensystem zu berücksichtigen (Masse und Abmessungen). Aus diesem Grund ist eine optimierte Formgebung (Proportionalität zwischen Länge/Durchmesser und Dynamik/Einschlagenergie) zu wählen. Diese Überlegungen wurden bei der Auslegung der Antriebseinheit des DIP-Aktors berücksichtigt welcher in dieser Arbeit im Kapitel 2.3.7 gezeigt wird sowie ist in Anhang A die Antriebseinheit dargestellt.

4.4 Einfluss des Werkstück-Werkstoff

Der Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher mechanischer Systeme auf die Wirkgrößen bei der MHP-Bearbeitung ist Inhalt von [16]. In dieser Untersuchung wird jedoch ein Vergleich der eingesetzten Hammersysteme auf einen definierten Almenteststreifen durchgeführt, um Glättung, Kaltverfestigung und Eigenspannungszustand zu bewerten. Im Zuge dieser Untersuchung liegt der Fokus auf dem Bearbeitungsergebnis in Abhängigkeit des zu bearbeitenden Werkstoffes unter Anwendung von festgelegten Bearbeitungsparametern. Zudem werden die Eigenschaften von zwei am Markt verfügbaren MHP-Systemen (Kapitel 2.3) miteinander verglichen, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Systemaufbauten auf das Bearbeitungsergebnis beschreiben zu können.

Zunächst wird über den Ansatz der experimentellen Untersuchungsmethodik der Einfluss der Aktorik auf das Bearbeitungsergebnis näher betrachtet. Diese beiden Systeme werden zudem hinsichtlich ihrer Fähigkeiten zur Glättung von Werkstoffoberflächen und zur Steigerung der Oberflächenhärte mittels eines Parameterversuches an ausgewählten Werkstoffen miteinander verglichen. Die Eigenschaften beider untersuchten MHP-Systeme werden in Tabelle 16 zusammengefasst.

Bezeichnung	E-MHP	P-MHP
Hersteller	accurapuls	3S-Engineering
Herstellerbezeichnung	Typ 1600	FORGEfix Air
Wirkprinzip	Tauchspule	pneumatisch
Frequenzbereich [f] (Hz)	20 - 500	100 - 300
Hub [h] (mm)	0,1 - 1,5	-
Masse des Aktors [m] (kg)	> 6	< 1
mech. Schnittstelle	SK40 montiert	DIN 1835B Ø20 mm

Tabelle 16: Systemvergleich der beiden eingesetzten Systeme

Auf Basis einer festgelegten Parameterstudie werden systematisch einstellbare Prozessparameter und deren Auswirkungen auf eine optimierte Oberflächenbearbeitung ausgewählter Werkstoffe untersucht. Alle Versuche wurden auf den aufgelisteten Werkstoffen aus Tabelle 17 durchgeführt. Hierbei handelt es sich um Stahl und Aluminiumlegierungen. Im Falle des E-MHP-Systems kann die Hämmerfrequenz direkt über ein Handeingabegerät vorgegeben werden. Hingegen stellt sich diese beim P-MHP-System über den Luftdruck und die verbaute Schlageinheit ein. Eine genaue Funktion der Hämmerfrequenz des P-MHP-Aktors mit den beiden unterschiedlichen Schlageinheiten konnte durch Messung des Schlagimpulses auf einer Kraftmesszelle ermittelt werden.

DIN-Nummer	Bezeichnung	Werkstoffgruppe	Zustand
1.4313	X3CrNiMo13-4	weichmartensitischer CrNi St.	Lieferzustand
1.2343	X38CrMoV 5-1	Warmarbeitsstahl	
1.2340	X35CrMoV 5-1 (E38K)	Warmarbeitsstahl	
1.2379	X155CrVMo12 1	Kaltarbeitsstahl	
1.7225	42CrMo4	Vergütungsstahl	
1.7225	42CrMo4	Vergütungsstahl	Q+T (R _m 1000-1100 MPa)
3.3211	AL-2024	AlMgSi Knetlegierung	T351

Tabelle 17: Überblick über die bearbeiteten Stahl- und Aluminiumwerkstoffe

Unter Anwendung der Fast-Fourier-Transformation kann das gemessene Zeitsignal der Messaufnahme in den Frequenzbereich übergeführt werden, wodurch der mögliche Frequenzbereich des P-MHP-Systems über den Versorgungsdruck sowie die resultierende Kontaktkraft als Funktion darstellbar ist. Folgend ist der nutzbare Frequenzbereich des Schlagmechanismus in Abhängigkeit des Systemdrucks für den Standarddruckverteiler (SP) als auch für den Hochdruckverteiler (HP) als Funktion in Abbildung 50 für zwei unterschiedliche Werkstoffe dargestellt.

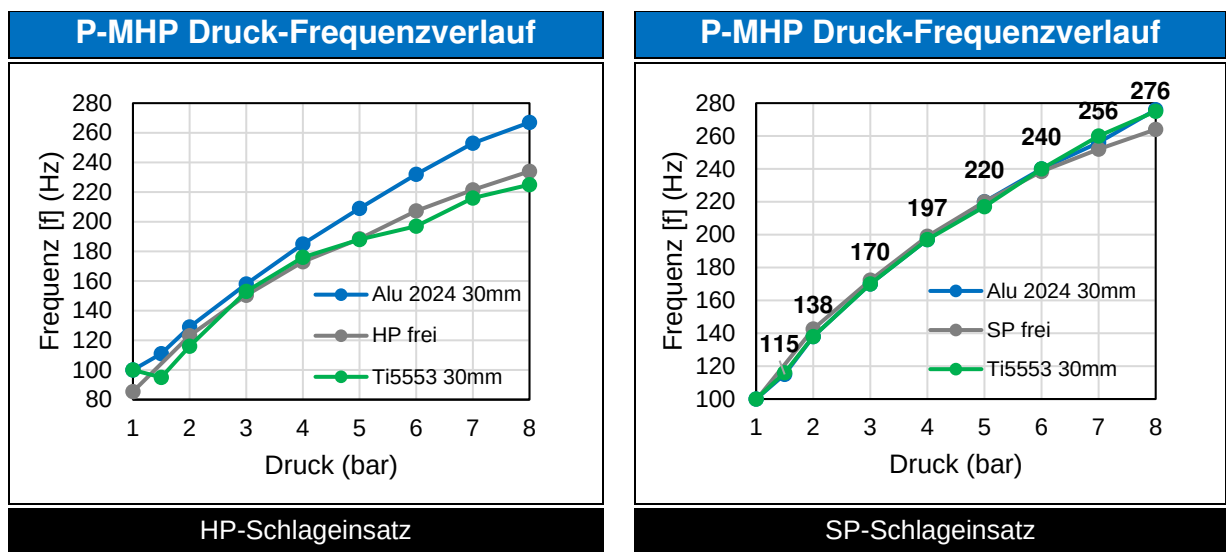


Abbildung 50: Hämmerfrequenz des pneumatischen MHP-System FORGEfix (Air) mit unterschiedlichen Druckverteilern, links: „high-pressure“ Schlageinsatz, rechts: „low-pressure“ Schlageinsatz

Das P-MHP-System wurde für diese Untersuchungen mit einem $d = 12$ mm Hammerkopf ausgestattet. Durchgeführt wurden die Messungen an dem BAZ Haas VF3. Es zeigt sich, dass im Speziellen die dominante Hämmerfrequenz beim HP-Schlageinsatz von dem zu bearbeitenden Werkstoff abhängt und im oberen Druckbereich streut. Diese Eigenschaft wird durch die Wirkungsweise des HP-Schlageinsatzes bestimmt, welcher in Kapitel 2.3 beschrieben ist. Im Gegensatz zum SP-Schlageinsatz, welcher unabhängig vom Werkstoff eine nahezu konstante Hämmerfrequenz realisieren kann, liegen die Frequenzwerte des HP-Schlageinsatzes

bei gleichem Versorgungsdruck darunter. Aus diesem Frequenz-Druckverlauf ist die höhere Hämmerfrequenz des SP-Einsatzes ersichtlich. Diese Ausprägung kann neben den geänderten Anströmungsbedingungen der geringeren Masse des oszillierenden Kolbens zugeschrieben werden. Auch der unterschiedliche Aufbau der Schlageinsätze bringt eine Unterscheidung in den resultierenden Kontaktkräften. Das Ergebnis der Kontaktkraftmessung unter Anwendung eines Dynamometers vom Typ Kistler 9129AA ist in Abbildung 51 dargestellt.

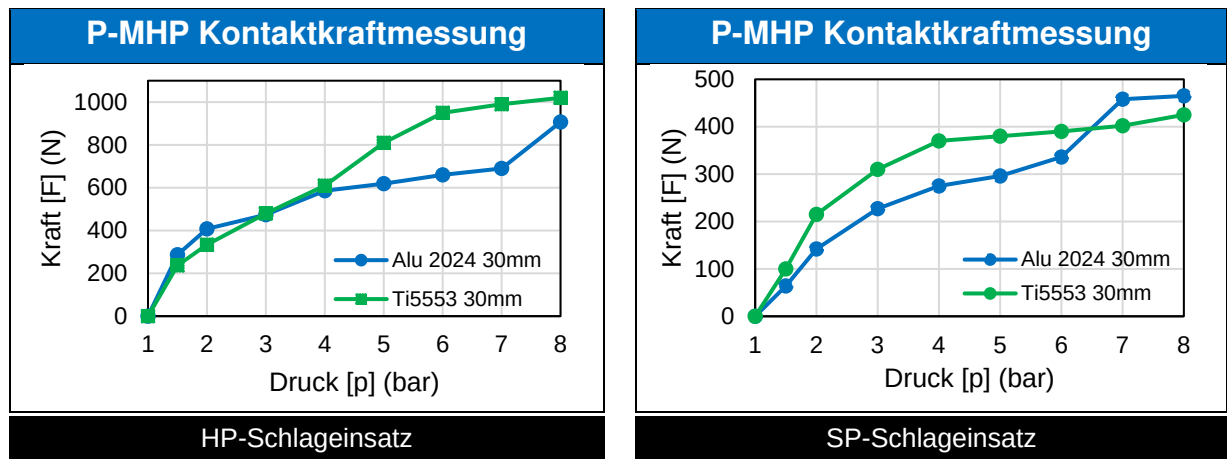


Abbildung 51: Kontaktkraftmessung des pneumatischen MHP-Systems FORGEfix (Air) mit unterschiedlichen Druckverteilern, links: „high-pressure“ Schlageinsatz, rechts: „low-pressure“ Schlageinsatz

Analog dem Frequenzverhalten zeigt sich auch hier, dass die Kontaktkräfte bei Einsatz des SP-Schlageinsatzes einen homogenen Verlauf bei allen untersuchten Werkstoffen aufweisen. Neben dieser Ausprägung liegen auch die resultierenden Kontaktkräfte unter jenen mit eingesetzten HP-Druckverteilern. Die entsprechende Messkette zur Bestimmung der Frequenz als auch der Kontaktkraft ist in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Bezeichnung	Typ	Messgröße
Drei-Achs-Dynamometer	Kistler 9129AA	Kraft
Datenverarbeitung	LabView 2010	-

Tabelle 18: Messkette zur Bestimmung der Eigenschaften der P-MHP Aktorik

4.4.1 Versuchsbeschreibung und Auswertung

Um die beschriebenen Effekte der Bearbeitung bewerten zu können, erfolgte die Bearbeitung von Stahl und Aluminiumlegierungen unter Anwendung des elektrodynamischen Aktorsystems der Firma accurapuls sowie des pneumatischen Aktors der Firma 3S-Engineering. Die Aufbereitung und Interpretation der erarbeiteten Versuchsergebnisse wurde unter Berücksichtigung der Haupteinflussfaktoren und der statistischen Signifikanz durchgeführt. Die statistische Untersuchung auf Signifikanz dient dem Zweck, jene Parameter mit starkem

(signifikanten) Effekt auf die Oberflächenrauheit (R_z , R_a) sowie den Einfluss von Wechselwirkungen zwischen den Versuchsparametern hervorzuheben.

4.4.2 Versuchsdurchführung

Im Verlauf der Versuche erfolgte eine detaillierte Betrachtung der Prozessparameter Hub h , Kugeldurchmesser d , Vorschubgeschwindigkeit v und der Ausgangsrauheit R_z in μm . Um den Einfluss einer variierenden Vorbearbeitung auf das Bearbeitungsergebnis zu analysieren, wurde zudem im Zuge der Untersuchungen ein Vergleich des MHP-Behandlungsergebnisses auf unterschiedlich vorbearbeiteten Flächen (die Ausgangsrauheit variiert in drei Stufen) durchgeführt. Für die Wahl der Bearbeitungsparameter des E-MHP-Systems ist der Bahnabstand s sowie der durch die Frequenz f und Vorschubgeschwindigkeit v vorzugebene Eindruckabstand a jeweils gleich gewählt. Somit resultiert daraus eine homogene Oberflächenbearbeitung (Matrixbearbeitung: $s = a$). Im Zuge aller durchgeführten Versuche wurde dabei eine orthogonale Ausrichtung des Werkzeugs auf die Bauteiloberfläche gewählt, welche gemäß der Terminologie des maschinellen Oberflächenhämmerns über den Auftreffwinkel $\beta_i = 0^\circ$ beschrieben ist (siehe Kapitel 2.4). Für die Hauptuntersuchungen sind aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe Bearbeitungsparameter gewählt worden, welche einen stabilen Bearbeitungsprozess gewährleisten.

MHP - Parameter	Min		Max	
Hub h (mm) / Schlageinsatz	0,3 (SP)		0,7 (HP)	
Frequenz E-MHP-System f (Hz)	200			
Luftdruck P-MHP-System p (bar)	8			
Bahnabstand s (mm)	0,1		0,3	
Vorschub v (mm/min)	1200		3600	
Kugeldurchmesser d (mm)	6		12	
Ausgangsrauheit Rz (µm)	15	25	50	

Tabelle 19: Festgelegte Bearbeitungsparameter der MHP-Bearbeitung

So wird als Versorgungsdruck für das pneumatische System ein Wert von $p = 8$ bar verwendet. Dadurch unterscheiden sich zwar die Hämmerfrequenzen der beiden Systeme, doch kann dadurch ein stabiler Bearbeitungsprozess gewährleistet werden. Für das elektrodynamische als auch für das pneumatische Aktorsystem sind die gewählten Bearbeitungsparameter wie z.B. Frequenz und Werkzeugdurchmesser in Tabelle 19 zusammengefasst.

Aus dieser Parametervariation bei einer vollfaktoriellen Untersuchung ergeben sich 24 Messfelder pro Werkstoff und MHP-Technologie. Diese 24 Bearbeitungsfelder teilen sich auf drei Flächenbereiche mit unterschiedlicher Ausgangsrauheit auf. Die Erzeugung einer definierten Ausgangsrauheit der Werkstoffoberfläche erfolgt über

einen angestellten Einzahn-Planfräser mit definierter Drehzahl n und einer festgelegten Vorschubgeschwindigkeit v , um ein gezieltes Nachschneiden des Fräskopfes zu vermeiden. Durch diese Konfiguration kann ein deterministisches Rauheitsprofil erstellt werden, welches mit einem taktilen Rauheitsmessgerät spezifiziert wurde. In Abbildung 52 ist symbolhaft eine Werkstoffprobe mit den 24 Einzelbearbeitungsfeldern und den drei Flächenbereichen mit unterschiedlicher Ausgangsrauheit zu sehen, welche mit den links angeführten MHP-Systemen bearbeitet wurden.

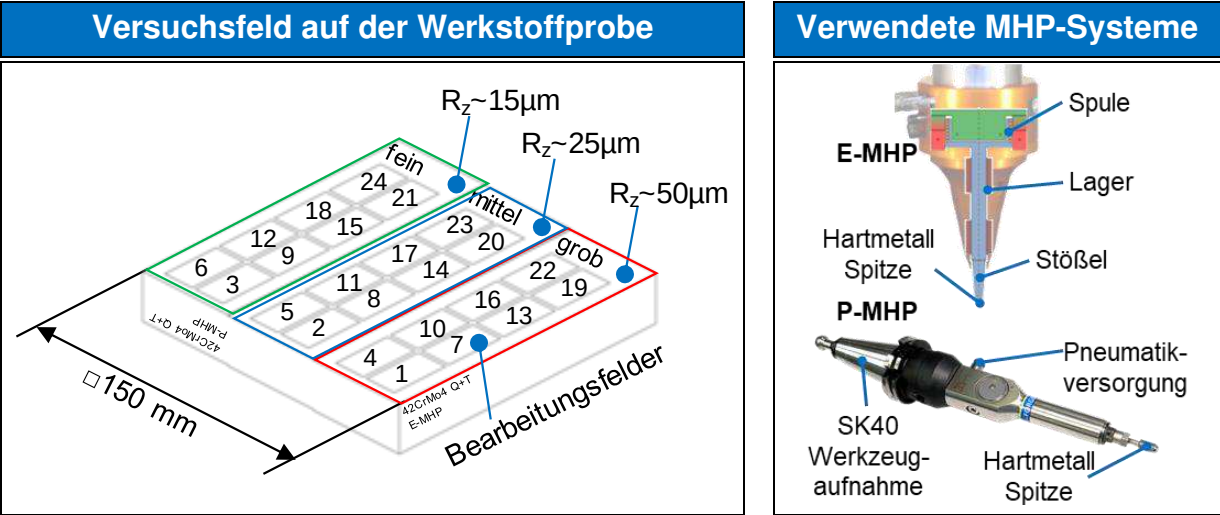


Abbildung 52: Versuchsfelder und Systemübersicht der Parameterstudie, links: Übersicht über die Bearbeitungsfelder mit den zugehörigen Versuchsnummern, rechts: eingesetzte MHP-Systeme

Eine Variation des Hubs h ist bei der Anwendung des pneumatischen Aktors nicht möglich, da es sich hierbei um ein System mit kontinuierlichen Kontaktverhältnissen zwischen Werkstück und Werkzeug handelt. In diesem Fall fand eine Variation des Schlagmechanismus statt. Dabei wurde zwischen Standardschlageinheit (SP) und Hochdruckeinheit (HP) gewechselt. Eine Auswertung zur Bestimmung der Oberflächenrauheit sowie der Härtesteigerung der einzelnen Messfelder erfolgte vor und nach der Bearbeitung.

Bearbeitungsparameter																								
Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
d	12												6											
v	1200			3600			1200			3600			1200			3600			1200			3600		
s	0,1			0,3			0,1			0,3			0,1			0,3			0,1			0,3		
h	0,3 / HP						0,7 / SP						0,3 / HP						0,7 / SP					
Rz	g	m	f	g	m	f	g	m	f	g	m	f	g	m	f	g	m	f	g	m	f	g	m	f
Rz... Oberflächenrauheitswert (g...grob = 50 µm, m...mittel = 25 µm, f...fein = 15 µm)																								
d in mm; v in mm/min; s in mm; h in mm																								

Tabelle 20: Parametersätze der MHP-Bearbeitung zur Werkstoffuntersuchung

Die genauen Bearbeitungsparameter für die Versuchsdurchführung mit den ausgewählten Aktorsystemen sind in Tabelle 20 zusammengefasst. Der Eindruckabstand a in mm variierte in Folge der beiden unterschiedlichen Systemprinzipien. Dies resultierte im Falle des Standard-Druckverteiler (SP) in einem Eindruckabstand von $a = 0,072$ mm bei $v = 1200$ mm/min und $a = 0,217$ mm bei $v = 3600$ mm/min ($f = 276$ Hz). Bei dem Hochdruckverteiler (HP) und ebenfalls 8 bar Systemdruck lag der Eindruckabstand bei $a = 0,25$ mm und $v = 3600$ mm/min, sowie $a = 0,083$ mm bei $v = 1200$ mm/min ($f = 240$ Hz).

Im Zuge der Auswertung der Versuche erfolgte die Bewertung der Bearbeitungsergebnisse anhand der einzelnen Versuchsfelder und jeweiliger Referenzoberflächen unter Anwendung der im Folgenden beschriebenen Messmittel und Auswertemethoden. Die Bestimmung der Kaltverfestigung wurde unter Messung der Oberflächenhärte nach Vickers mittels eines handgeführten Härteprüfgeräts und einer Prüfsonde vom Typ *HV1* durchgeführt. Diese Prüfsonde arbeitet mit einer konstanten Prüfkraft von einem Kilopond (kp). Die Rauheitsauswertung erfolgte über eine taktile Rauheitsmessung unter Verwendung des Tastschnittgerätes MarSurf PS1. Die Grenzwellenlänge λ_c wurde hierbei entsprechend DIN EN ISO 4287/4288 gewählt. Die Auswertung zur Bestimmung der Oberflächenrauheit erfolgte in Bearbeitungsrichtung. Im Falle der Oberflächenrauheit wurde die Auswertung nach Anwendung statistischer Methoden durchgeführt. Die Haupteinflussfaktoren sowie deren statistische Signifikanz wurden in weiterer Folge eruiert und bewertet. Diese Vorgehensweise bildete die Basis die Einflussgrößen bei der MHP-Bearbeitung auf den einzelnen Werkstoff darzustellen. Die Auswertung der Daten und somit die Signifikanzuntersuchung basieren auf einer faktoriellen Versuchsauswertung und einem zweiseitigen Konfidenzintervall von 95%. Hierzu ist in Abbildung 53 die Auswertemethodik zur Bestimmung und Bewertung der Einflussfaktoren auf die Oberflächenrauheit dargestellt.

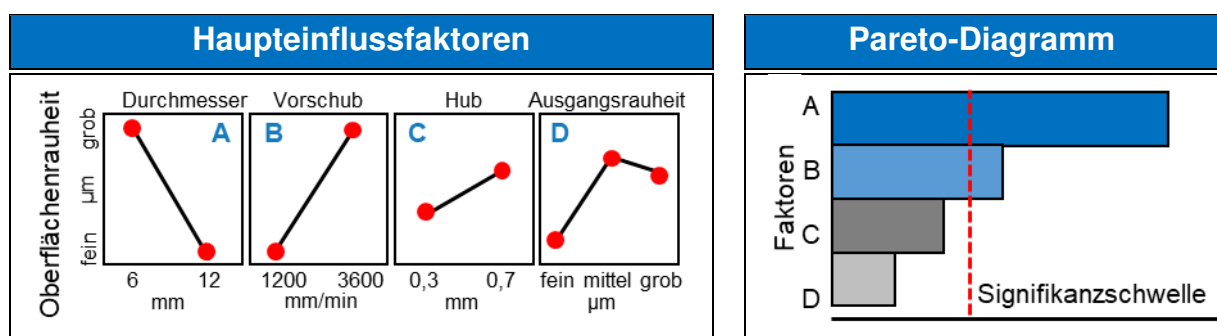


Abbildung 53: Haupteinflussfaktoren (links) und Signifikanzbeurteilung (rechts) der Parameteruntersuchungen

Die Lage und die Ausrichtung der Faktoren gibt Auskunft über den jeweiligen Einfluss des einzelnen Parameters. Hingegen bietet das Pareto-Diagramm eine Darstellung

des größten und des kleinsten Effektes. Liegt der Balkenwert über der Referenzlinie, so ist dieser Faktor als statistisch signifikant einzustufen, d.h. der Wert liegt über dem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$. Die statistische Auswertung wurde mit der Software Minitab® durchgeführt.

4.4.3 Einfluss auf die Kaltverfestigung

Der Effekt der Kaltverfestigung kann mittels einer Härtemessung nach Vickers charakterisiert werden. Im Vorfeld der Bearbeitung wurde die Ausgangshärte der untersuchten Werkstoffe bestimmt. Diese sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

Härte	Al-2024	1.2379	1.2343	E38K	42CrMo4	42CrMo4 Q+T	1.4313
HV1	161 ± 5	221 ± 7	357 ± 20	422 ± 9	247 ± 14	301 ± 15	282 ± 22

Tabelle 21: Ausgangshärte nach Vickers auf der Bauteiloberfläche

Nach der Bearbeitung der Test-Werkstoffe mit dem P-MHP- und dem E-MHP-System, erfolgte die Härtemessung in der Mitte der Bearbeitungsfelder mit einem Prüfumfang von $n = 5$. Das Ergebnis der Auswertung der Härtemessung nach Vickers ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Beginnend mit der Aluminiumlegierung Al2014-T351 sind die Ergebnisse der Oberflächenhärte in Abbildung 54 für das E-MHP- und das P-MHP-System inkl. Fehlerbalken abgebildet. Anhand dieser vorgezogenen Daten wird die Härte­darstellung beschrieben. Die Ordinate beschreibt den Härte­wert in Vickers HV1 und auf der Abszisse sind die Versuchsfelder aufgetragen. Die dargestellte Sortierung der Versuchsfelder ist der Sortierung der aufsteigenden Härte­werte geschuldet. Der Wert rechts außen, in roter Farbe markiert, beschreibt die jeweilige Ausgangshärte des unbearbeiteten Werkstoffes. Entsprechend dieser Beschreibung sind auch die Ergebnisse der Härtemessung der Stahlwerkstoffe in Abbildung 55 und Abbildung 56 für die Bearbeitung unter Anwendung des P-MHP- und des E-MHP-Systems zu sehen.

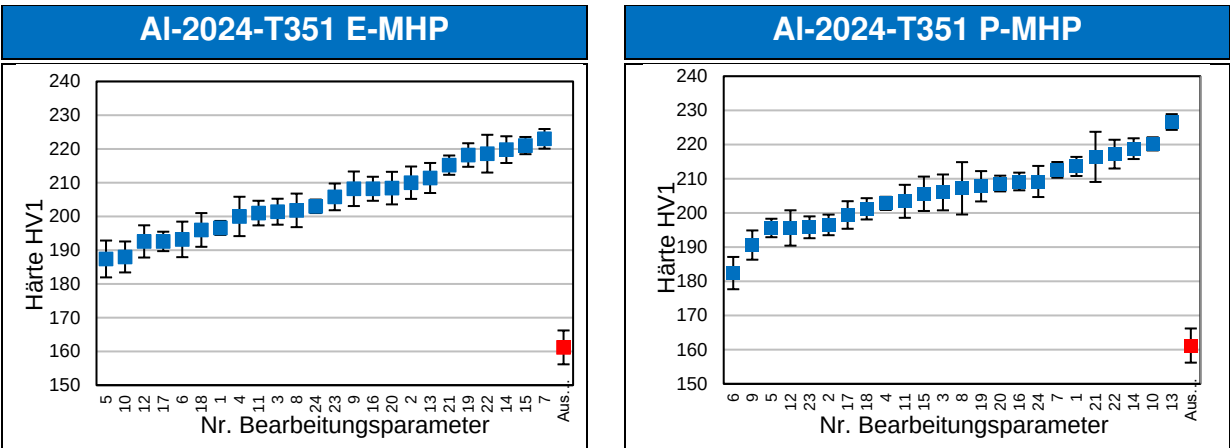


Abbildung 54: Ergebnis in aufsteigender Reihenfolge der Oberflächenhärte für die E-MHP- und P-MHP-bearbeitete Aluminiumlegierung Al2014

Prozess des maschinellen Oberflächenhämmerns

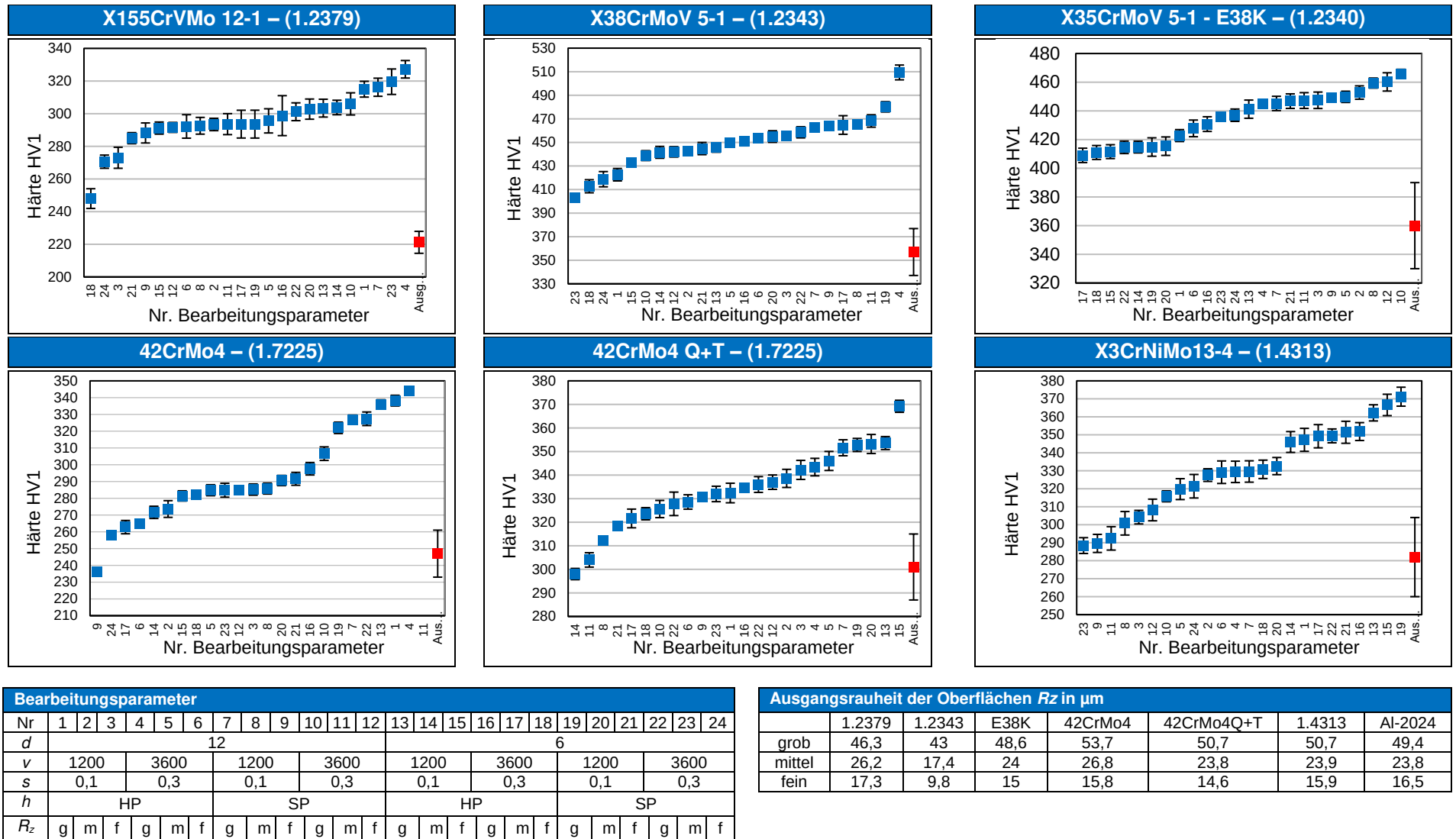
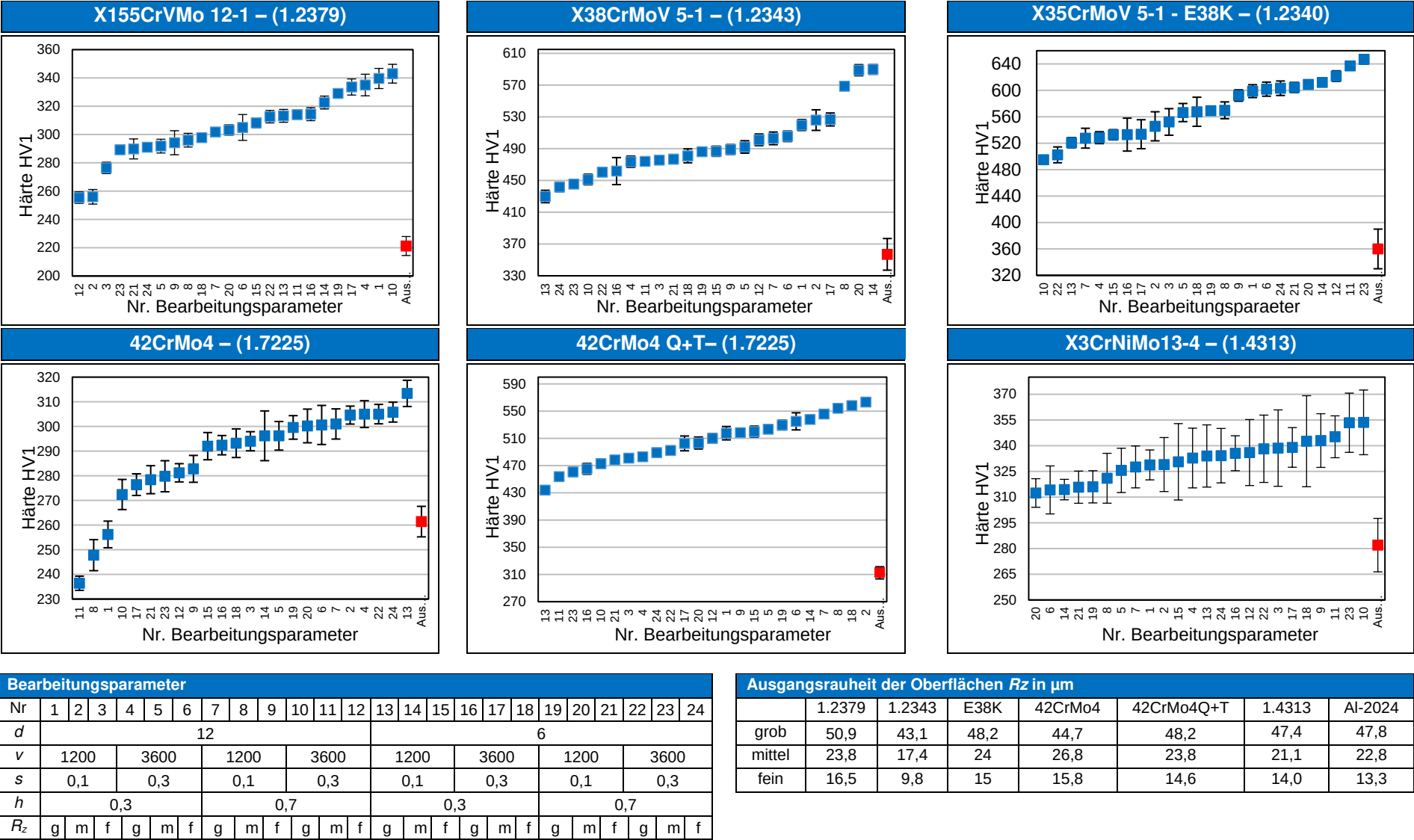


Abbildung 55: Ergebnis in aufsteigender Reihenfolge der Oberflächenhärte für P-MHP-bearbeitete Stahlwerkstoffe

Prozess des maschinellen Oberflächenhämmerns



Im Fall der Bearbeitung der Aluminiumlegierung Al2014-T351 sowohl mit dem P-MHP- als auch mit dem E-MHP-Aktor kann ein Kaltverfestigungsmechanismus an der bearbeiteten Werkstoffoberfläche in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter nachgewiesen werden. Bei der Wahl eines großen Hammerkopfdurchmessers ($d = 12 \text{ mm}$) und einer geringen Vorschubgeschwindigkeit ($v = 1200 \text{ mm/min}$) zeigt sich – bei tendenziell größerer Ausgangsrauheit – eine Steigerung der Oberflächenhärte für beide eingesetzten Systeme. Um in weiterer Folge den Einfluss der MHP-Bearbeitung auf die Steigerung der Oberflächenhärte beschreiben zu können, sind in den beiden folgenden Tabellen die gemittelten Härtewerte aller 24 Versuchsfelder aufgelistet. Hierbei folgte eine Unterteilung anhand des eingesetzten MHP-Systems. Im Falle der Aluminiumlegierung ist für beide Systeme eine Steigerung der mittleren Oberflächenhärte von 27,3 - 28% festzustellen. Vergleicht man die Mittelwerte über alle Versuchsfelder, so stellt man fest, dass die beiden Warmarbeitsstähle 1.2343 und E38K als auch der Vergütungsstahl im vergüteten Zustand 42CrMo4 Q+T (quenched and tempered) eine deutlichere Härtesteigerung unter Anwendung des E-MHP-Systems und der damit verbundenen höheren Umformenergie erfahren. Im Gegensatz dazu zeigt der Kaltarbeitsstahl 1.2379, der CrNi-Werkstoff 1.4313, der 42CrMo4 Werkstoff im Auslieferungszustand, sowie die Aluminiumlegierung Al-2024-T351 eine vom Aktor unabhängige Ausprägung der mittleren Oberflächenhärte.

Härte	Al-2024	1.2379	1.2343	E38K	42CrMo4	42CrMo4 Q+T	1.4313
HV1 _{Mittelwert}	205	305	494	570	288	505	332
Steigerung %	27,3	38,0	38,4	35,1	16,6	67,8	17,7

Tabelle 22: Gemittelte Oberflächenhärte nach Vickers auf der Bauteiloberfläche aller Versuchsreihen für das E-MHP-System

Härte	Al-2024	1.2379	1.2343	E38K	42CrMo4	42CrMo4 Q+T	1.4313
HV1 _{Mittelwert}	206	296	449	436	287	334	330
Steigerung %	28,0	33,9	25,8	3,3	16,2	11,0	17,0

Tabelle 23: Gemittelte Oberflächenhärte nach Vickers auf der Bauteiloberfläche aller Versuchsreihen für das P-MHP-System

Im Detail betrachtet zeigt sich für den Kaltarbeitsstahl 1.2379 eine Steigerung der Oberflächenhärte von 221 HV1 auf 248 – 327 HV1 bei einer Bearbeitung mit dem P-MHP-System und ein ähnlicher Verlauf der Werte bei der E-MHP-Bearbeitung, 255 – 343 HV1. Auffällig bei den Ergebnissen ist, dass die größten Härtesteigerungen für diesen Werkstoff bei den höchsten Ausgangsrauheitswerten erzielt werden konnten. Hingegen stellt sich bei einer geringen Ausgangsrauheit auch eine geringere Neigung zur Kaltverfestigung dar.

Wie bereits erwähnt zeigen die beiden Warmarbeitsstähle 1.2343 und E38K sehr differenzierte Werte, wenn es um die Wahl des MHP-Systems geht. So ist ein mittlerer

Wert der Ausgangsrauheit ($R_{z-Mittel}$) bei einer niedrigen Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1200 \text{ mm/min}$ eine gute Wahl, wenn höchste Werte der Oberflächenhärte für den Werkstoff 1.2343 zu erzielen sind. Im Speziellen bei der P-MHP-Bearbeitung stellt die geringere Vorschubgeschwindigkeit ein einfaches Mittel dar, um durch den geringeren Eindruckabstand eine höhere Kaltverfestigung zu erwirken.

Für den zweiten Warmarbeitsstahl X35CrMoV 5-1 (E38K) ist im Falle der E-MHP-Bearbeitung die Wahl eines kleinen Hammerkopfdurchmessers von Vorteil. Im Gegenzug dazu zeigt sich bei diesem Werkstoff und der Bearbeitung durch das P-MHP-System ein umgekehrtes Erscheinungsbild. In diesem Fall erfordert eine maximal anzustrebende Steigerung der Härte die Verwendung eines großen Hammerkopfes.

Im nicht vergüteten Zustand des 42CrMo4 bewirken ein großer Hub beim E-MHP-System und die Verwendung des Hochdruckverteilers (HP) bei der pneumatischen Variante die größten Oberflächenhärten. Zudem kann auch hier der positive Einfluss einer höheren Ausgangsrauheit auf die Oberflächenhärte gezeigt werden. Das Verfestigungsverhalten für den vergüteten Zustand des 42CrMo4 zeigt bei der Bearbeitung durch das E-MHP-System, dass sich hier die größten Steigerungen der Härte erzielen lassen. Für das Bearbeitungsfeld mit der Nummer 1 lässt sich eine Härtesteigerung von bis zu 81% erzielen. Gleich den Erkenntnissen von LIENERT [39] zeigt sich, dass der Einsatz von höheren Amplituden bei diesem Werkstoff im vergüteten Zustand zu geringeren Härtewerten führt. Neben diesem Erscheinungsbild führt ein größerer Hammerkopfdurchmesser – welcher zugleich eine größere Umformenergie durch seine größere Masse mitbringt – zu einer Steigerung der Härte. Analog hierzu zeigt sich auch bei der P-MHP-Bearbeitung eine Zunahme der Härte durch Anwendung eines größeren Hammerkopfdurchmessers. Zudem sollte bei der pneumatischen Aktorvariante eine geringere Vorschubgeschwindigkeit bei einem gleichzeitig geringen Bahnversatz und Eindruckabstand verwendet werden.

Der weichmartensitische CrNi-Stahl 1.4313 kann bei der pneumatischen Bearbeitung durch die Wahl eines kleinen Hammerkopfdurchmessers bei gleichzeitig geringer Vorschubgeschwindigkeit um bis zu 31% in seiner Oberflächenhärte gesteigert werden. Auch für das elektrodynamische System zeigt sich ein kleiner Hammerkopfdurchmesser als vorteilhaft, wenn es um eine höhere Kaltverfestigung geht. Auffallend hierbei ist jedoch, dass die Vorschubgeschwindigkeit und damit der Eindruckabstand größer gewählt werden sollen, um hier eine bis zu 25% höhere Oberflächenhärte zu erzielen.

Es ist aus den Messergebnissen ersichtlich, dass sich die Kaltverfestigung beurteilt nach einer Vickers-Härtemessung in Abhängigkeit von den untersuchten Werkstoffen deutlich unterscheidet. So gilt es für die jeweilige Werkstoffart eine entsprechende Bearbeitungsstrategie anzuwenden, um ein Optimum des Effektes zur Härtesteigerung zu erzielen.

4.4.4 Einfluss auf die Rauheit

Die Messung der Oberflächenrauheit erfolgt orthogonal zur Bearbeitungsrichtung auf den Probefeldern 1 bis 24 (siehe Abbildung 52 links) unter Anwendung eines auf dem Tastschnittverfahren basierenden Rauheitsmessgeräts MarSurf PS1 der Firma Mahr. Es ist davon auszugehen, dass in dieser Messrichtung eine höhere Oberflächenrauheit vorliegt [30]. Die Grenzwellenlänge λ_c zur Abgrenzung zwischen periodischen und aperiodischen Oberflächenprofilen wurde hierbei entsprechend DIN EN ISO 4287/4288 festgelegt. Analog zu der Auswertung der Oberflächenhärte wurde auch hier ein Prüfumfang von $n = 5$ gewählt. Neben aufsteigend sortierten Rauheitswerten aus der taktilen Messung für den jeweiligen Werkstoff und das eingesetzte MHP-Aktorsystem erfolgt eine statistische Auswertung der Haupteinflussfaktoren auf die Oberflächenglättung und deren Prüfung auf statistische Signifikanz. Für den Werkstoff Al-2024-T351 ist in Abbildung 57 das Ergebnis der Rauheitsausmessung für beide Aktorsysteme als Säulendiagramm dargestellt. Die Ergebnisse der sechs weiteren Werkstoffe sind in der Abbildung 58 für das E-MHP-System sowie in der Abbildung 59 für das P-MHP-System zu sehen.

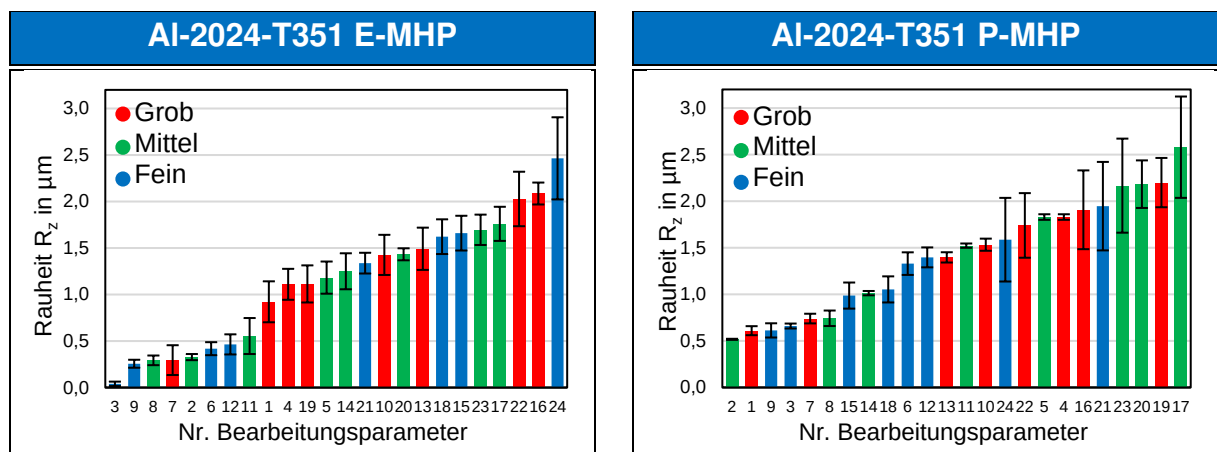


Abbildung 57: Ergebnis in aufsteigender Reihenfolge der Rauheitswerte für den E-MHP- und P-MHP bearbeiteten Werkstoff Al-2024-T351

Bei dem Werkstoff Al-2024-T351 spielt die Ausgangsrauheit eine untergeordnete Rolle, wenn es um eine optimale Glättung der Oberfläche geht. Dennoch zeigt sich auch eine leichte Tendenz, dass eine geringere Ausgangsrauheit zu einer geringeren Oberflächenrauheit nach der MHP-Bearbeitung führt. Um eine bessere Zuordnung der Ausgangsrauheit zu den Versuchsfeldern zu schaffen, ist die Zugehörigkeit der einzelnen Messfelder farblich markiert. Deutlicher tritt hier der Effekt bei der Verwendung eines großen Hammerkopfes zum Vorschein. Dieser ist unabhängig vom Werkstoff als positives Kriterium einzustufen, wenn es um ein möglichst optimales Glättungsergebnis geht. Im direkten Vergleich der beiden Systeme scheint das E-MHP-System eine bessere Glättung zu erzielen.

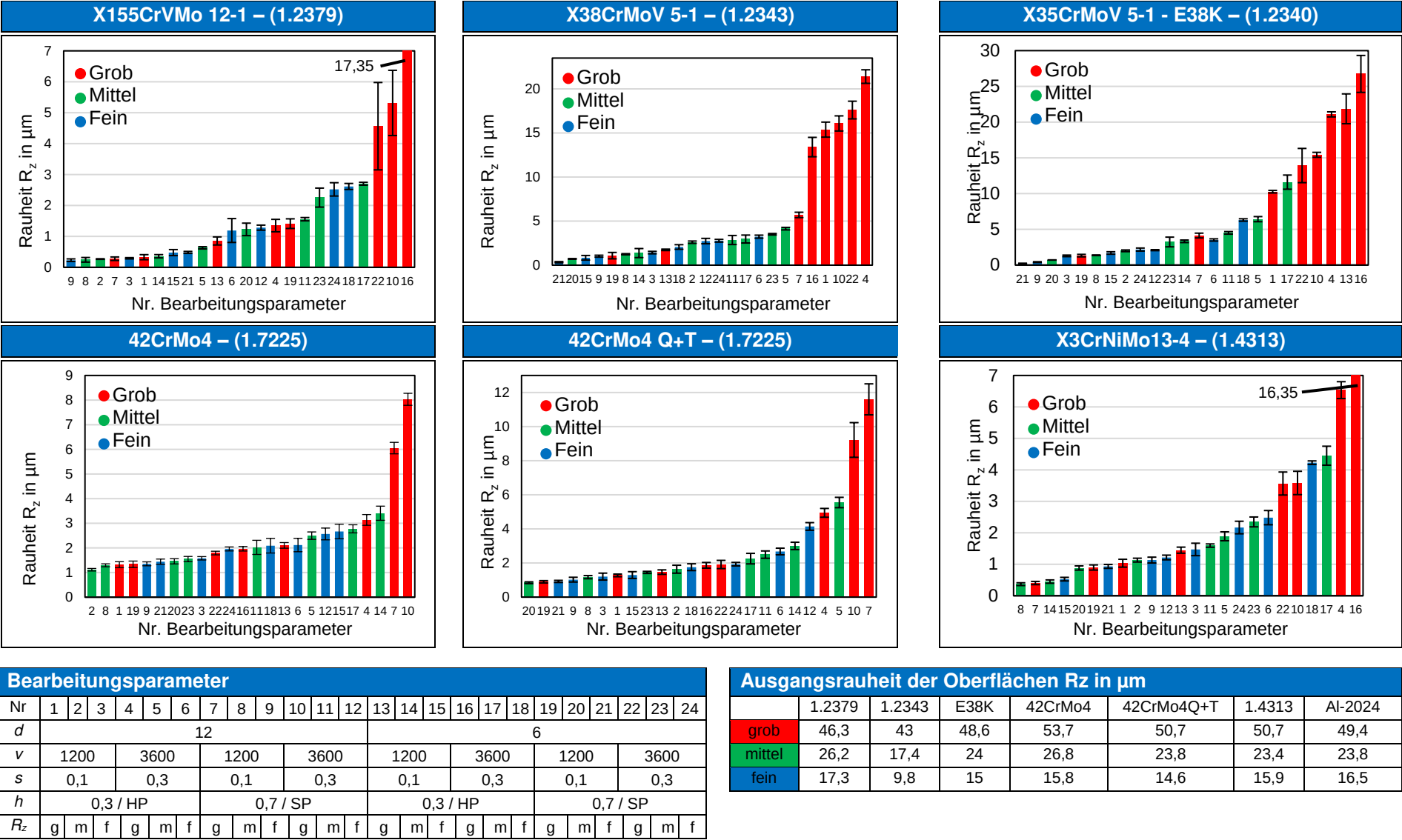


Abbildung 58: Ergebnis in aufsteigender Reihenfolge der Rauheitswerte für P-MHP bearbeitete Werkstoffe

Prozess des maschinellen Oberflächenhämmerns

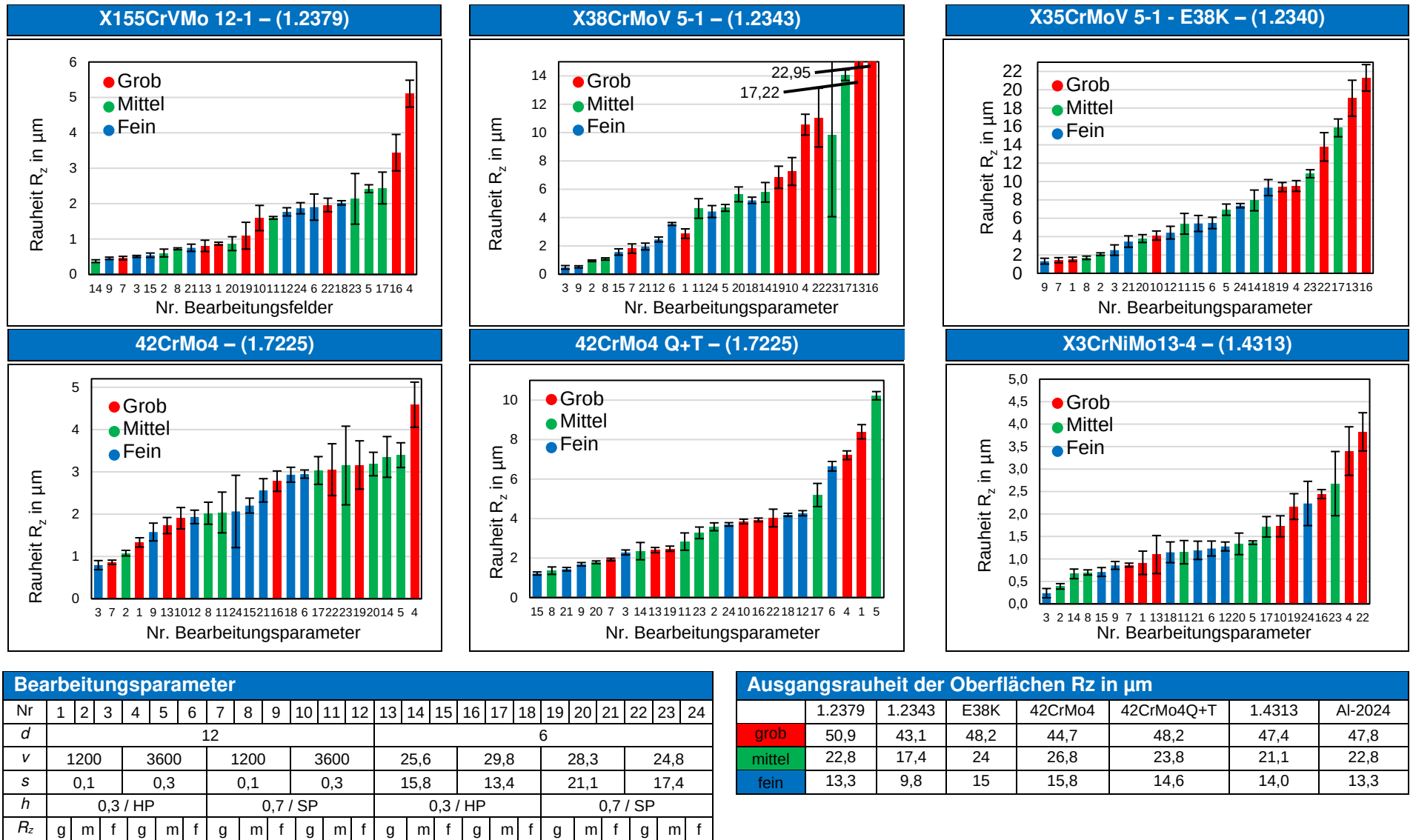


Abbildung 59: Ergebnis in aufsteigender Reihenfolge der Rauheitswerte für E-MHP bearbeitete Werkstoffe

Um diese bei dem Aluminiumwerkstoff relativ einfachen Einflüsse der Parameter auch bei den weiteren Werkstoffen deutlich zu machen, findet eine Auswertung der Ergebnisse nach statistischen Methoden statt. Die Interpretation der faktoriellen Versuchsauswertung auf Basis eines zweiseitigen Konfidenzintervalls von 95% erfolgt über die Visualisierung der Einflussfaktoren anhand der beiden Darstellungen in Abbildung 60. Darin ist für den Werkstoff Al-2024-T351 der Einfluss der Haupteffekte (variierende Versuchsparemeter) auf die mittlere Oberflächenrauheit R_z (Zielgröße) mittels Linienplot sowie eine Bewertung der statistischen Signifikanz der Einflussfaktoren als Balkendiagramm dargestellt. Überschreitet ein Faktor die eingezeichnete Signifikanzlinie ($\alpha = 0,05$), so ist dieser Parameter signifikant hinsichtlich einer Oberflächenglättung einzustufen.

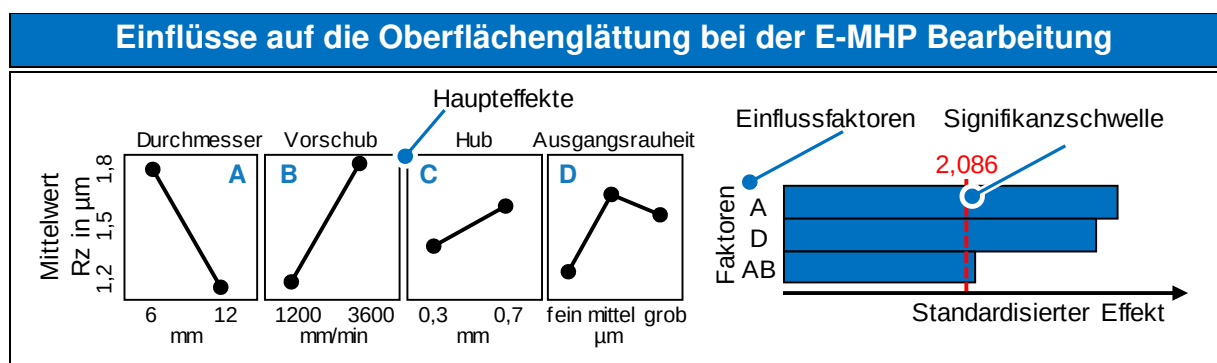


Abbildung 60: Haupteffekte zur Glättung der Werkstoffoberfläche und Auswertung der statistischen Signifikanz der Einflussfaktoren für den Werkstoff Al-2024-T351

Für die weiteren Werkstoffe sind diese detaillierten statistischen Auswertungen im Anhang A in einem eigenen Tabellenblatt zusammengefasst. Bevor jedoch eine detailliertere Auswertung der einzelnen Werkstoffe erfolgt, ist es möglich, ein auffälliges Detail aus den Ergebnissen der Rauheitsmessung zu beschreiben.

Durch die Farbzurordnung der Ausgangsrauheit kann für die beiden Warmarbeitsstähle 1.2343 und E38K und für beide eingesetzte Aktorsysteme der Einfluss der Ausgangsrauheit auf das Resultat der Oberflächenglättung deutlich sichtbar gemacht werden. So ist eine Häufung der rot markierten Balken im oberen Bereich der gemessenen Rauheitswerte erkennbar. Daraus ist zu schließen, dass je größer die Ausgangsrauheit bei diesen Werkstoffen vor der Bearbeitung ist, umso geringer ist die erreichbare Glättung der Oberfläche. Betrachtet man im Detail die Einflüsse der MHP-Bearbeitungsparameter auf Basis der Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung, so bestätigt sich für den Warmarbeitsstahl 1.2343 diese Annahme. In beiden Fällen der eingesetzten MHP-Aktoren nimmt die Ausgangsrauheit den größten Einfluss auf die erzielbare Rauheit ein. Neben dieser Einflussgröße ist es auch die geringe Vorschubgeschwindigkeit, welche zu einem verbesserten Ergebnis führt. Umgekehrt verhält es sich bei der Wahl des Hammerkopfdurchmessers für diesen Werkstoff und der beiden MHP-Systeme. So ist

bei der pneumatischen Variante ein kleiner Hammerkopfdurchmesser zu bevorzugen, hingegen sollte bei dem elektrodynamischen Aktorsystem ein großer Hammerkopfdurchmesser eingesetzt werden. Anzumerken hier ist jedoch, dass die statistische Signifikanz bei dem Durchmesser des E-MHP-Systems deutlich größer ausfällt. Der hier vorliegend gegenläufige Effekt kann auf die höhere Umformenergie des E-MHP-Systems zurückgeführt werden. Bei der Wahl eines kleinen Hammerkopfdurchmessers liegt eine große plastische Deformation im Werkstück vor (siehe auch AI-2024-T351). Wie sich aus den Ergebnissen der Signifikanzuntersuchung herausstellt, sind es neben den Einzeleffekten auch Parameterkombinationen, welche ein optimiertes Bearbeitungsergebnis vorantreiben. So ist die Kombination aus Hammerkopfdurchmesser und der gewählten Vorschubgeschwindigkeit bei beiden Aktorvarianten eine einflussnehmende Größe auf die Oberflächenrauheit.

Auch für den zweiten untersuchten Warmarbeitsstahl vom Typ E38K kann gezeigt werden, dass bei der pneumatischen MHP-Bearbeitung die Ausgangsrauheit, gefolgt von der eingesetzten Schlageinheit (SP-Druckverteiler) und der Wahl einer niedrigen Vorschubgeschwindigkeit sich als positive Größen für die Bearbeitung herausstellten. Zusätzlich zu diesen Größen ist bei der E-MHP-Bearbeitung dieses Werkstoffes die Anwendung eines großen Hammerkopfdurchmessers zu berücksichtigen.

Die Auswertung der Einflüsse der Bearbeitungsparameter beider MHP-Aktorsysteme für die Bearbeitung des Kaltarbeitsstahls vom Typ 1.2379 zeigen im Gegensatz zu dem zuvor beschriebenen Werkstoff, dass eine optimale Glättung der Werkstückoberfläche auf eine geringe Vorschubgeschwindigkeit zurückgeführt werden kann.

Der niedrig legierte Vergütungsstahl 42CrMo4 zeigt über das gesamte Parameterfeld der P-MHP-Bearbeitung keinerlei signifikante Einflussgrößen auf die Oberflächenglättung. Aus den Ergebnissen der Rauheitsauswertung lässt sich zeigen, dass die Kombination aus niedrigerer Umformenergie (Einsatz des SP-Druckverters), einer hohen Ausgangsrauheit und eines großen Hammerkopfdurchmessers zu einer geringen Glättung der Oberfläche führt. Anders als bei der P-MHP-Bearbeitung lässt sich für diesen Werkstoff durch die Anwendung des E-MHP-Aktors mit einer geringen Vorschubgeschwindigkeit eine signifikante Reduzierung der Oberflächenrauheit beobachten. Im vergüteten Zustand des 42CrMo4 (Q+T) ist für beide MHP-Aktorsysteme die Wahl eines kleinen Hammerkopfdurchmessers zu bevorzugen. Im Speziellen ist für das E-MHP-System eine geringe Vorschubgeschwindigkeit sowie die Wahl eines großen Hubes (hohe Umformenergie) zu bevorzugen.

Ähnlich der Bearbeitung des 42CrMo4 (Q+T) gilt es, für den weichmartensitischen CrNi-Werkstoff (1.4313) bei der E-MHP als auch bei der P-MHP-Bearbeitung eine niedrige Vorschubgeschwindigkeit zu wählen und die Bearbeitung auf einer geringen

Ausgangsrauheit durchzuführen. Neben diesen Kriterien ist es zudem als Vorteil einzustufen, wenn ein kleiner Hammerkopfdurchmesser bei einer gleichzeitig großen Hammerkopfbewegung (Hub) zum Einsatz kommt.

Wie auch zuvor durch den Einfluss der Bearbeitungsparameter auf die Oberflächenhärte gezeigt werden konnte, ist es bei der Oberflächenglättung sehr vom bearbeiteten Werkstoff und dessen Vorbearbeitung abhängig, welche Bearbeitungsstrategie und welches Aktorsystem eingesetzt werden muss, um ein für den Anwendungsfall optimiertes Bearbeitungsergebnis zu erzielen. Unabhängig vom bearbeiteten Werkstoff oder dem Wirkprinzip des MHP-Systems kann durch die MHP-Bearbeitung eine deutliche Glättung der Ausgangsoberfläche erreicht werden. Eine gezielte und vor allem gleichmäßige Glättung der Werkstoffoberfläche kann somit als ein Hauptvorteil dieser Technologie genannt werden. Um das hohe Potential der MHP-Bearbeitung auf die vorgestellten Werkstoffe zu verdeutlichen, ist in den nachfolgenden beiden Tabellen die minimal erzielte Oberflächenrauheit zu der jeweiligen Ausgangsrauheit ins Verhältnis gesetzt, um so das Potential der Glättung mit einer quantitativen Zahl zu unterstreichen. Wie hier deutlich gemacht werden kann, liegt der Glättungseffekt im gesamten Bereich bei über 90%.

Rauheit	Al-2024	1.2379	1.2343	E38K	42CrMo4	42CrMo4 Q+T	1.4313
Feld Nr.	3	14	3	9	3	15	3
Ausgang R_z (μm)	16,5	26,2	9,8	15	15,8	14,6	15,9
Minimale Rauheit	0,517	0,376	0,484	1,323	0,795	1,220	0,239
Glättung %	96,87	98,56	95,06	91,18	94,97	91,64	98,50

Tabelle 24: Auswertung der gemittelten Oberflächenrauheit für das E-MHP-System

Rauheit	Al-2024	1.2379	1.2343	E38K	42CrMo4	42CrMo4 Q+T	1.4313
Feld Nr.	2	9	21	21	2	20	8
Ausgang R_z (μm)	22,8	17,3	9,8	15	26,8	23,8	23,4
Minimale Rauheit	0,004	0,230	0,335	0,222	1,114	0,842	0,368
Glättung %	99,98	98,67	96,58	98,52	95,84	96,46	98,43

Tabelle 25: Auswertung der gemittelten Oberflächenrauheit für das P-MHP-System

Wie aus den Untersuchungen hervorgeht neigt der hochlegierte Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-1 (1.2343) zu einer hohen Kaltverfestigung nach der mechanischen Oberflächenbearbeitung. Neben dieser Eigenschaft weist dieser Werkstoff zudem eine gute Warmfestigkeit auf, was ihn zur Herstellung von Formeinsätze für Kunststoff-Spritzgießwerkzeuge eignet. Aus diesen genannten Gründen wird anhand dieses Werkstoffes versucht eine Mikrostrukturierung auf der Werkstückoberfläche eines Formeinsatzes durch Mikroumformung in Kapitel 5 aufzubringen.

Neben der Gruppe der Warmarbeitsstählen sind auch die CrNi-Stähle für die Fertigungstechnik von hoher Bedeutung, weisen sie – abhängig von Ihrer chemischen Zusammensetzung – doch eine gute Korrosionsbeständigkeit auf. Im Vergleich zu den

untersuchten Werkstoffen zeigt der weichmartensitische CrNi-Werkstoff vom Typ 1.4313 eine geringere Neigung zur Kaltverfestigung. Dem gegenüber steht, dass dieser Werkstoff ein ferromagnetisches Verhalten zeigt. Im Allgemeinen weisen nichtrostenden Stähle unterschiedliche magnetische Eigenschaften auf. Im direkten Vergleich zum Werkstoff X3CrNiMo13-4 (1.4313) zeigt der metastabile austenitische CrNi-Werkstoff X5CrNi18-10 nach einer Kaltumformung partiell magnetisch leitfähige Eigenschaften. Wie in Kapitel 6 gezeigt wird neigen die nichtrostenden austenitischen Stähle zu einer wesentlich stärkeren Kaltverfestigung als der hier untersuchte Werkstoff X3CrNiMo13-4 (1.4313).

5 Oberflächenstrukturierung durch Mikroumformung

In der Natur besteht ein Bauteil aus verschiedenen Elementen um die Oberfläche zu beschreiben. Eines dieser Elemente ist die mesoskopische Strukturierung. So kann etwa durch das Aufbringen von geometrischen Mikrostrukturen die Eigenschaft einer Bauteiloberfläche – wie beispielsweise durch die Erzeugung von Schmiertaschen für tribologische Systeme – gezielt verändert werden. Im Bereich des maschinellen Oberflächenhämmerns wurde in der Vergangenheit der Einsatz des elektrodynamischen Hammersystems zur Herstellung von Mikrostrukturen mehrfach betrachtet. In [67] wurde das E-MHP-System eingesetzt um durch mikrostrukturierte Oberflächen den Reibwert bei der Blechumformung zu beeinflussen. Da es sich bei diesem System um ein kraftgesteuertes Wirkprinzip (Lorentzkraft) handelt, welches auf dem Prinzip des Schlag-Gegenschlages beruht (vgl. [24]) ist es notwendig, einen stabilen Prozess zu finden, der eine definierte Hammerkopfbewegung ausführt und ohne elastischen Rückprall des Hammerkopfes einen stabilen Prozess ermöglicht. Neben einer definierten Hammerkopfbewegung, ist es, wie in Kapitel 4 gezeigt werden konnte, wichtig, eine präzise Bahnführung vorzufinden um präzise Einzeleinschläge des Hammerkopfes zu setzen sodass eine gleichmäßig strukturierte Oberfläche durch den MHP-Prozess hergestellt werden kann. Aus diesem Grund sind zur Herstellung von mikrostrukturierten Oberflächen geschlossene kinematische Ketten als Maschinensystem für die MHP-Bearbeitung zu bevorzugen.

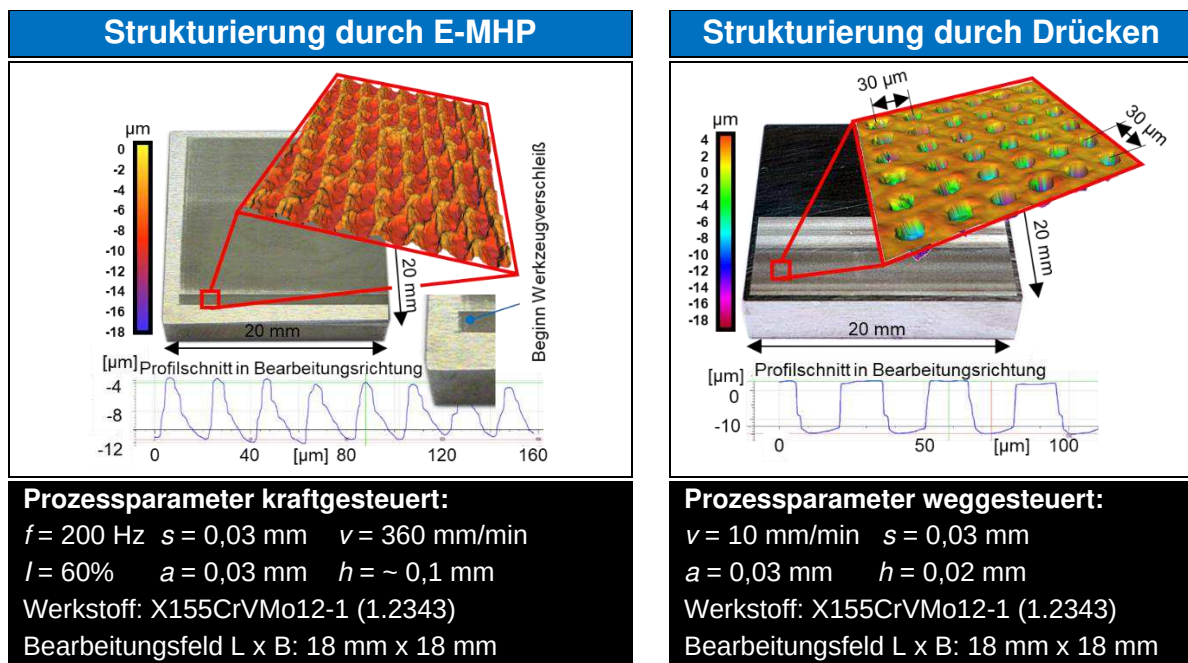


Abbildung 61: Ergebnisse der strukturierten Oberflächen eines kraft- und weggesteuerten Bearbeitungsprozesses, links: kraftgesteuerter MHP-Prozess, rechts: weggesteuerte Umformung durch Drücken

Das Ergebnis der Strukturierungsversuche mit dem E-MHP-System als kraftgesteuerter Prozess auf dem Drei-Achs-BAZ vom Typ Haas VF3 ist in Abbildung 61 dargestellt. Aufgrund des beschriebenen Wirkmechanismus der Aktorik ist dieser für die Herstellung kleinster Strukturen im μm Bereich als ungeeignet einzustufen. Es findet nach etwa 17.000 Einzeleindrücken ein deutlicher Verschleiß des Hartmetallwerkzeuges statt. Die Umformwerkzeuge mit der geometrischen Form eines 45° -Kegels aus dem Werkstoff WC-Co mit 9% - 11,5% Co und einer Korngröße von $0,2 - 0,8 \mu\text{m}$ (Tabelle 39) weisen einen Ausgangsspitzenradius von $2 \mu\text{m}$ auf. Um das Prinzip eines wegbasierten Umformprozesses zu evaluieren, erfolgten erste Umformversuche an einem Fünf-Achs-BAZ vom Typ Hermle C20U mit einer Heidenhain iTNC530 Steuerung. Dabei wurden formgestaltete Umformwerkzeuge in eine ER32-Spannzange eingesetzt und über die Werkstückoberfläche geführt. Mit einem gewählten Parametersatz mit Vorschub $v = 10 \text{ mm/min}$, Eindruckabstand $a = 30 \mu\text{m}$, Bahnabstand $s = 30 \mu\text{m}$ und Hub $h = 20 \mu\text{m}$ konnte über die schrittweise Zustellung in Z-Richtung über die Maschinenachse das Werkzeug in die Werkstückoberfläche gedrückt werden. Bei einem Bearbeitungsfeld von $19 \text{ mm} \times 19 \text{ mm}$ ergeben sich somit 400.689 Einzeleindrücke. Bedingt durch den schrittweisen Umformprozess mit geringer Z-Achsenbewegung von $0,5 \text{ mm}$ und einer geringen Bearbeitungsgeschwindigkeit von $v = 20 \text{ mm/min}$ liegt die Bearbeitungszeit des gesamten Feldes bei über 120 h. Dies ist einer Flächenleistung von $A' = 5,01\text{E-}04 \text{ cm}^2/\text{min}$ gleichzusetzten. Im Vergleich dazu sind beim maschinellen Oberflächenhämmern Flächenleistungswerte von $A' \geq 15 \text{ cm}^2/\text{min}$ anzustreben. Die obere Grenze der Flächenleistung ist durch die Hämmerfrequenz des Aktors und durch die Dynamik der Vorschubachsen limitiert. Im Vergleich zum kraftgesteuerten Prozess konnte eine definierte Mikrostruktur auf der Oberfläche erzeugt werden (Abbildung 61). Dennoch muss auch hier auf den Verschleiß des Werkzeuges geachtet werden, welcher im Falle des weggesteuerten Prozesses nach rund 30.000 Strukturen bemerkbar ist. Die Ergebnisse dieses Versuches sind in Abbildung 61 als weggesteuerter Prozess gekennzeichnet. Auf Basis der durch das Eindringen gewonnenen Erkenntnisse, dass sich ein weggesteuerter Bearbeitungsprozess zur Strukturierung eignet, wurde eine Entwicklung eines piezoelektrischen Bearbeitungssystems vorangetrieben. Der große Vorteil eines piezoelektrischen Systems liegt in der Möglichkeit deutlich höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu realisieren und damit die erreichbare Flächenleistung zu steigern.

5.1 Entwicklung einer Aktorik zur Mikrostrukturierung

Anders als bei der Definition der Anforderungen an einen kraftgesteuerten Aktor, wie z.B. dem E-MHP-System, gilt es bei einem System zur Mikrostrukturierung den Fokus auf einen weggesteuerten Prozess zu legen. Diese muss in der Lage sein, kleinste Bewegungen zu realisieren. Auf Basis von Arbeiten zur Auslegung und zum Aufbau von piezoelektrischen Schwingssystemen, sowie unter Berücksichtigung einer bereits

vorhandenen Leistungselektronik zur Ansteuerung von Piezo-Aktoren können die Anforderungen an ein PZ-MHP-System nach Tabelle 26 folgendermaßen formuliert werden. Im Vergleich zu den in Kapitel 2.3 vorgestellten Systemen für die MHP-Bearbeitung liegt der maximale Hub bei lediglich 50 μm , welcher bei einer Frequenz von etwa $f = 1000 \text{ Hz}$ erreicht werden soll. Das Antriebsdesign des Aktors zur Mikrostrukturierung, orientiert sich an den Anforderungen, mechanisch Mikrostrukturen auf einer Bauteiloberfläche zu erzeugen.

Kenngrößen	Vorgabewerte
Frequenz f (Hz)	0 - 1000
Hub h (μm)	0 - 50
Versorgungsspannung des Aktors (V)	0 - 60
Maximale Stromaufnahme (A)	0,65

Tabelle 26: Anforderungen an ein Piezo-Antriebssystem

Auf Basis dieser Kenngrößen ist es folglich möglich, die Anforderungen an ein Mikro-Hammersystem zur Erzeugung von Mikrostrukturen zu formulieren. Diese können folgendermaßen verfasst werden:

- Ausführung einer uniaxialen Bewegung entlang einer Führungsachse
- steuerbarer Bewegungsablauf
- Werkzeugbewegung (Hub) $h = 0 - 50 \mu\text{m}$
- Bewegungsfrequenz $f = 0 - 1000 \text{ Hz}$
- Baugröße $D < 50 \text{ mm}$ (Antriebseinheit muss in eine Werkzeugaufnahme integriert werden können z.B. SK40, HSK63)

Es gilt somit, ein System zu entwickeln, welches einfach über eine mechanische Schnittstelle in einem Bearbeitungszentrum, wie etwa einem Fünf-Achs-Bearbeitungszentrum, integriert werden kann und entsprechend einer programmierten NC-Bahn über die Werkstoffoberfläche geführt wird. In Anlehnung an Werkzeugaufnahmen findet hier eine Werkzeugschnittstelle vom Typ HSK63 Einsatz.

5.1.1 Piezoelektrische Grundlagen und Entwurfsprozess

Entgegen den Anforderungen an die MHP-Aktoriken, hohe Beschleunigungswerte und damit verbunden hohe Reaktionskräfte zu erzielen [33, S. 95], ist es notwendig ein System zu schaffen welches eine geringe plastische Umformung auf der Werkstückoberfläche erzeugt. Kombiniert mit einem geringen Hub h , wird für ein System zur Mikrostrukturierung auf den inversen piezoelektrischen Effekt zurückgegriffen. Dieser beschreibt die Eigenschaft, dass bei Anliegen einer elektrischen Spannung eine Längenänderung des Piezo-Aktors erreicht wird. Neben dieser Anwendung als Aktorsystem finden piezoelektrische Werkstoffe sowohl in

Sensoren für die Kraft und Beschleunigungsmessung [101] als auch für piezoelektrische Wandler im Bereich der Zündtechnologie Anwendung. Wie dies in [102] ausgeführt wird. Physikalisch gesehen treten zwei unterschiedliche Phänomene bei piezoelektrischen Werkstoffen auf, welche in der Abbildung 62 dargestellt sind. Beim piezoelektrischen Effekt kommt es zu einer Umwandlung von einer mechanischen zu einer elektrischen Energie. Umgekehrt dazu wird beim inversen Effekt elektrische in mechanische Energie umgewandelt. Diese Übersicht zeigt, dass ein piezoelektrischer Werkstoff infolge der Einwirkung äußerer Kräfte ein elektrisches Feld und somit eine Spannung aufbaut.

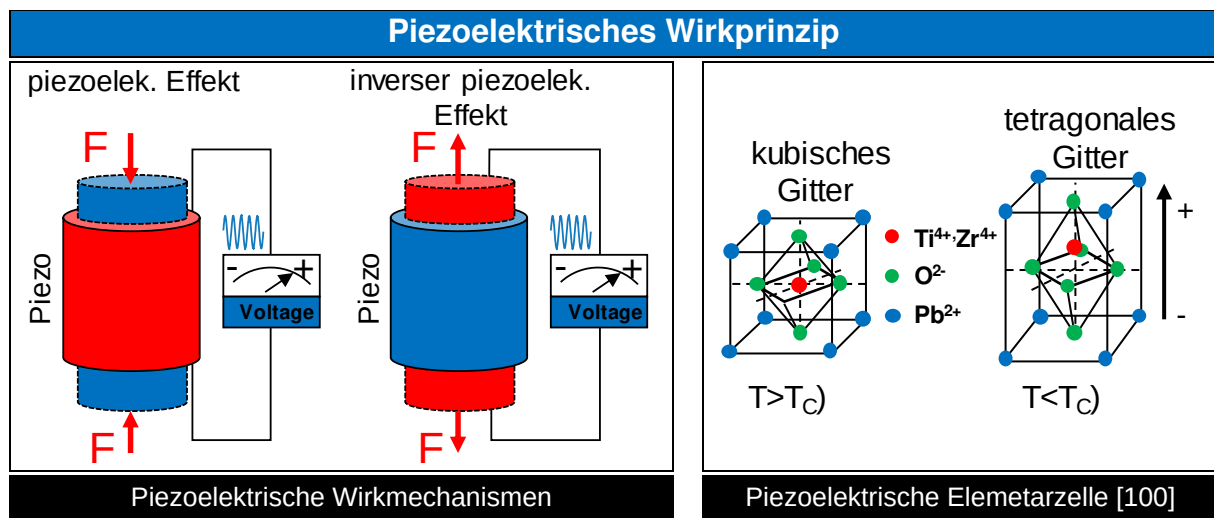


Abbildung 62: Physikalische Effekte von Piezokeramiken, links: schematische Darstellung des Piezoeffektes, rechts: Gitterverzerrung am PZT-Kristall

Diese aufgebaute Spannung entsteht durch die dielektrische Verschiebung von Oberflächenladungen (siehe [36]). Um nun eine oszillierende Bewegung der Hammerkopfspitze zu ermöglichen, müssen die einzelnen Piezo-Stacks mit einem Wechselfeld beaufschlagt werden. Dieses Wechselfeld legt entsprechend der Spannungs-Auslenkungs-Kurve den Hub und die Frequenz fest. Neben Stapel-Piezo-Aktoren kommen auch Biege- und Tubusaktoren zum Einsatz, welche vor allem aus Sinterkeramiken wie z.B. Blei-Zirkonium-Titanat (PZT) [102] oder wie in [100] beschrieben Barium-Titanat (BaTiO_3) hergestellt sind. Diese Werkstoffe zeigen abhängig von der Polarisierung ein symmetrisches oder ein asymmetrisches Verhalten der Elementarzellen. Vor der Polarisierung und oberhalb der Curie-Temperatur (CT) sind die PZT-Kristallite zentro-symmetrisch. Die positiven und negativen Ladungen liegen im Schwerpunkt der Gitterstruktur [102]. Unterhalb der CT beginnt sich die Gitterstruktur der PZT-Kristallite asymmetrisch zu verzerren und weist eine spontane Polarisierung in Form von Elektronen- und Ionenverschiebungen auf (siehe Abbildung 62). Die CT beschreibt die Grenze, bei der die Werkstoffe ihre ferromagnetischen oder ferroelektrischen Eigenschaften bei Überschreitung verlieren. Durch diese spontane Polarisierung werden die PZT-Kristallite piezoelektrisch [100].

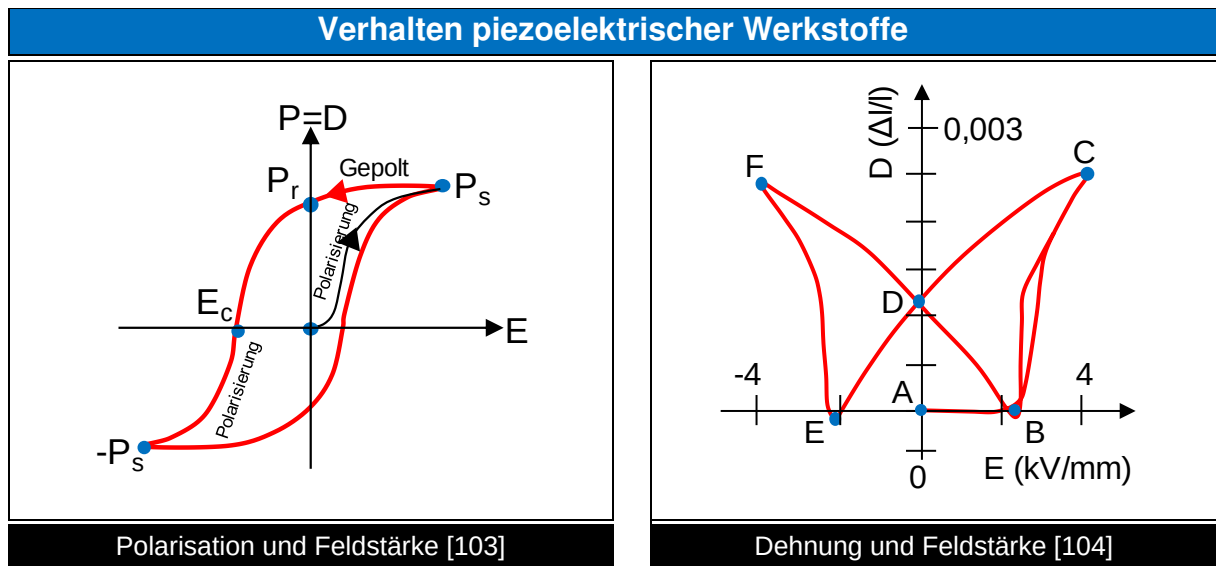


Abbildung 63: Dehnung, Polarisation und Feldstärke bei Piezokeramiken

Der Grund für die Polarisation der piezoelektrischen Werkstoffe liegt in dem energetisch günstigeren Zustand der Ionen zueinander, welche durch die Verzerrung der Gitterstruktur hervorgerufen wird [103]. Die spezifischen Eigenschaften des PZT-Werkstoffes hängen von der Gitterstruktur ab, welche durch das Zr/Ti-Verhältnis geprägt wird. Um während des Betriebes der Piezokeramik keine Depolarisation aufkommen zu lassen, sollte die halbe Curie-Temperatur nicht überschritten werden, wie dies in [105] beschrieben ist. Aufgrund der nicht vorliegenden Ausrichtung der Dipole der piezoelektrischen Kristalle sind Piezokeramiken im Ausgangszustand unpolar. Die gegen gerichteten Dipol-Elemente kompensieren sich gegenseitig (siehe hierzu [105]). Findet nun durch Anlegen eines elektrostatischen Feldes eine Ausrichtung entlang der Richtung des äußeren Feldes der einzelnen Domänen statt, liegt eine gepolte Struktur im Werkstoff vor und es entstehen sogenannte Weiss'sche Bezirke mit gleicher Ausrichtung. In Abhängigkeit der Feldstärke ändert sich die Polarisation der einzelnen Domänen. Im Sättigungsbereich der Polarisation (P_s), ein werkstoffspezifischer Höchstwert für die elektrische Feldstärke, liegen alle Domänen in einer gerichteten Lage vor. Durch diese Polarisation tritt eine Längenänderung ΔL in Richtung des elektrischen Feldes auf. Dehnung und Polarisation verhalten sich ähnlich zueinander, was in der Hysterese der Polarisation P in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke E in Abbildung 63 dargestellt ist. Der Großteil der Domänen behält die Ausrichtung bei Reduktion des Feldes bei, da in den Weiss'schen Bezirken Vorzugsrichtungen der Dipole wirken. Reduziert sich jedoch die spontane Sättigungspolarisation, verbleibt die remanente Polarisation P_r . Eine negative Spannung führt zu einer Kontraktion des Piezos, und einer Depolarisation, die bei Überschreiten der Koerzitivfeldstärke E_c zu einer Repolarisierung in Gegenrichtung führt. Um die Polarisation im Betrieb des Piezos nicht zu beeinflussen, ist – abhängig von der eingesetzten Keramik – eine negative Feldstärke von etwa einem Drittel der Koerzitiv-Feldstärke nicht zu überschreiten (siehe [31]). Neben dem Zusammenhang

zwischen Dehnung und Polarisation sind in Abbildung 63 auch die Abhängigkeiten der beiden Größen zur Feldstärke dargestellt. In welchem Maß die Ausdehnung (S oder ϵ) des Piezos ausfällt ist abhängig von dem anliegenden elektrischen Feld (elektrische Feldstärke) E in V/m, der Länge L des Piezo-Aktors in m, der auf den Piezo gerichteten Kraft F in N sowie den Materialeigenschaften der Piezokeramik. In Abhängigkeit der Ausrichtung der Dehnung der Keramik zum Polarisationsvektor kann die Materialeigenschaft durch das Piezomodul d_{ij} beschrieben werden. Dabei bezeichnet d_{33} die Dehnung parallel zur Polarisationsrichtung (vgl. [100]), pro Einheit des angelegten elektrischen Feldes. Der erste Index gibt Auskunft über die Richtung der Erregung und der zweite die Richtung der Reaktion des Systems (siehe [106, S. 694]). Durch die Ausdehnung des Piezoelements entstehen mechanische Spannungen T , welche von der mechanischen Steifigkeit s des Werkstoffes bei einem konstant wirkenden elektrischen Feld E oder dielektrischer Verschiebung D abhängt. Ein konstant wirkendes elektrisches Feld wird durch einen Kurzschluss des Piezos erreicht und mit dem hochgestellten Index E gekennzeichnet (siehe [105]). Die dielektrische Verschiebung hingegen wird durch eine Isolation der Elektroden geschaffen, welche unter dem Index D geführt ist.

$$S = S^{E/D} \cdot T + d \cdot E \quad (23)$$

Die Dehnung und damit die Längenänderung der Piezokeramik kann über folgende Gleichung vereinfacht abgeschätzt werden, vgl. [106, S. 694]:

$$\Delta L = SL_0 \approx E d_{ij} L_0 \quad (24)$$

Dabei beschreibt: S ...Dehnung (relative Längenänderung); L_0 ... die Länge der Piezokeramik in m; E ...die elektrische Feldstärke in V/m und d_{ij} ...Piezomodul in m/V

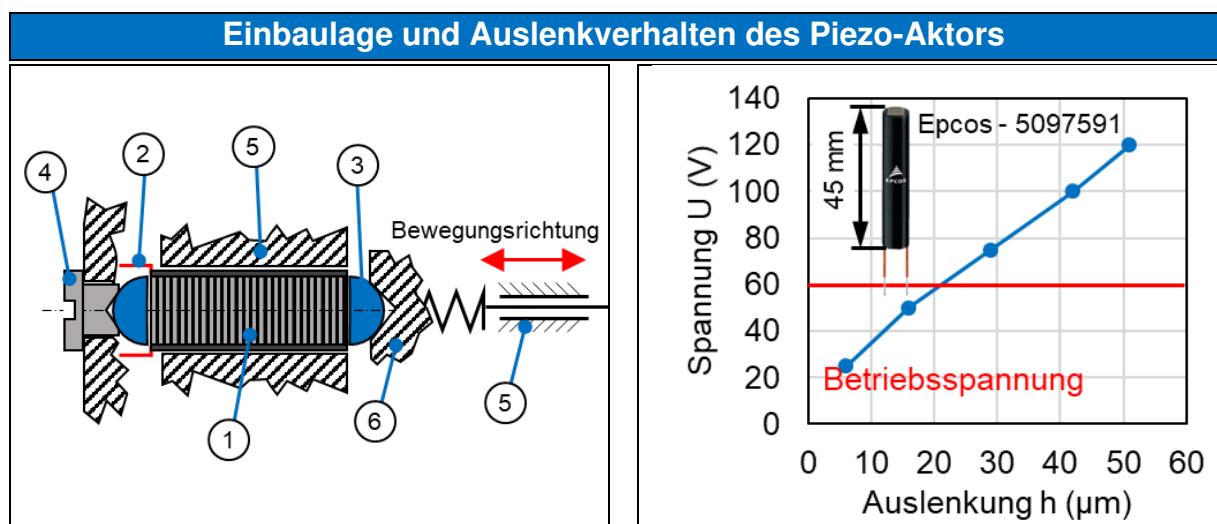


Abbildung 64: Lagerung und Spannungs-Auslenkungs-Verhalten eines Stapel-Piezo-Aktors, links: Einbausituation des Piezoaktors (1)Aktor; (2) elektr. Anschlüsse; (3) Kugelkappen; (4) Schraube zur Vorspannung; (5) Gehäuse, (6) Federbuchse, rechts: Spannungs-Auslenkungskurve des Piezoaktors EPCO-5097591

In [106, S. 694] wird für Piezo-Stapel-Aktoren mit einer maximalen Feldstärke E von 1000-2000 V/mm empfohlen, Werte für den Parameter d_{33} -Werte von 20-550 pm/V heranzuziehen. Aufgrund eines negativen d_{31} Wertes (Dehnung orthogonal zur Polarisierung) beginnt sich der Stapel-Aktor bei einer Längsdehnung im Querschnitt zusammenzuziehen. Ein einzelner Piezo-Stack besteht in der Regel aus mehreren einzelnen PZT-Aktoren, welche verbunden sind. Um Zugbelastungen im Betrieb zu vermeiden müssen Aktoren mit einer definierten Vorspannung beaufschlagt werden. Um weitere Zug- und Scherbelastungen auf den Aktor zu vermeiden, werden meist sphärische Kontakte an den mechanischen Koppelstellen geschaffen. Ein möglicher Aufbau eines eingebauten Piezo-Aktors ist in Abbildung 64 dargestellt. Die darin nummerierten Komponenten sind in Tabelle 27 beschrieben. Durch die Vorspannung wirkt auf den Piezo eine dauernde Druckbelastung, wodurch das gesamte schwingungsfähige System spielfrei betrieben werden kann und im Idealfall nur Druckkräfte auftreten.

Nr	Benennung	Funktion
1	Piezo-Aktor	Aktorik
2	Kontaktierung	Leistungsversorgung
3	Endkappe	Krafteinleitung

Nr	Benennung	Funktion
4	Vorspannschraube	Axial-Positionierung
5	Gehäuse	Radial-Positionierung
6	Gegenhalter	Vorspannung

Tabelle 27: Komponenten zur Lagerung eines einzelnen Piezo-Stacks

Die Gesamtbelastung auf den Piezo-Aktor (F_{Piezo}) setzt sich demnach aus einer Vorspannkraft F_V und einer Belastungskraft F_L zusammen.

$$F_{\text{Piezo}} = F_V + F_L \quad (25)$$

Laut Hersteller soll die Vorspannung zwischen 15 und 18 N/mm² betragen, was etwa einer Vorspannkraft von 400-490 N entspricht (Auszug aus [107]). Neben dieser vereinfachten Darstellung der möglichen Montage ist zudem eine Spannung-Weg-Kennlinie eines einzelnen Stapel-Piezo-Stacks der Fa. EPCOS vom Typ 5097591 dargestellt. Dabei ist ein annähernd linearer Verlauf der Kennlinie zwischen Spannung am Piezo und der Auslenkung zu erkennen.

Bezeichnung	Kenngrößen
Abmessungen L x B x H (mm)	5,2 x 5,2 x 45
Vorspannung (N/mm ²)	15-18
Max. Versorgungsspannung (VAC)	160
Steifigkeit (N/μm)	14
Piezomodul d_{33} (m/V)	5e-3
Elektrische Feldstärke E (V/mm)	2000
Kapazität (μF)	2,55
Längenänderung in μm bei 25°C und 160V bei 600N Vorspannung	62
CT (°Celsius)	200

Tabelle 28: Auszug aus dem Datenblatt des eingesetzten Piezo-Aktors [107]

Wie aus der Spannung-Weg-Kennlinie ersichtlich, ist zur Erreichung des Hubes von etwa 50 μm eine Spannung am Piezo von etwa 120 V erforderlich. Da jedoch die Verstärkereinheit lediglich eine Ausgangsspannung von max. 60 V zulässt, muss eine andere Möglichkeit geschaffen werden, um den angestrebten Hub zu realisieren. Die genauen physikalischen Eckdaten der verbauten Piezo-Aktoren sind in Tabelle 28 zusammengefasst. Entgegen der maximalen Versorgungsspannung der Piezoelemente werden diese mit maximal 60 VAC betrieben.

5.1.2 Vorversuche

Um zunächst die Eignung eines Piezo-Aktors zur Herstellung von Mikrostrukturen zu untersuchen, erfolgte ein Aufbau einer inversen Bearbeitungseinheit zur Mikrostrukturierung. Auf Basis einer bestehenden Festkörperlagervariante aus einem multiaxialen Bearbeitungssystem (siehe [108]) wird ein uniaxialer Schwingtisch aufgebaut, welcher im Gegensatz zu der klassischen MHP-Bearbeitung das Werkstück zur Schwingung anregt. Dieses eingebaute Festkörperlager als Radialpositioniereinheit ist in Abbildung 65 als Piezo-mechanische Aktor-Einheit dargestellt. Im Gegensatz zur multiaxialen Ansteuerung wird in dieser Schwingungsvariante lediglich eine Richtungskomponente genützt, um einen Werkstückträger inkl. Werkstück in Schwingung zu versetzen.

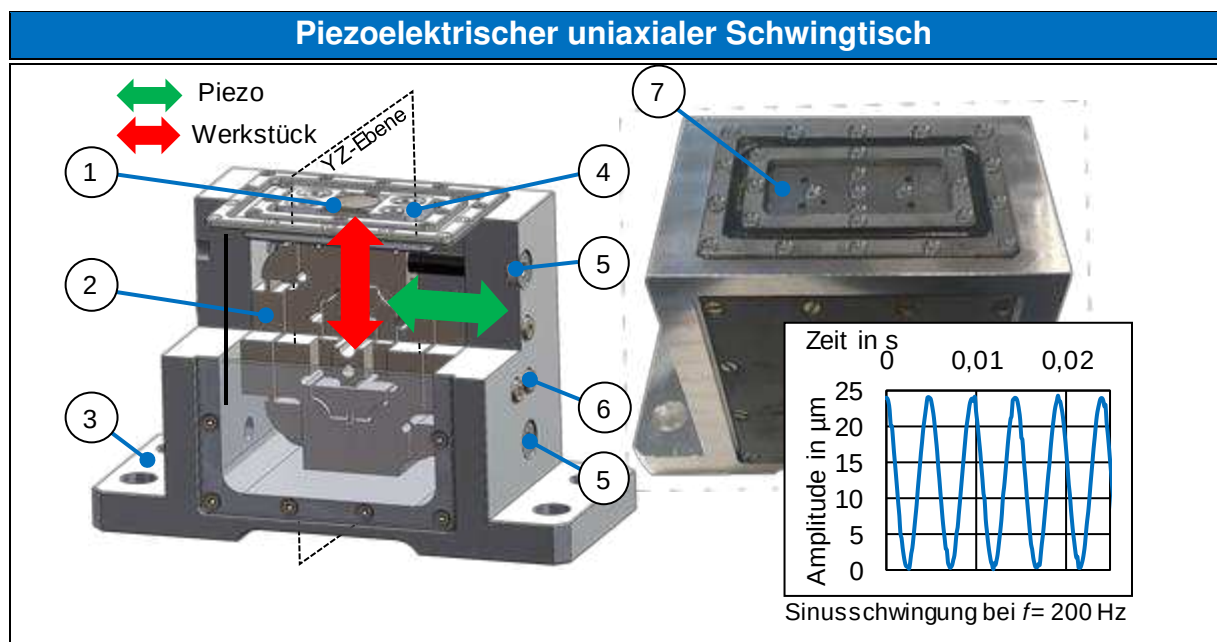


Abbildung 65: Aufbau und Schnittdarstellung des uniaxialen Schwingtisches mit Festkörperlagereinheit aus dem Werkstoff 42CrMo4

Dieser ist in der Lage, Amplituden des Werkstückträges und somit auch des Werkstückes bis zu 24 μm bei einer Sinusanregung zu erzeugen. Im Detail besteht der uniaxiale Schwingtisch aus einem Festkörperlager aus dem Werkstoff 42CrMo4 sowie vier Stück Piezo-Aktoren der Firma EPCOS vom Typ 5097591, welche in horizontaler

Lage eingebaut sind. Diese befinden sich in Abbildung 65 an Position sechs und sind um die YZ-Ebene gespiegelt. Eine horizontale Bewegung der Piezo-Aktoren wird aufgrund der geometrischen Form des Festkörperlages in eine vertikale Bewegung umgesetzt.

Nr	Benennung	Funktion	Nr	Benennung	Funktion
1	Werkstück	Technologieträger	4	Niederhalter	Werkstückhalter
2	Lager	Bewegungsumsetzung	5	Piezo-Aktoren	Antrieb
3	Gehäuse	Antriebslagerung	6	Schraube	Befestigung des Lagers

Tabelle 29: Komponenten des Uniaxialen Piezo-Schwingtisches

Die einzelnen gekennzeichneten Bauteile dieses Systems zur Mikrostrukturierung sind entsprechend der in Abbildung 65 nummerierten Komponenten in Tabelle 29 aufgelistet. Wie bereits zuvor angemerkt, befinden sich die Piezo-Aktoren in waagrechter Einbaulage. Die horizontal eingebauten Piezo-Aktoren (vier Stück) erfahren aufgrund des inversen Piezoeffektes beim Anlegen einer Spannung eine geometrische Veränderung ihrer Form. Durch eine Wechsellspannung kann somit eine oszillierende Formänderung des Piezo-Aktors erzeugt werden.

Kenngrößen	Vorgabewerte
Masse m (kg)	4
Frequenz f (Hz)	0,1 - 1000
Hub h (μm)	1-24
Abmessungen L x D (mm)	209 x 53
Versorgungsspannung VAC	0 - 60

Tabelle 30: Eckdaten des Piezo-Schwingtisch

Die durch den Einbau der Piezo-Aktoren definierten Freiheitsgrade entsteht eine Kraftreaktion in horizontaler Richtung (Abbildung 64). Der einzelne Piezo-Aktor „dehnt“ sich aus und vergrößert seine Länge. Entsprechend der Einbaulage und der Funktion des Festkörpergelenks wird diese horizontale Längenänderung in eine vertikale Bewegung übersetzt. Diese vertikale Bewegung der Lagereinheit wird an das zu bearbeitende Werkstück übertragen. Die Werkstückaufnahme bietet die Möglichkeit, Werkstückgrößen bis zu einer Fläche von etwa 20 mm x 50 mm aufzuspannen. In Tabelle 30 sind für diese Konfiguration die physikalischen Eckdaten des uniaxialen Piezo-Schwingtisches zusammengefasst. In dieser Konfiguration leistet der uniaxiale Schwingtisch Amplituden von bis zu 24 μm bei einer Wechsellspannung von 60 V.

5.2 Antriebsgestaltung

Die Aufgabe der Antriebsoptimierung dient dazu, die Oszillationsbewegung auf die Seite des Umformwerkzeuges zu bringen. Somit ist es möglich, großflächige Oberflächen zu strukturieren sowie von einer 2,5-D-Bearbeitung zu einer vollständigen

Fünf-Achs-Simultanbearbeitung von Freiformflächen überzugehen. Um diese Aufgaben erfolgreich umzusetzen, werden die in dem zuvor beschriebenen uniaxialen Schwingtisch verwendeten Piezo-Aktoren verwendet und in eine Werkzeugaufnahme vom TYP HSK-63 integriert. Hierbei ist es wichtig eine geeignete Lagerung auszuwählen welche einerseits eine Führung in axialer Richtung ermöglicht und gleichzeitig eine Vorspannung des Piezo-Stacks erlaubt. Im Gegensatz zur Führung der Werkstückbewegung über ein multiaxiales Festkörpergelenk wird für den finalen Aufbau des Aktorsystems eine geeignete Lagerlösung entwickelt, die den hohen Anforderungen des Antriebs hinsichtlich einer exakten Positionierung gerecht wird. Die Aufgabe der Lagerung in einem MHP-Aktor besteht darin, die auftretenden Kräfte aufzunehmen, um die axiale und vor allem die radiale Positionierung der Werkzeugbewegung sicherzustellen. Während der MHP-Bearbeitung wirken Querkräfte auf den Hammerkopf, welche durch die Vorschubbewegung beim Auftreffen des Hammerkopfes auf die Werkstückoberfläche entstehen. Wie in [24] ausgeführt, beeinflussen diese Querkräfte die Systemcharakteristik und damit die Genauigkeit der Bearbeitung. Aus diesem Grund liegt der Anspruch an eine Lagerung darin, diese auftretenden Kräfte aufzunehmen und sicherzustellen, dass eine exakte Positionierung des Läufers zum Stator fortwährend gegeben ist. Eine Variante zur Umsetzung einer linearen Lagerung stellen die sogenannten Membranlager dar. Diese eignen sich vor allem durch ihre reibungsfreien und nicht verschleißbehafteten Eigenschaften für die Lagerung von zyklisch-linearen Bauteilbewegungen. Klassischerweise werden Membranlager über eine äußere Ringfläche gemeinsam mit einer konzentrisch zu dieser platzierten Mittenbohrung fixiert, sodass zwischen diesen beiden Bezugsebenen eine axiale Bewegung möglich ist [109]. Je nach Anforderung an die Lagereinheit gibt es unterschiedliche Designrestriktionen, welche bei der geometrischen Auslegung eines Membranlagers berücksichtigt werden müssen. Im Gegensatz zur klassischen Membranvariante fällt die Wahl auf die Ausführung als Festkörperlager in der Ausführung als Federbalg. Als Werkstoff zur Herstellung der Festkörperlagerung findet der Vergütungsstahl 42CrMo4 (1.7225) Einsatz. Für die Auslegung des Lagers wird die Biegezugfestigkeit σ_{BW} des Werkstoffes herangezogen, um die Geometrie der Lagerung bei gegebenen maximalen Spannungen zu optimieren.

R_m (MPa)	R_e (MPa)	ρ (g/cm ³)	E-Modul (GPa)	Wechselzugfestigkeit σ_{BW} (MPa)
1100	900	7,72	210	550

Tabelle 31: Werkstoffeigenschaften des Vergütungsstahls 42CrMo4 (1.7225) [110, Teil 1–1]

In [110, Teil 1–1] ist diese für den Vergütungsstahl 42CrMo4 (1.7225) mit 550MPa angegeben. In der Tabelle 31 werden die Eigenschaften dieses Werkstoffes zusammengefasst. Um eine detaillierte Betrachtung der Lagerung vornehmen zu können findet eine numerische Finite-Elemente-Simulation statt. Als Software findet ANSYS Workbench 19.1 sowohl zur statischen als auch zur transienten Berechnung

des Systems Anwendung. In dieser Arbeit wird in weiterer Folge nicht auf die Grundcharakteristik der Simulationsmethodik eingegangen. Hierbei dient die FE-Modellierung lediglich als technisches Hilfsmittel zur Untersuchung und zur Auslegung der Komponenten. Für eine genauere Beschreibung des Verfahrens wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen. Der Aufbau der Simulation ist in Abbildung 67 links zu sehen. Die statische Berechnung der Lagerung erfolgt bei einer axialen Verschiebung des Systems um 100 μm . Das Ergebnis der Vergleichsspannung nach Von Mises ist hierzu in Abbildung 66 links abgebildet. In dieser Spannungsdarstellung ist der unbelastete Bereich in der Mitte des Ringelements sehr gut zu erkennen. Die höchsten Spannungen treten hierbei im Randbereich auf und weisen einen Wert von $\sigma_v = 72 \text{ N/mm}^2$ (Vergleichsspannung nach Von Mises) auf. Die Abbildung zeigt rechts einen Halbschnitt einer gedrehten Lagervariante. Weiters kann man die Stege erkennen, deren Kennwerte in Tabelle 32 beschrieben sind.

Anzahl an radial Stegen	Stegbreite	Steglänge	Wandstärke	Innendurchmesser
13	0,25 mm	2 mm	1 mm	20 mm

Tabelle 32: Geometrische Größen der Festkörperlagerung

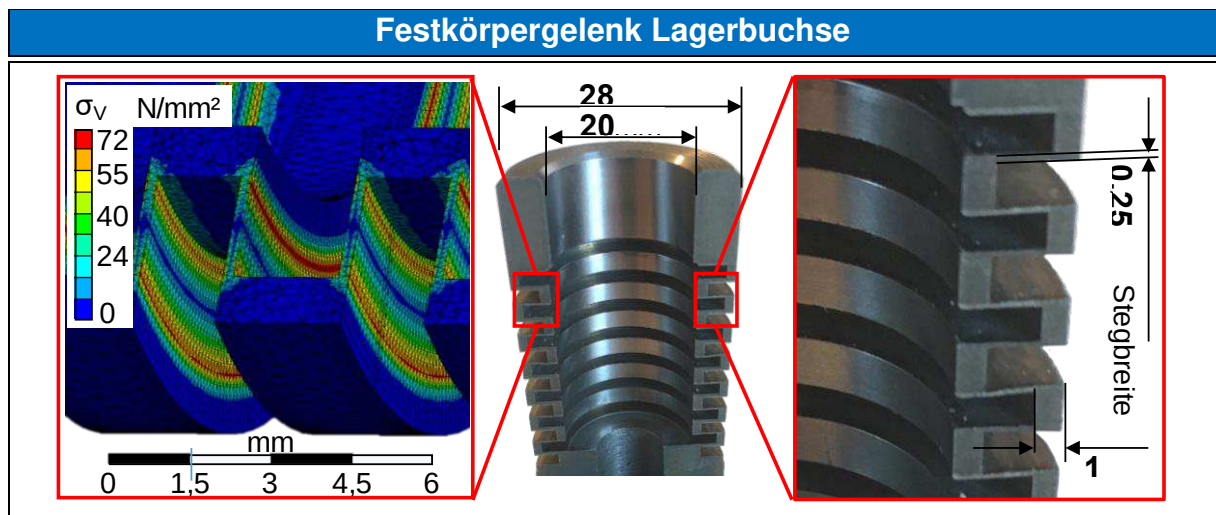


Abbildung 66: Axiale Lagerung der Piezo-Stacks: Detail einer aufgeschnittenen Lagerbuchse aus dem Werkstoff 42CrMo4 zur Bestimmung der geometrischen Abmessungen und Ergebnis einer statischen Verformungsanalyse zur Auswertung der Vergleichsspannung

Die obere radiale Lagerung der Werkzeugaufnahme erfolgt hingegen mittels einer klassischen Kugelumlaufbuchse, um die axiale Bewegungsrichtung frei zu halten. Neben der statisch-mechanischen Analyse werden unter Anwendung der Modalanalyse-Toolbox Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen die Antriebseinheit untersucht. Durch die Anwendung einer transienten Strukturanalyse ist es möglich, die durch den Strukturaufbau eingprägten Schwingungsformen zu ermitteln.

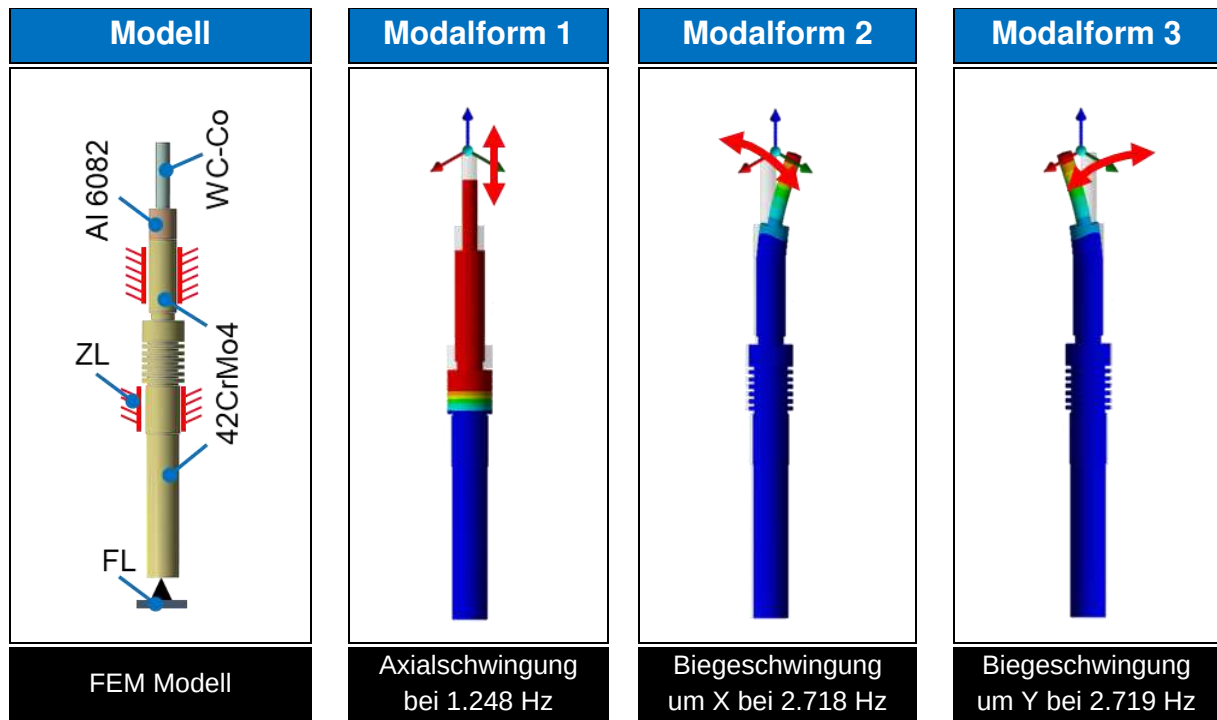


Abbildung 67: Ergebnis der FEM-Modalanalyse der Piezo-Antriebseinheit in ANSYS WB und Darstellung der Lagersituation im Modell

Dabei werden die Randbedingungen gleich der statisch-mechanischen Analyse gewählt. Die Gesamtmasse des Systems exklusive der beiden verbauten Piezo-Stacks beträgt 390 g. In Abbildung 67 ist der Aufbau der Simulation und das Ergebnis der Modalanalyse für die ersten drei Modalformen dargestellt. Die Masse des Umformwerkzeuges (aus Tabelle 39) kann mit 67 g im Durchschnitt angegeben werden. Aus den Lösungsinformationen der FEM-basierten Modalanalyse kann eine modale Masse der ersten Eigenfrequenz von 200 g entnommen werden. Diese ist für die erste Eigenfrequenz des Systems bestehend aus dem Werkzeug aus Wo-Co, der Einstellbuchse aus Al und der anteiligen Massen der Schwingbuchse aus 42CrMo4 in Tabelle 33 aufgelistet und kann entsprechend der folgenden Gleichung berechnet werden.

$$m_{Modal} = m_{Spann} + m_{Buchse} + m_{WKZ} \quad (26)$$

Dabei steht m_{Modal} für die bewegte Masse aus der FEM-Simulation, m_{Spann} beschreibt die Masse des Spannelements, welches das Hammerkopfwerkzeug aufnimmt, m_{Buchse} steht für die anteilig bewegte Masse des axial-Lagers und m_{WKZ} als Definition der Masse des Umformwerkzeuges. Auf Basis dieser Information ist es in weiterer Folge möglich, die in den Werkstoff eingebrachte Energie (E_{k0} , Energie vor dem Auftreffen des Werkzeuges auf der Oberfläche) über die Kinematik der Hammerkopfbewegung zu beschreiben.

$$E_{k0} = \frac{m \cdot v_{max}^2}{2} \quad (27)$$

Komponenten	Modale Masse (g)	Eigenfrequenz (Hz)	Gesamtmasse (g)
Antriebseinheit	200	1248	390

Tabelle 33: Modale Masse der Antriebseinheit als Ergebnis der FEM-Berechnung

Bei der Annahme einer idealen sinusförmigen Bewegung des Werkzeuges kann bei gegebener Frequenz f und Hub h eine Berechnung der Geschwindigkeit nach Gleichung (3) erfolgen. Die Ergebnisse der berechneten Energie sind folgend für zwei verschiedene Frequenzen bei einem konstanten Hub in Tabelle 34 aufgelistet.

Hub (μm)	Frequenz (Hz)	Max. Geschwindigkeit v_{max} (m/s)	E_{k0} (mJ)
55	200	0,0346	0,119
55	1250	0,216	4,66

Tabelle 34: Berechnete Umformenergie bei harmonischer Werkzeugbewegung

5.2.1 Aufbau der Aktorik zur Mikrostrukturierung

Der Aufbau des optimierten Aktors zur Mikrostrukturierung ist in Abbildung 68 zu sehen. Die im CAD-Modell markierten Bauteile bezeichnen die Einzelteile und sind in Tabelle 35 beschrieben.

Nr	Benennung	Funktion	Nr	Benennung	Funktion
1	Werkzeug	Strukturierung	9	Piezo	Bewegungseinheit
2	Einstellbuchse	Zentrierung	10	Gehäuse	Hauptbaugruppe
3	Aufnahme	Werkzeugaufnahme	11	Scheibe	Koppelement
4	Lager	Radialführung	12	Scheibe	Druckverteilung
5	Lagerbalg	Axiallager	13	Kugel	Kraftflusseinleitung
6	Aufnahme	Aufnahme Piezo	14	Anschluss	Signalübertragung
7	Kugel	Kraftflusseinleitung	15	HSK 63	Mech. Schnittstelle
8	Scheibe	Druckverteilung			

Tabelle 35: Komponenten und Eigenschaften des uniaxialen Piezo-Schwingtisches

Im Allgemeinen besteht der Piezo-Aktor analog zum Versuchsaufbau aus zwei axial in Serie verbundenen Piezo-Stacks vom Typ EPCOS AN07/8510A. Zur Vermeidung von Zugbelastungen während des Betriebs wird der Aktor mit einer definierten Kraft vorgespannt. Diese Vorspannung des Piezo-Stacks erfolgt durch den Lagerbalg (5). Mittels sphärischen Körpern (7), (13) und über Druckverteilungselemente (8), (11), (12) wird eine fehlerhafte Krafteinleitung verhindert. Eine ungewollte Zugbelastung kann somit unterbunden werden. Neben den Antriebskomponenten der Mikrostruktureinheit stellt das Bauteil mit der Position 2 eine einfache Möglichkeit dar, die Werkzeugspitze axial zu zentrieren.

PZ-MHP-Aktor

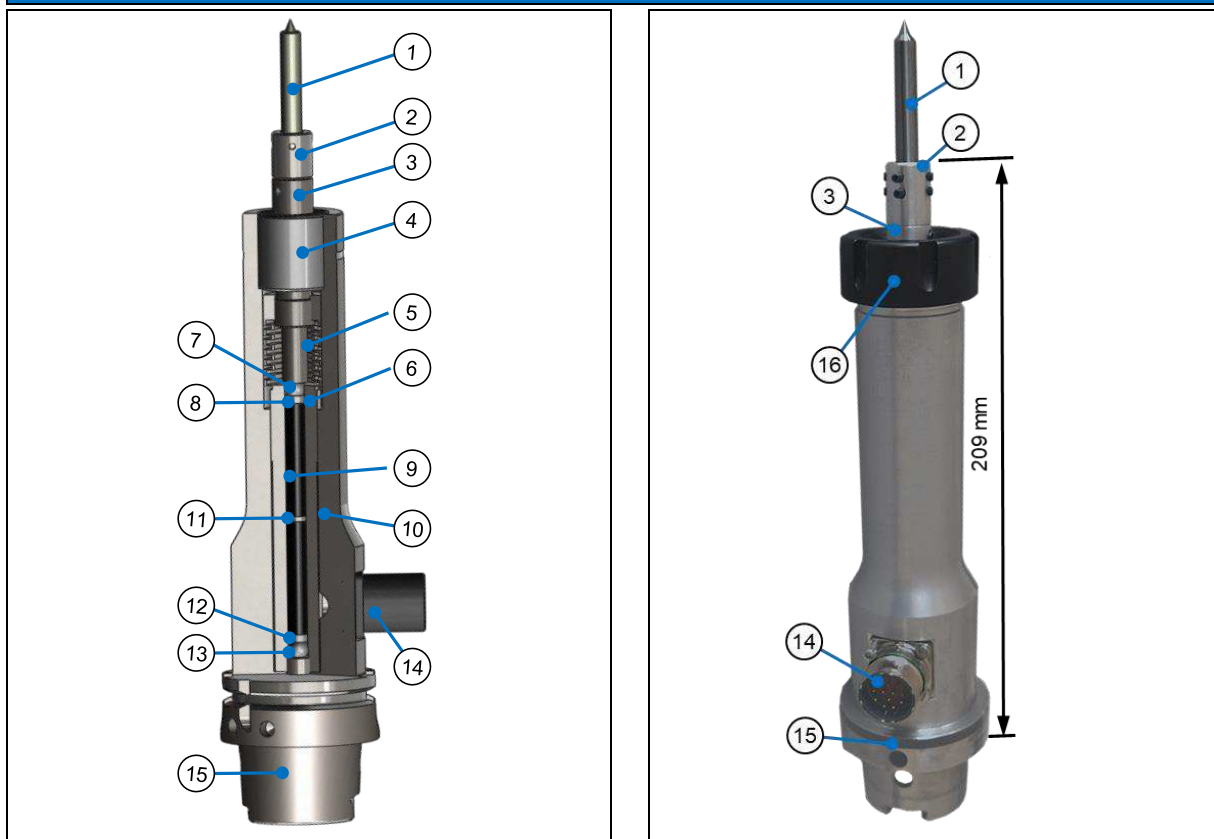


Abbildung 68: MHP-PZ-Aktor: links Teilschnittdarstellung im CAD, rechts: gefertigter Aktor in der Ausführung mit HSK-63 Schnittstelle; (1) Werkzeug; (2) Einstellbuchse; (3) Aufnahme; (4) Lager; (5) Lagerbalg; (6) Aufnahme; (7) Kugel; (8) Scheibe; (9) Piezo; (10) Gehäuse; (11) Scheibe; (12) Scheibe, (13) Kugel; (14) Anschluss; (15) HSK 63

In Tabelle 36 sind die physikalischen Eigenschaften des Piezo MHP-Aktors zusammengefasst. Die angegebene obere Grenzfrequenz von 1.250 Hz ist durch Bearbeitungsversuche mit den dargestellten maximalen Hübten verifiziert.

Kenngrößen	Kennwerte
Masse m (kg)	2,52 kg
Frequenz f (Hz)	0,1 - 1250
Hub h (μm)	1 - 55
Abmessungen L x D (mm)	209 x 53
Versorgungsspannung VAC	0 - 60
Werkzeugdurchmesser d (mm)	8

Tabelle 36: Eckdaten des PZ-MHP-Aktorsystems

In dem Fall der angegebenen Länge des Aktors bezieht sich diese von der Planfläche des Hohlenschaftkegels hin zur oberen Kante der Werkzeugzentrieraufnahme (2). Neben den mechanischen Komponenten bedarf es auch einer geeigneten Leistungselektronik um eine deterministische Auslenkung des Umformwerkzeuges zu realisieren. Für das hier vorgestellte System werden Leistungsverstärker eingesetzt

welche direkt die Piezo-Aktoren ansteuern. Wichtig hierbei ist, dass diese Verstärker entsprechend der Anwendung und der Piezo-Aktoren ausgewählt werden. Die eingesetzten Piezo-Aktoren setzen elektrische Energie in mechanische Energie um. Dabei ist der Energieinhalt der Aktorik wesentlich vom Volumen der Piezokeramik und der angelegten elektrischen Feldstärke abhängig. Ein wichtiger Aspekt für den oszillierenden Dauerbetrieb ist der benötigte Spitzenstrom. Dieser ist abhängig von der Form der Funktion. So können etwa Signalförmigkeiten wie Sinus-, Dreieck- und Rechtecksfunktion erzeugt werden, welche entsprechend unterschiedliche Leistungsaufnahme erfordern. Im Allgemeinen kann der momentane Strom am Piezo-Aktor über folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$I_{mom} = \frac{CdU(t)}{dt} \quad (28)$$

Dabei beschreibt dt eine Zeitspanne, in welcher der Aktor einen bestimmten Weg Δl durchführen soll. Die Spannungsänderung $dU(t)$ sowie die Kapazität C des Piezo-Aktors komplettieren diese Formulierung. Ausgehend von diesem Strom muss die Leistungselektronik in der Lage sein, den Spitzenstrom für die Funktion bereitzustellen. Mit der Oszillationsfrequenz f und der Zeit bis zum Anstieg der Funktion kann der Spitzenstrom für die drei zuvor genannten Funktionen folgendermaßen berechnet werden:

$$I_{peak,SINUS} = \pi C U_{pp} f \quad (29)$$

$$I_{peak,DREIECK} = C U_{pp} f \quad (30)$$

$$I_{peak,RECHTECK} = \frac{C U_{pp}}{dt_{Anstieg}} \quad (31)$$

Mit: C ... Kapazität in Farad; f ... Frequenz in Hz; U_{pp} ... Spitzenspannung in Volt
 $dt_{Anstieg}$... Anstiegszeit bis zum Spitzenwert in s

Die für das Piezoelement benötigte elektrische Wirkleistung, welche durch den Verstärker aufgebracht werden muss, kann mit der Gleichung 32 berechnet und entsprechend der Definition der elektrischen Leistung in einem Wechselfeld bestimmt werden:

$$P_m = \frac{1}{2} I_{peak} \hat{u} = \frac{1}{2} C U_{pp}^2 f \quad (32)$$

Mit: $\hat{u}$... Spitzenwert der Spannung am Piezo-Stack in Volt

Bei dem eingesetzten Verstärker handelt es sich um Endstufen des Typs PA60-650 mit einer Eingangsspannung von 0 - 10 V und einem der Eingangsspannung proportionalen, verfügbaren Ausgang von 0 - 60 V mit einer maximalen

Stromaufnahme von 0,65 A. Eine Überschreitung des zulässigen Ausgangsstroms wird mittels Anzeigeelementen an der Verstärkereinheit dargestellt, welcher ab einem Spitzenstrom von 0,65 A eine Signallampe aufleuchten lässt. Die Eingangsspannung an der Verstärkerseite kann, wie erwähnt, im Bereich von 0 - 10 V variiert werden. Im Falle der hier eingesetzten Verstärkereinheit kann dieses Signal mittels eines Frequenzgenerators oder über eine Analogschnittstellenkarte z.B. von National Instruments und über LabVIEW vorgegeben werden.



Abbildung 69: Vorder- und Detail-Ansicht des 8 Kanal Piezoverstärkers

5.2.2 AMesstechnische Evaluierung der Aktorik

Die Evaluierung des Piezo-Aktors erfolgte über die Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Systems. Es konnte durch eine Bestimmung der Eigenfrequenz und der Ausprägung der Schwingungsamplitude bei unterschiedlichen Signalformen und Versorgungsspannungen die Grundlage für eine mögliche Mikrostrukturierung geschaffen werden. Um die Schwingungscharakteristik des Piezo-Aktors beschreiben zu können, erfolgte die Erstellung einer „Prozesslandkarte“ des PZ-MHP-Systems zur Darstellung der möglichen Schwingungsformen. Unter Anwendung des bereits in dieser Arbeit beschriebenen wirbelstrombasierten Wegmesssystems vom Typ Micro Epsilon NCDT 3300 ist es möglich, die oszillierende Bewegung des Stößels zu visualisieren. Die Messkette zur Wegmessung ist in Tabelle 37 zusammengefasst. Zur messtechnischen Evaluierung des Systems zählt auch die Bestimmung des dynamischen Verhaltens der Mechanik.

Komponente	Hersteller	Typ
Wegmesssystem	Micro Epsilon	NCDT 3300
Datenerfassung	National Instruments	NI 9221
Datenverarbeitung	National Instruments	LabView 2016

Tabelle 37: Messkette zur Ermittlung der dynamischen Eigenschaften des Piezo-MHP-Aktors

Diese Untersuchungen sind Notwendig um einen optimalen Betriebspunkt des Systems zu bestimmen in der die Aktorik beispielsweise eine maximale Auslenkung erfährt. Aus diesem Grund umfassen die dynamischen Untersuchungen des PZ-MHP-Aktors die Bestimmung der mechanischen Eigenfrequenzen und der Schwingungseigenschaften des Systems. Zu Beginn erfolgte die messtechnische Ermittlung der mechanischen Eigenfrequenz unter Einleitung eines Frequenzsweep. Dabei wurde softwaretechnisch ein entsprechendes Signal erzeugt und dieser mittels einer D/A-Schnittstellenkarte an die Piezoverstärker übergeben. Durch das Einleiten eines Frequenzsweep – entsprechend der Gleichung 33 – im Zeitbereich konnte die Detektion der Eigenfrequenzen im System erfolgen.

$$f(t) = A_{(t)} \sin \left[\varphi_0 + 2\pi \left(f_0 t + \frac{k}{2} t^2 \right) \right] \quad (33)$$

$$k = \frac{f_1 - f_0}{T} \quad (34)$$

Mit: $A_{(t)}$... Zeitwert des Amplitudenwertes; φ_0 ...Phasenwinkel; f_0 ... Frequenz in Hz; k ... Änderungsrate der Schwingung; t ... Zeitwert der Schwingung in s; T ... Periodendauer in s

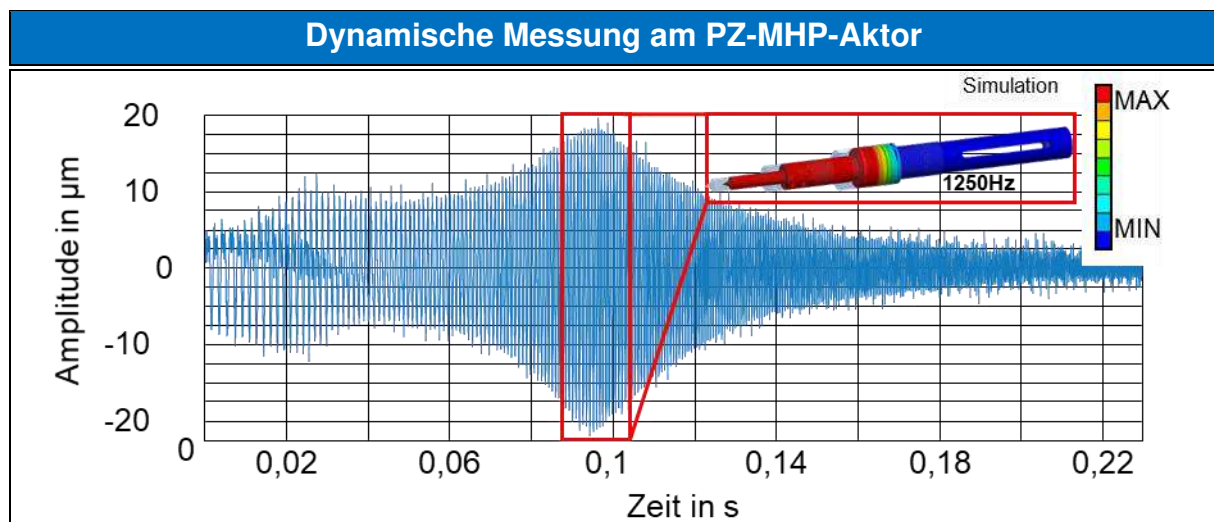


Abbildung 70: Amplitudenverlauf der Schwingbuchse nach Chirp-Signal-Anregung der Piezo-Stacks

Bei Übereinstimmung der Eigenfrequenz des Systems mit der Sweep-Anregungsfrequenz $f(t)$ führt dies zu einer Erhöhung der Amplituden im Signalverlauf. Nun kann durch die Frequenzänderungsrate k zu diesem Zeitpunkt genau die Anregungsfrequenz bestimmt werden. Eine Möglichkeit zur genauen Bestimmung der Frequenzen bei den entsprechenden Amplitudenüberhöhungen ist es, das Zeitsignal mithilfe der Fast-Fourier-Transformation in den Frequenzbereich überzuführen. Im Bereich der Eigenfrequenzen des Systems zeigen sich im Zeitbereich Amplitudenüberhöhungen, welche unter Anwendung einer FFT

zugeordnet werden kann. So ist die erste Amplitudenüberhöhung im Zeitbereich der ersten Modalform zuordenbar, welche entsprechend der FEM-Simulation eine Axialschwingung zeigt. Abbildung 70 zeigt das aufgenommene Wegsignal des Wirbelstromsensors an der Aktorspitze im Zeitbereich. Im Bereich von etwa 0,95 s ist ein Maximum der Amplitude zu erkennen, welches in diesem Fall einer Frequenz von $f = 1250$ Hz und der zuvor erwähnten Axialschwingung entspricht. Diese Modalform ist maßgeblich über die Festkörperlagerung definiert. Unter Verwendung der Software LabView können unterschiedliche Signalformen auf Softwareebene erstellt und mittels einer Schnittstellenkarte an den Piezoverstärker übergeben werden. Durch die Messung der Bewegung der Hammerkopfspitze ist es möglich, auch die Amplituden (Hub) bei unterschiedlichen Signalformen zu bestimmen.

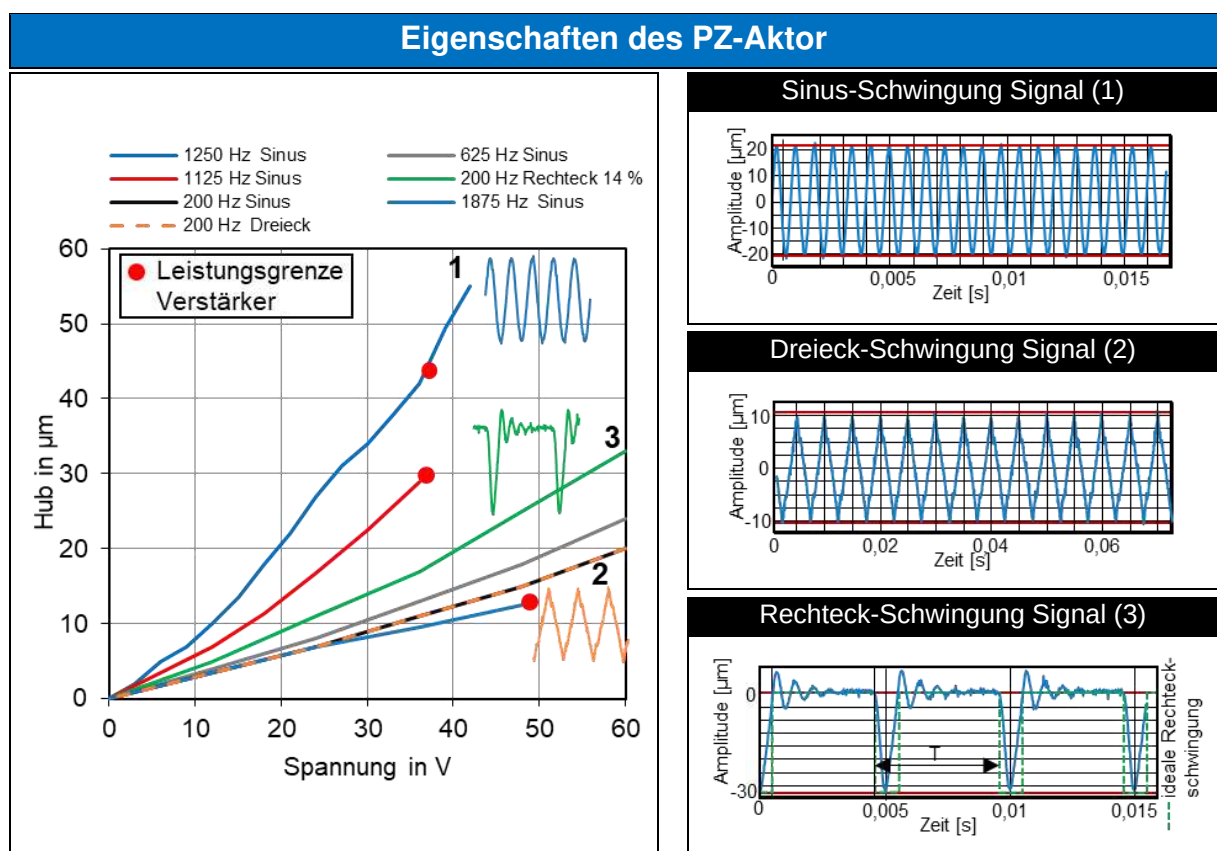


Abbildung 71: Schwingungssignale des MHP-PZ-Aktors: links Amplitude des Werkzeuges gemessen an der Werkzeugspitze in Abhängigkeit von der Speisespannung am Piezo, rechts: die Werkzeugbewegung der in links nummerierten Signale

In Abbildung 71 sind drei mittels LabView erzeugte Schwingungsformen bei unterschiedlicher Frequenz und Ausgangsspannung des Piezo-Verstärkers dargestellt. Man erkennt, dass im Bereich der Eigenfrequenz des Systems (bei $f = 1250$ Hz) bei geringer Ausgangsspannung der größte Hub h erreicht werden kann. In diesem Fall handelt es sich um eine Sinusschwingung (Signalform 1 in Abbildung 71), welche eine Amplitude von 21 μm aufweist (Spitze-Spitze 42 μm). Dabei gilt dieser Wert als Minimum und sogleich als Maximum für das Mikrostrukturieren, da die Länge

des Mikro-Umformwerkzeugs in unterster Stellung vermessen wird, um so eine maximale Eindruckstiefe in der Werkstückoberfläche zu erreichen. Aus dieser Auflistung der Signalformen und deren Schwingungsamplituden lässt sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Ausgangsspannung am Piezo-Verstärker und dem gemessenen Hub h am Werkzeug erkennen. Neben dem klassischen Sinussignal sind noch zwei weitere Signalformen als geeignet zur Strukturierung getestet worden. Dies ist zum einen eine Dreieckssignalform, welche die gleiche Proportionalität aus Spannung und Hub wie das Sinussignal aufweist und zum anderen eine Rechteckschwingung mit einem „duty cycle“ (dt. Tastgrad, beschreibt das Verhältnis zwischen Pulsdauer und Periodendauer) von 14%. Dieses Rechtecksignal weist bei einer niedrigen Frequenz von $f = 200$ Hz eine vergleichsweise hohe Amplitude auf und besitzt zum anderen eine steile Flanke des Signals, welches eine optimierte Eingriffsbedingung bei der Umformung schafft. Entsprechend der vorgestellten Gleichung zur Bestimmung des benötigten Spitzenstromes ist es möglich, diesen für die Signalformen in Abbildung 71 zu berechnen. Es ist ersichtlich, dass im Speziellen die Rechtecksfunktion mit einem Tastgrad von 14% einen deutlich höheren Spitzenstrom bei vergleichsweise niedriger Erregerspannung annimmt. Die für die Rechtecksfunktion benötigte Zeitdifferenz bis zum Anstieg der Amplitude kann aus dem Wegsignal bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 38 zusammengefasst.

Funktion	C	Frequenz f / Zeitschritt dt	U	I
SINUS	2,55 μF	200 Hz	60 V	96,1 mA
Rechteck	2,55 μF	250 μs	60 V	612,0 mA

Tabelle 38: Berechnete Spitzenstromwerte der PZ-Aktorik

5.3 Werkzeuge zur Mikrostrukturierung

Um Oberflächenstrukturen umformtechnisch herzustellen, bedarf es geeigneter Werkzeuge, Maschinensysteme und Aktoriken, welche in der Lage sind, diese Einzeleindrücke zu erzeugen. Im Falle des Werkzeuges gilt als Voraussetzung, dass die Härte des Umformwerkzeuges höher sein muss als die des zu bearbeitenden Werkstoffes. TABOR et al. [65] beschreiben, um eine plastische Deformation des Indenters (Kugel) zu vermeiden, muss die Zugfestigkeit des Indenter-Werkstoffes, 2,5-mal der des zu bearbeitenden Werkstoffes betragen. Da der hier eingesetzte Aktor zur Mikrostrukturierung primär auf metallischen Werkstoffen eingesetzt wird, finden primär Werkzeuge aus Hartmetall oder monokristallinem Diamant ihren Einsatz. Erste Strukturierungsversuche mit einem MKD-Werkzeug zeigten, dass die Spitze schon bei den ersten Werkstückkontakten bricht und somit nicht für die Mikrostrukturierung geeignet ist. Auch der minimale Spitzenradius von etwa 30 μm ist für die Erzeugung kleinster Strukturmerkmale limitierend. Diese weisen im Vergleich zum eingesetzten Warmarbeitsstahl X38CrMo5V-1 einen um den Faktor vier bis sechs höheren

Härtewert auf, wodurch die Anforderung nach TABOR et al. [65] erfüllt ist. Bei den Hartmetallwerkzeugen werden neben den unterschiedlichen Geometrieformen auch zwei verschiedene Hartmetallwerkstoffe eingesetzt.

Nr.	Werkzeug-form	Winkel in Grad	Korngröße in μm	Werkstoff	Dichte in g/cm^3	Co in %	HV30	Biege-Bruch in N/mm^2	Radius - Spitze
1	Kegel	45°	0,5 - 0,8	WC-Co	14,15	11,5	1650	3720	2 μm
2		55°	0,2		14,46	9	2100	4800	
3	Pyramide	45°	0,5 - 0,8		14,15	11,5	1650	3720	
4		55°	0,2		14,46	9	2100	4800	
5	Kegel	45°	0,5 - 0,8	WC-Co-AlCrN	14,15	11,5	3400	3720	10 μm

Tabelle 39: Eigenschaften der formgestalteten Werkzeuge zum Mikrostrukturieren

Werkzeuge mit einer Korngröße von etwa 0,2 μm und 9% Co zeigten in den Untersuchungen eine deutlich bessere Verschleißfestigkeit als jene Hartmetallwerkzeuge mit einer Körnung von etwa 0,5 - 0,8 μm und 11,5% Co. Dies kann auch auf die höhere Härte des HM mit 9% Co zurückzuführen sein. Die Formgebung der Strukturierungswerkzeuge erfolgt mittels eines Schleifprozesses. Dabei ist es möglich, einen Spitzenradius im Bereich von 1 - 2 μm anzufertigen. Zu den beiden HM-Werkzeugen mit unterschiedlicher Körnung wurde auch der Einsatz einer AlCrN-Beschichtung mit einer Schichtstärke von 4 μm getestet. Aufgrund dieser zusätzlich aufgetragenen AlCrN-Schicht steigt der Spitzenradius auf etwa 10 μm . In der Tabelle 39 sowie in der Abbildung 72 werden alle eingesetzten Werkzeuge und deren Eigenschaften aufgelistet.

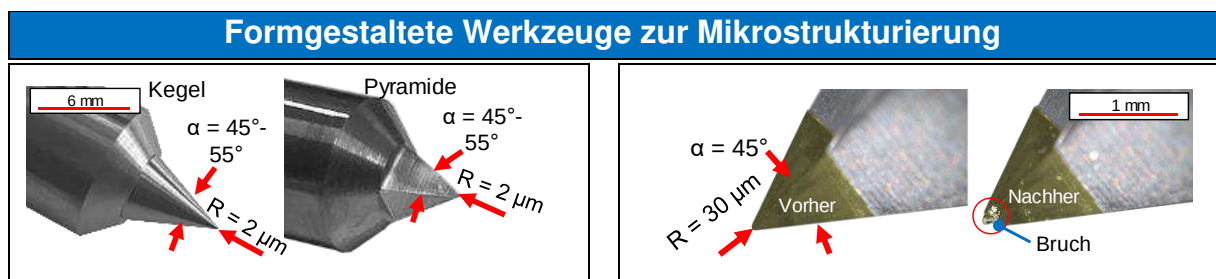


Abbildung 72: Strukturierungswerkzeuge aus WC-Co (9% und 11,5% Co) (links) und MKD (rechts)

Neben den Beispielen für Hartmetallumformwerkzeug ist in der Abbildung 72 auch ein pyramidenförmiges Diamantwerkzeug dargestellt. Darin ist das MKD-Werkzeug vor und nach einer Bearbeitung zu sehen. Deutlich zu sehen ist ein Bruch der Werkzeugspitze nach der Bearbeitung. Für dieses Diamantwerkzeug liegen leider keine genauen Werkstoffdaten vor welche Auskunft über die mechanischen Eigenschaften als auch die Ausrichtung der Kristallstruktur zulassen. Aus diesem Grund liegt der weitere Fokus, wie bereits erwähnt, auf WC-Co-Werkzeugen. Diese kleinsten Werkzeugraiden erfordern auch eine präzise Vermessung der

Werkzeuglänge, da es bereits bei einer minimalen Abweichung der Werkzeuglänge zu einem Bruch des Werkzeuges beim ersten Werkstückkontakt kommen kann. Die Herausforderung bei der Werkzeuglängenvermessung ist es, die Mikrospitze der eingesetzten Werkzeuge möglichst genau zu erfassen. Hierzu kommt ein optisches Werkzeugvermessungssystem zum Einsatz. Zwar befindet sich der Piezo bei der Werkzeugvermessung in spannungsfreiem Zustand, doch ist es durch den Einbau und durch die Vorspannung möglich, dass sich eine geringe Längenausdehnung am System einstellt. Um diesen Einfluss zu umgehen, wird zu Beginn der Werkzeugvermessung eine definierte Signalfom in die Piezo-Aktoren eigeleitet. Diese entspricht der Form einer gedämpften Schwingung.

$$y(t) = a \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\delta t} \quad (35)$$

Diese Funktion führt dazu, dass die Auslenkung des Piezo-Aktors exponentiell abklingt. Im Anschluss erfolgt ein Nullpunktabgleich mittels Abziehen des Mittelwertes. So kann sichergestellt werden, dass die Piezo-Aktoren in ihre neutrale Position gebracht werden. Nachdem dieser Schritt eingeleitet wurde, findet eine erste Vermessung der Werkzeuglänge unter Anwendung des optischen Werkzeugeinstellmessgerätes vom Typ Zoller Venturion 450 statt. Da die exakte Positionierung der Werkzeugspitze bei der Mikrostrukturierung an oberster Stelle steht, erfolgt die finale Einmessung der Werkzeuglänge direkt an der Maschine unter Anwendung eines taktilen Längenmesssystems, welches auf Basis einer Kurzschlussmessung arbeitet. Unter Kombination der hier vorgestellten Vorgehensweisen ist es möglich, die Werkzeuglänge entsprechend der Anzeigegenauigkeit der Maschine einzustellen.

5.4 Versuchsdurchführung und Auswertung

Um die Eignung der vorgestellten Piezo-Aktoren zur Erzeugung von Mikrostrukturen zu verifizieren, erfolgen Strukturierungsversuche am Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-1 (1.2343). Die Oberflächenhärte dieses Werkstoffes liegt bei $357 \pm 19,9$ HV1. Entsprechend der DIN 8580 lässt sich die Herstellung von Mikrostrukturen unter Anwendung der MHP-Technologie in die mechanischen Fertigungsverfahren eingliedern und fällt dabei die Unterkategorie Umformen. Da unter Anwendung des MHP-Prozesses lediglich eine Negativstruktur an der Bauteiloberfläche herstellbar ist, ist ein weiterer Schritt notwendig, um beispielsweise die eingangs erwähnte hydrophobe Oberflächenstruktur zu erzeugen. In Abbildung 73 links sind symbolhaft die Merkmale einer Negativstruktur dargestellt, welche beispielsweise mittels des MHP-Prozesses realisiert werden können. Entsprechend der Nomenklatur zur MHP-Bearbeitung sind hier die Tiefe der Struktur mit dem Parameter t_p sowie die Abstände in Längs- als auch in Querbearbeitungsrichtung mit a und s äquivalent zum Eindruck- und zum Zeilenabstand gekennzeichnet. Ein möglicher Ansatzpunkt, um diese negative Geometrieform als positive Geometrie auf eine Bauteiloberfläche zu

bringen, ist das Spritzgussverfahren, wie es z.B. in [111] zur Herstellung von superhydrophoben Oberflächen angewendet wird.

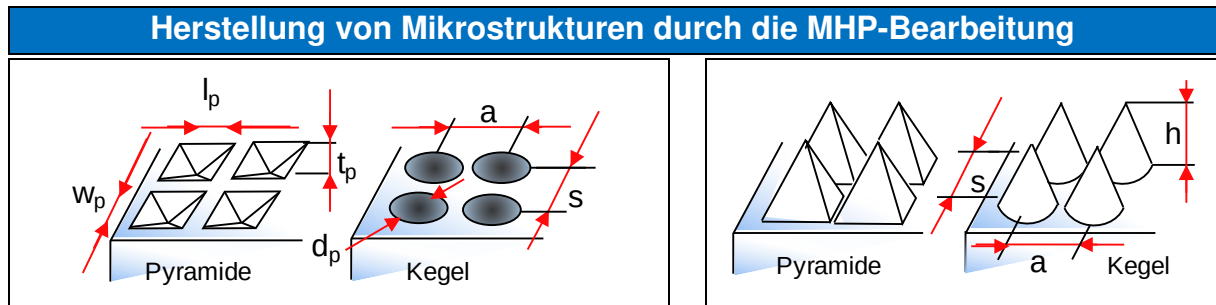


Abbildung 73: Merkmale von Mikrostrukturen als Negativ (links) und Positivgeometrie am Bauteil (rechts)

Auf Basis entsprechender Literatur, wie z.B. [111], wurde für die Negativstruktur die gezeigte Kegel- und Pyramidenstruktur ausgewählt, welche eine Höhe von $h = 5 - 20 \mu\text{m}$ im jeweiligen Abstand von $a = 20 - 30 \mu\text{m}$ zueinander aufweisen soll. Um diese kleinsten Strukturmerkmale herstellen zu können, bedarf es hoher Anforderungen an die Oberflächenqualität des zu bearbeiteten Bauteiles sowie an die eingesetzten Umformwerkzeuge. Im Falle der Oberflächenrauheit ist hierbei ein Wert auf der Werkstückoberfläche von etwa $Ra \leq 0,04 \mu\text{m}$ bei einer ausreichenden Ebenheit der Flächen anzustreben. Um die Eignung der Piezo-Aktorik zur Herstellung von Mikrostrukturen zu verifizieren, wurden Strukturierungsversuche auf der Bearbeitungsmaschine vom Typ DMG Mori DMU 75 monoBLOCK durchgeführt.

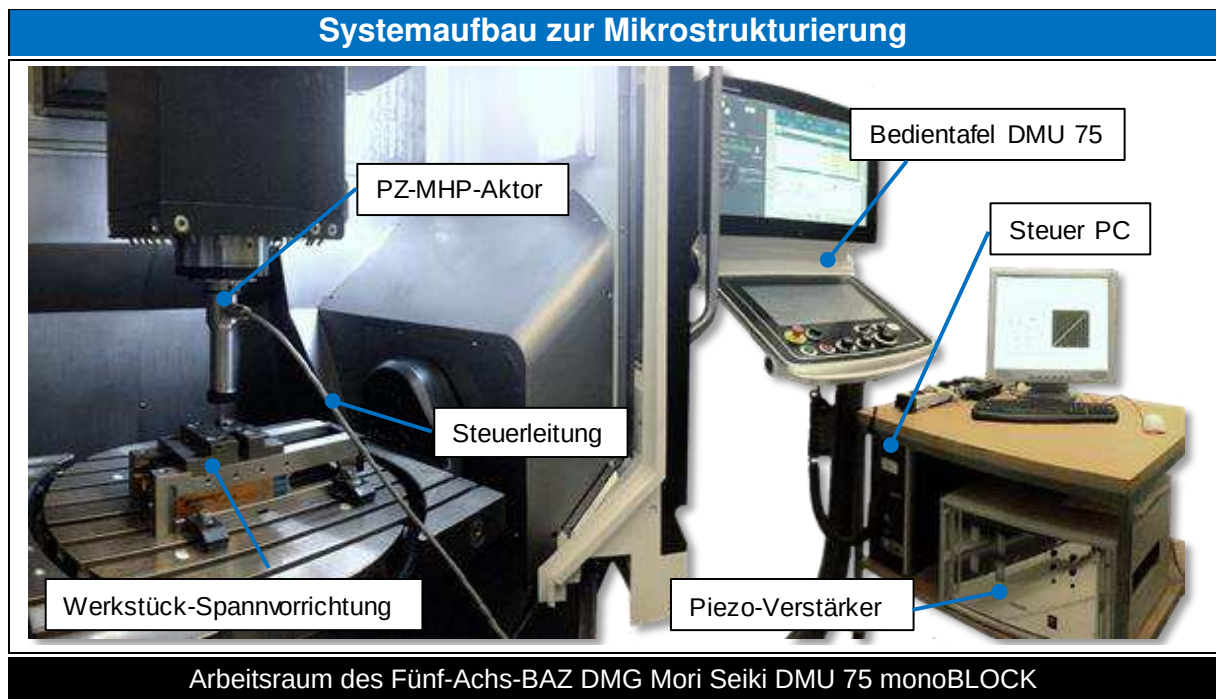


Abbildung 74: Systemaufbau des PZ-Aktors zum Mikrostrukturieren in dem Fünf-Achs-BAZ DMG DMU 75 monoBLOCK

Der Versuchsaufbau hierzu ist in Abbildung 74 abgebildet. Anzumerken ist, dass sämtliche Bearbeitungsversuche unter Raumtemperatur durchgeführt wurden. Abbildung 74 zeigt den MHP-PZ-Aktor im Arbeitsraum des Fünf-Achs-BAZ DMG DMU 75 monoBLOCK inklusive Piezo-Verstärker und Steuer-PC. Im Gegensatz zu klassischen Bearbeitungsaufgaben eines Fräsbearbeitungszentrums muss bei der Verwendung des MHP-Piezo-Aktors die Leitung zur Leistungsübertragung aus dem Arbeitsraum nach außen geführt werden. Diese Anschlussleitung ist direkt mit dem Piezo-Verstärker gekoppelt, welcher als Eingangsgröße ein Steuersignal der angeschlossenen Recheneinheit erhält. Die Einwechselung der Aktorik in die Werkzeugspindel und der Anschluss der Steuerleitung erfolgt in dieser Konfiguration aufgrund der fehlenden Greiferrillen im Werkzeughalter und der Verbindung zur Leistungsübertragung manuell. Um zunächst die Eignung des Systems zur Herstellung von Oberflächenstrukturen zu überprüfen, erfolgte der Einsatz eines AlCrN-beschichteten Werkzeug. Dieses weist im Vergleich zu unbeschichteten Werkzeugen eine größere Oberflächenhärte auf (Tabelle 39). Die Grundlage dieser Werkzeuge entspricht dem 45°-Kegel-Werkzeug, welches durch den zusätzlichen Schichtauftrag einen Werkzeugspitzenradius von rund 20 µm aufweist (Tabelle 39). Auf Basis des größeren Spitzenradius des Werkzeuges durch die Beschichtung muss der anzuwendende Eindruckabstand zunächst bestimmt werden. Bei einem Werkzeugwinkel von $\alpha = 45^\circ$, einem Werkzeugspitzenradius $R = 10 \mu\text{m}$ und einer Tiefe der geometrischen Struktur t_p von 20 µm und einem Schenkelwinkel $\beta = 180^\circ - \alpha$, ergibt sich ein Eindruckdurchmesser d_i von 29,93 µm.

$$d_i = 2 \cdot \left(\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) - R \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) + t_p \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) + R \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) \quad (36)$$

Kegelstruktur	
Spitzenwinkel-Werkzeug (°)	45
Werkstoff Werkzeug	WC-Co (11% Co) mit AlCrN-Beschichtung
Werkzeugspitzenradius (µm)	20
Frequenz f (Hz)	200
Hub h (µm)	30
Signalform	Rechteck $\square$ mit 14% Tastgrad
Vorschubgeschwindigkeit v_f (mm/min)	960
$s = a$ (µm)	80
Bearbeitungszeit t (min)	45
Anzahl der Einzeleindrücke	541.750
Abstand zur Oberfläche (µm)	5
Bearbeitungsstrategie	Zeilenbearbeitung

Tabelle 40: Bearbeitungsparameter bei der Piezo-Mikrostrukturierung mit AlCrN-beschichteten 45°-Kegel-Werkzeug aus WC-Co

Bei den eingangs genannten Werten aus der Literatur betreffend den Abstand der einzelnen Strukturmerkmale, würde bei einem Eindrucksdurchmesser d_i von 29,93 µm nahezu eine Überlappung der einzelnen Eindrücke die Folge sein. Entsprechend

dieser Berechnung wurden die Größen des Eindruckabstandes sowie des Zeilenversatzes ($s = a$) mit $80\ \mu\text{m}$ festgelegt. Die gesamten Versuchsparameter sind in Tabelle 40 zusammengefasst. Um diesen Eindruckabstand in Bearbeitungsrichtung realisieren zu können, muss der Vorschub mit $960\ \text{mm/min}$ gewählt werden. Diese Parameter bilden die Grundlage für die Strukturierung einer ebenen Fläche mit den Abmaßen von $106\ \text{mm} \times 31\ \text{mm}$. Dies entspricht rund dem 13-fachen der zuvor bearbeiteten Flächenbereiche ($16\ \text{mm} \times 16\ \text{mm}$). Das Ergebnis der Bearbeitung ist in Abbildung 75 abgebildet. Das strukturierte Werkstück aus dem Werkstoff X38CrMoV5-1 (1.2343) ist dadurch gekennzeichnet, dass auf der Oberfläche 541.750 Einzeleindrücke vorliegen. Zur besseren optischen Darstellung der Oberflächenstruktur wurde diese entlang der Randbereiche freigestellt und in der Mitte mit einem Schriftzug versehen welcher eine Linienbreite von $1\ \text{mm}$ aufweist. Die Bearbeitungszeit dieser strukturierten Oberfläche liegt bei etwa $45\ \text{min}$. Ausgehend von diesem Versuch einen großflächigen Bereich zu strukturieren, wurden in einem nächsten Schritt zwei unterschiedliche Typen von unbeschichteten Werkzeugen eingesetzt. Dabei handelt es sich um geschliffenes WC-Co-Hartmetall in der Form eines Kegels sowie einer Pyramide.

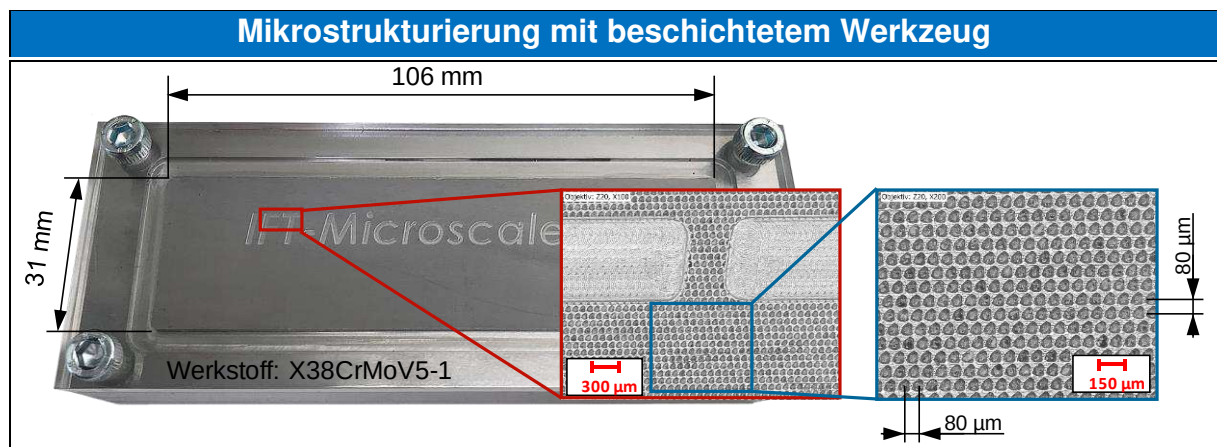


Abbildung 75: Mikrostruktur am Werkstoff X38CrMoV5-1 (1.2343) mit AlCrN-beschichtetem Hartmetallwerkzeug

Der Einsatz von unbeschichteten Hartmetallwerkzeugen soll es nun ermöglichen kleinste Oberflächenstrukturen herzustellen. Die für diesen Versuch angewendeten Bearbeitungsparameter zur Mikrostrukturierung als auch die Beschreibung der Werkzeuge sind der Tabelle 41 zu entnehmen. Auf Basis der Gleichung 36 kann für die Werkzeuge in Tabelle 41 (55°) ein Eindruckdurchmesser von $d_i = 23,2\ \mu\text{m}$ mit $t_p = 20\ \mu\text{m}$ berechnet werden. Als Signalfom wurde ein Rechtecksignal mit einem Tastgrad von 14% gewählt. Diese Mikrostrukturen sind auf einem Flächenbereich von $16\ \text{mm} \times 16\ \text{mm}$ aufgebracht, wobei die Werkstückoberfläche ein Maß von $20\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ aufweist.

Bearbeitungsparameter	Pyramidenstruktur	Kegelstruktur
Spitzenwinkel-Werkzeug α (°)	55	55
Werkstoff des Werkzeugs	WC-Co (9% Co)	
Werkzeugspitzenradius R (μm)	2	
Frequenz f (Hz)	200	
Amplitude h (μm)	24	
Signalform	Rechteck mit 14% Tastgrad	
Vorschubgeschwindigkeit v (mm/min)	360	
$s = a$ (μm)	30	
Anzahl der Einzeleindrücke	285.156	
Positionierung über die Oberfläche (μm)	5	
Bearbeitungsstrategie	Einseitige Zeilenbearbeitung	

Tabelle 41: Bearbeitungsparameter bei der Piezo-Mikrostrukturierung mit WC-Co (9% Co) Werkzeugen

Dies resultiert bei den gegebenen Bearbeitungsparametern in 284.089 Einzeleindrücken. Die Bearbeitungshauptzeit für diese Strukturierung liegt bei etwa 24 min, was einer Flächenleistung von 0,11 cm²/min entspricht. Die Ergebnisse der Strukturierungsversuche mit dem Piezo-angetriebenen MHP-Schwingtisch sind in Abbildung 76 zu sehen.

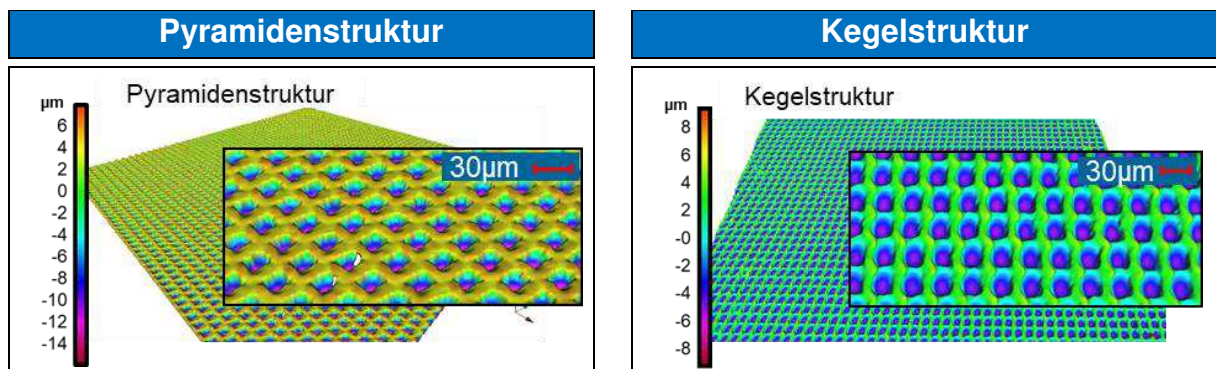


Abbildung 76: Mikrostruktur am Werkstoff X38CrMoV5-1 (1.2343), links: strukturierter Bereich durch die Abformung einer 55°-Pyramide, links: strukturierter Bereich durch Abformung eines 55°-Kegels

Die Aufnahmen in dieser Abbildung zeigen das Ergebnis einer Falschfarbendarstellung der optischen Oberflächenvermessung unter Anwendung des optischen 3D-Mikrokoordinatenmesssystems Infinite Focus G5. Die hier gezeigten Aufnahmen entstammen der mittleren Position (Abbildung 77) des bearbeiteten Bereiches ($X = 8$ mm, $Y = -8$ mm) nach rund 141.000 Einzeleindrücken. In der dargestellten Abbildung ist deutlich die Form des Werkzeuges erkennbar. Links zu sehen ist die abgeformte Pyramidenstruktur, rechts ist die Kegelstruktur mit jeweils 55° - Spitzenwinkel zu erkennen. Die zeilenförmige Bearbeitung findet jeweils zur positiven X-Richtung statt. Im Falle der Pyramidenstruktur sind hier über die Falschfarbendarstellung Eindrucktiefen von ca. $t_p = 14$ µm bis 18 µm festzustellen. Die

Kegelstruktur weist in etwa Tiefen von 12 μm bis 13 μm auf. Im Falle der 55°-Pyramidenstruktur sind nachfolgend Detailaufnahmen einer REM-Aufnahme (Typ JCM-5000 NeoScope) zu sehen (siehe Abbildung 77). Entsprechend der gekennzeichneten Bereiche (links oben, mitte, unten) sind diese Bereiche detailliert hervorgehoben. Beginnend bei der Position links oben sind die ersten Einzeleindrücke und der versetzte Eindrucksabstand der folgenden Zeile gut zu erkennen. Es fällt in dieser Darstellung sofort die zunehmende Strukturgröße auf, welche sich auch in der Eindrucktiefe widerspiegelt. Nachdem die oszillierende Bewegung des Schwingtisches konstant in der Amplitude betrieben wird und der Bearbeitungspfad keine Verrundung im Anfangsbereich vorsieht, ist davon auszugehen, dass diese verminderte Eindrucktiefe im Randbereich der Positionierung des Werkzeuges zu Startposition zuzuschreiben ist. Der Ebenheitswert der polierten Oberfläche liegt unter 1 μm . Auffallend hierbei ist, dass sich trotz der geringen Eindrucktiefe ($t_p < 10 \mu\text{m}$) die Pyramidenform des Werkzeuges sehr ausgeprägt abbilden lässt. Betrachtet man die beiden weiteren Positionen der REM-Aufnahmen, so sind die Pyramidenformen des Werkzeuges bis zur letzten Zeile gut zu erkennen.

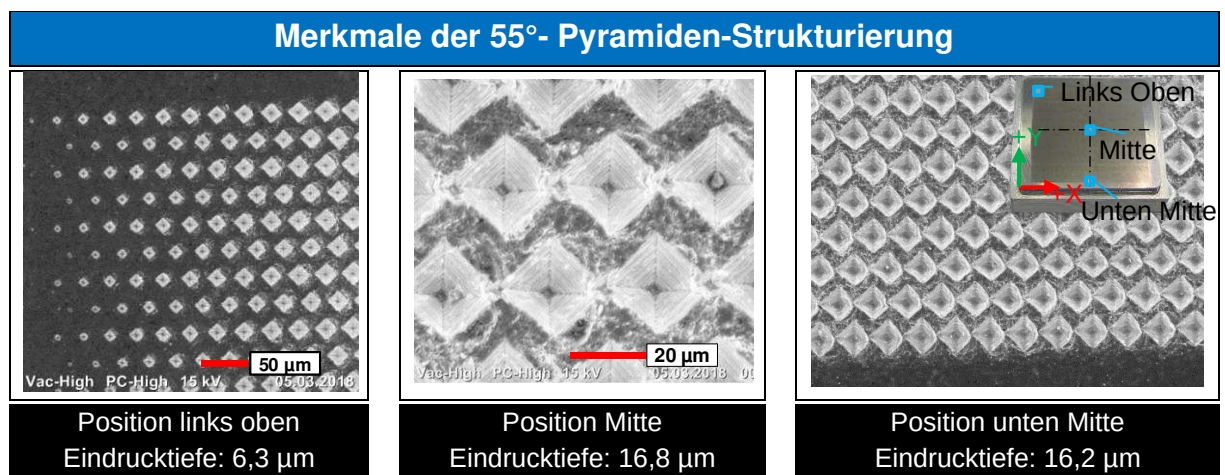


Abbildung 77: Detail der Piezo-gehämmerten Mikrostruktur am Werkstoff X38CrMoV5-1 (1.2343) mit 55°-Pyramiden-Werkzeug aus WC-Co mit 9% Co, links: Position links Oben (Anfangsbereich der Strukturierung) mitte: mittlere Position der Struktur am Bauteil, rechts: Strukturausprägung der letzten Zeile

Für die Bearbeitung der Fläche sind bei einem Bahnabstand von 30 μm 533 Zeilen notwendig. Beträgt die Eindrucktiefe zu Beginn noch $t_p = 18,66 \mu\text{m}$, so sinkt diese in der letzten Bearbeitungszeile 533 auf etwa $t_p = 16,2 \mu\text{m}$. Dies entspricht somit einem Unterschied in der Eindrucktiefe von $\Delta t_p = 2,46 \mu\text{m}$. Bei einer Strukturtiefe von 16,8 μm ist kann eine Seitenlänge der Pyramidenbasis von 20,2 μm im Mittel bestimmt werden. Aus t_p/d_i kann folgend das Aspektverhältnis t_p/d_i berechnet werden. Dies liegt für den hier betrachteten Bereich der Strukturierung bei etwa 0,83. Im Vergleich zu STEITZ [67] liegt hier eine 3 – 27faches Aspektverhältnis der erzeugten Mikrostruktur vor. Am Werkzeug selbst (Abbildung 78) ist ein deutlicher Verschleiß ersichtlich. Betrachtet man das bereits verschlissene Werkzeug so fällt sofort auf, dass lediglich

der Bereich Rund um die Spitze einem Verschleiß unterliegt. Deutlich zu erkennen ist auch der Bereich der mit dem Werkstück in Kontakt getreten ist. Hierbei kann ein Wert von etwa 18,5 mm gemessen werden.

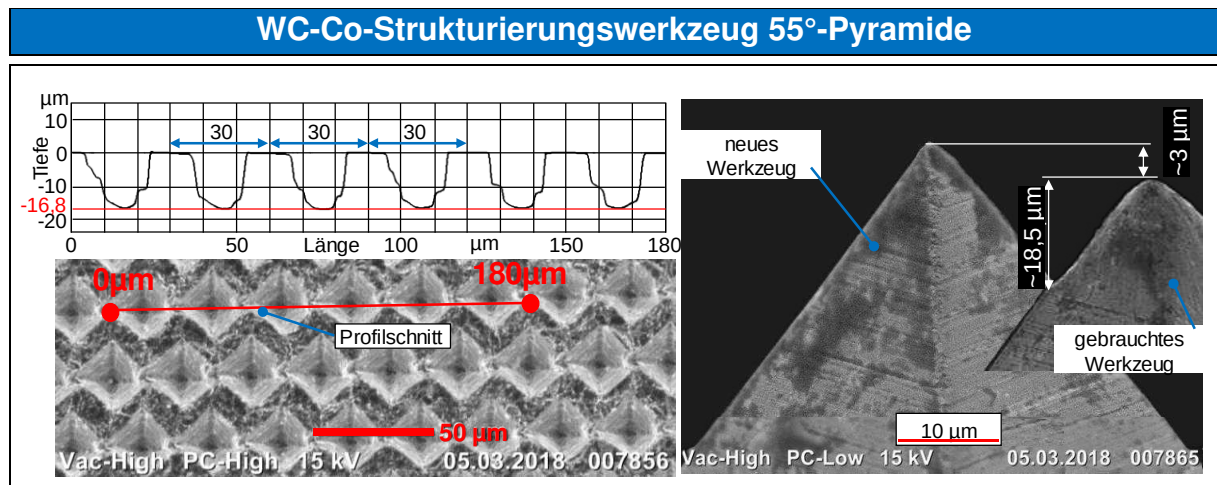


Abbildung 78: REM-Aufnahmen einer neuen und eingesetzten WC-Co-Werkzeugspitze nach 285.156 Einzeleindrücken im Werkstoff X38CrMoV5-1 (1.2343) und Profilschnitt der erzeugten Strukturierung

Bei einem Längenverschleiß von ca. 3 µm zur Ausgangslänge nach 285.156 Einzeleindrücken kann daraus etwa ein Bereich von 21,5 µm definiert werden welcher im Eingriff mit dem Werkstück war. Für die Bearbeitung der Fläche mit von 16 mm x 16 mm sind bei einem Bahnabstand von $s = 30 \mu\text{m}$ 533 Zeilen notwendig. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse der Strukturierung, welche mittels des 55°-Kegelwerkzeuges und den Parametern aus Tabelle 41 erstellt sind, ist in Abbildung 79 zusammengefasst. Die hier gezeigten Aufnahmen zeigen ein sehr gleichmäßiges Strukturbild in der Mitte der Bearbeitungsfläche.

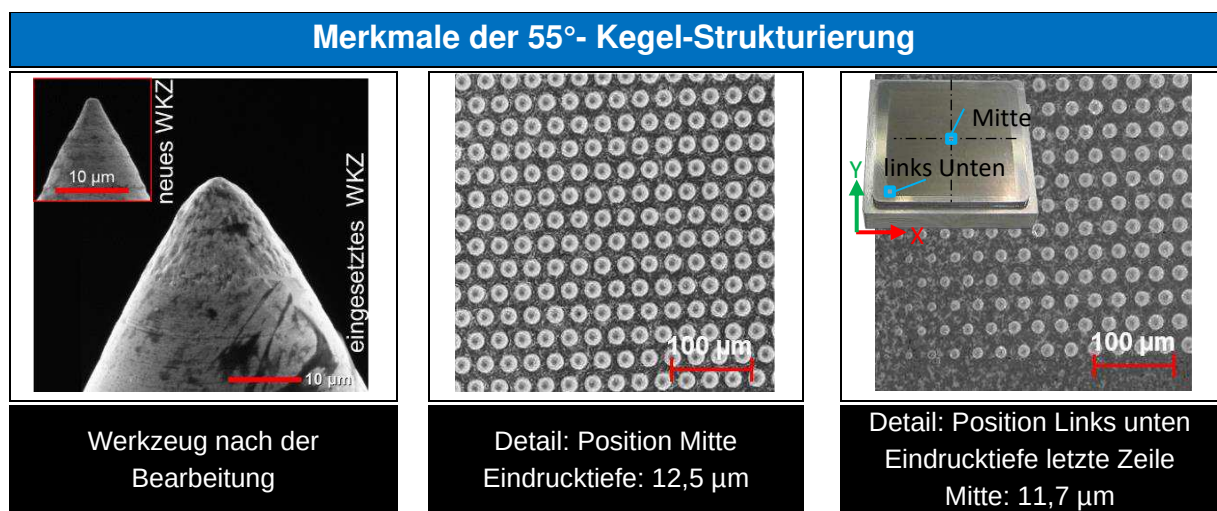


Abbildung 79: REM-Aufnahmen der Mikrostruktur am Werkstoff X38CrMoV5-1 mit 55°-Kegel-Werkzeug aus WC-Co (9% Co), links: Werkzeug Vor- und Nach der Umformung, mitte: mittlere Position der Struktur am Bauteil, rechts: Struktur links unten mit steigender der Strukturtiefe

Gleich dem 55° - Pyramidenwerkzeug findet hier auch ein Werkzeugverschleiß statt, welcher die Tiefe der Einzeleindrücke über den Bearbeitungsverlauf abnehmen lässt. Am Werkzeug ist ein Bereich von etwa 15 µm in der Höhererstreckung zu erkennen, welcher Verschleißerscheinungen aufweist.

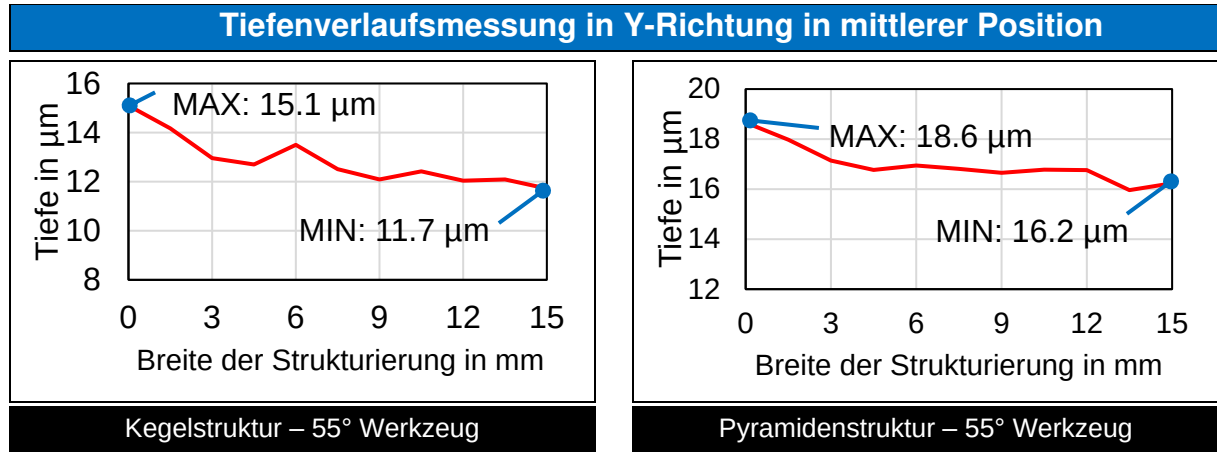


Abbildung 80: Tiefenverlaufprofil über die gesamte bearbeitete Fläche in mittlerer Messposition der Strukturierung, links: Tiefenverlauf für die 55°-Kegelstruktur, rechts: Tiefenverlauf für die 55°-Pyramidenstruktur

Wie bereits erwähnt, findet durch den Verschleiß der Werkzeugspitze auch eine sukzessive Minderung der Eindrucktiefe statt. Die deutlich abgerundete Werkzeugspitze ist in Abbildung 79 links zu erkennen. Die Auswirkung des Werkzeugverschleißes kann durch eine Messung der Eindrücktiefen über die gesamte Breite der Bearbeitungsbereich visualisiert werden. Das heißt, dass in der Mitte jeder einzelnen der 533 Zeilen die Eindrucktiefe bestimmt wurde und über die Messlänge aufgetragen wurde. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 80 dargestellt. Zu sehen sind hier die Ergebnisse zweier Profilschnitte der beiden bearbeiteten Proben. In beiden Fällen nimmt die Eindrucktiefe von der ersten bis zu letzten Bearbeitungszeile ab, was maßgeblich dem Werkzeugverschleiß zugeordnet werden kann. Im Falle der Kegelstrukturierung ist eine Abnahme der Eindrucktiefe von $t_p = 3,4$ µm zu verzeichnen. Die Abnahme der Pyramidenstruktur liegt bei etwa $\Delta t_p = 2,4$ µm über den gesamten Verlauf der Bearbeitung. Unter der Anwendung von Gleichung 36 kann auf Basis der hergestellten Strukturiefen aus der Abbildung 80 der Eindruckdurchmesser anhand eines neuen Werkzeuges mit einem Spitzenradius von 2 µm und einem Werkzeugwinkel von 55° berechnet und damit auch das Aspektverhältnis t_p/d_i bestimmt werden. Gleich den Ergebnissen aus den Messungen zeigt sich hier ein Wert für das Aspektverhältnis beider Strukturen zu Beginn der Umformung von über 0,8 (Tabelle 42:). Ausgehend von den hier gefertigten mechanischen Oberflächenstrukturierungen gilt es nun die Eignung dieser im Bereich von Spritzgussformen zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde in einem nächsten Schritt versucht die Mikrostrukturen unter Anwendung eines Spritzgussprozesses auf ein Kunststoffbauteil abzuformen.

Kegelstruktur			Pyramidenstruktur		
tp in μm	d_i in μm	tp/d_i	tp in μm	d_i in μm	tp/d_i
15,1	18,1	0,83	18,6	21,8	0,85

Tabelle 42: Berechnetes Aspektverhältnis aus Strukturtiefe t_p zu Strukturdurchmesser d_i auf Basis eines neuen Werkzeuges und gemessener Strukturtiefe t_p

5.5 Strukturierte Formeinsätze

Die Intention zur Herstellung von Mikrostrukturen ist unter anderem das biomimetische Übertragen von natürlichen Phänomenen auf technische Produkte und Anwendungen. Als Beispiele sind hierzu Phänomene aus der Natur zu nennen, welche etwa die Eigenschaft einer hydrophoben (wasserabweisende) Oberfläche einer Lotusblüte zeigen. Um nun diese Eigenschaften auf technische Produkte zu übertragen, bedarf es geeigneter Fertigungsverfahren. Mikrostrukturierungen an Bauteiloberflächen, welche die genannten Eigenschaften verstärken, können unter der Anwendung unterschiedlicher Fertigungsverfahren erzeugt werden.

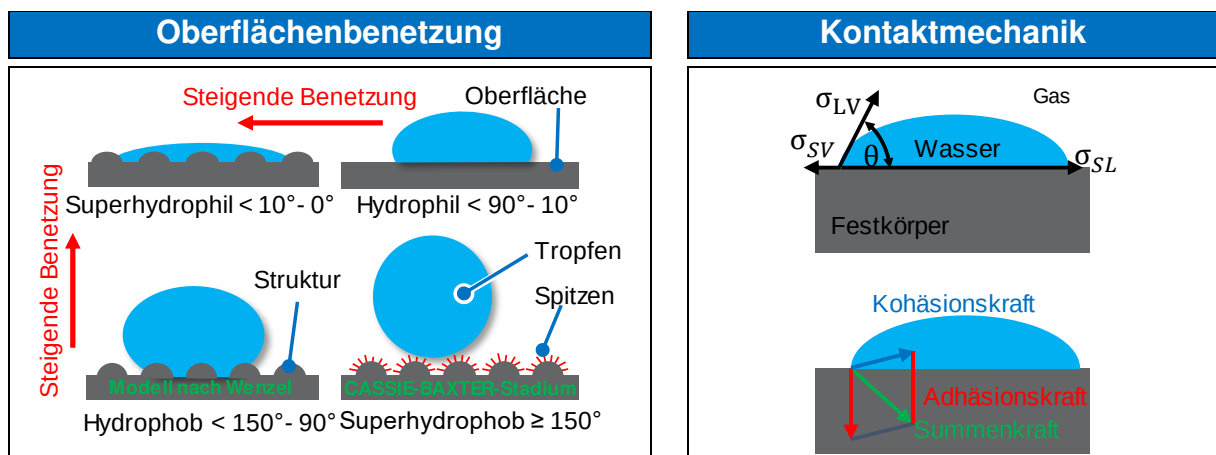


Abbildung 81: Benetzungsverhalten von Oberflächen unter Einfluss der Oberflächengestaltung nach [114] (links) sowie die Definition des Kontaktwinkels nach Young [115] und der Kraftreaktion (rechts)

Der erwähnte wasserabweisende Effekt der Lotusblüte ist stark abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und somit von der Mikrostruktur an der Bauteiloberfläche. Werden glatte, hydrophobe Oberflächen mit einer rauen Oberfläche kombiniert, so ist es möglich, eine extreme Wasserabstoßung an der Oberfläche eines Bauteiles zu generieren [114]. Es wird in diesem Zusammenhang von einer sogenannten superhydrophoben Oberfläche gesprochen, wie in Abbildung 81 symbolhaft dargestellt ist. Dabei spricht man von Hydrophobie, sobald ein Kontaktwinkel über 90°-150° zwischen Tropfen und Oberfläche vorliegt. Dieser Benetzungszustand einer rauen Oberfläche kann über die Gleichung nach WENZEL beschrieben werden [116]. Voraussetzung für die Gleichung ist, dass die Flüssigkeit zwischen den Strukturen zur Oberfläche dringt. Das Verhältnis aus dem Kontaktwinkel einer strukturierten

Oberfläche θ_m (Wassertropfen verhält sich statisch und ändert sich nicht) und einer glatten Oberfläche θ (Kontaktwinkel ändert sich durch zunehmende Benetzung der Oberfläche, siehe [114]).

$$\frac{\cos\theta_m}{\cos\theta} = r \quad (37)$$

Liegt ein Kontaktwinkel über 150° vor wird der Benetzungszustand als superhydrophob beschrieben. Der hier vorgestellte superhydrophobe Effekt ist als CASSIE-BAXTER-Stadium bekannt. Dabei berührt der Wassertropfen lediglich die feinen Spitzen der Struktur, wodurch sich die Adhäsionskräfte mindern und es so zu einem leichteren Abrollen des Tropfens kommt, wie dies in [114] beschrieben ist. Durch die fein ausgeprägten Spitzen kommt es zu Lufteinschlüssen zwischen der Flüssigkeit und dem Festkörper. In [114] wird hierbei von einer heterogenen Benetzung gesprochen.

$$\cos\theta_m = r' \cdot f \cdot \cos\theta + f - 1 \quad (38)$$

Die Wenzel-Gleichung wird durch die Faktoren r' (Rauheitsfaktor der benetzten Oberfläche) und f (Anteil der projizierten Fläche) ergänzt (siehe[114]). Neben dieser Darstellung der Benetzungszustände ist in Abbildung 81 rechts eine Beschreibung des Kontaktwinkels angeführt. So beschreibt HERRMANN [115], dass sich eine Kugelkappe eines Flüssigkeitstropfens ausbildet, sobald er auf eine ebene Oberfläche aufgebracht wird und sich dabei drei Grenzflächenenergien zeigen. Diese bestehen zwischen fester und flüssiger (σ_{SL}), zwischen flüssiger und gasförmiger (σ_{LV}) und zwischen fest zu gasförmiger Phase (σ_{SV}). Der Kontaktwinkel kann anhand der gebildeten Kontaktlinien an den Grenzflächen bestimmt werden. Dieser ist definiert als jener Winkel der den Tropfen entlang der Kontaktlinien im mechanischen Gleichgewicht einschließt [115]. Diese Beschreibung des Kontaktwinkels über die Dreiphasenkontaktlinie beruht auf der Gleichung nach YOUNG und gilt für glatte Oberflächen [114].

$$\cos\theta_m = \frac{\sigma_{SV} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LV}} \quad (39)$$

Aus den beschriebenen Benetzungsverhalten von Oberflächen geht hervor, dass die hydrophoben Eigenschaften von Spritzgussoberflächen maßgeblich über die Geometrie der Oberflächenstruktur definiert wird. Die Geometrie der Mikrostruktur sollte eine möglichst kleine Kontaktfläche zum Flüssigkeitstropfen aufweisen. So besitzen beispielsweise spitze Strukturen (Kegel oder Pyramide) beim Kontakt mit einem Fluid einen punktförmigen Kontakt. Folgend wird versucht mittels dem hier vorgestellten Mikro-Umformverfahren, geeignete Negativstrukturen in der Werkstoffoberfläche eines Warmarbeitsstahls vom Typ X38CrMoV5-1 (1.2343) herzustellen. Um diese auf einer Bauteiloberfläche abbilden zu können, wurden die mittels des PZ-MHP-Aktors strukturierten Bauteile durch das Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) der RWTH Aachen mittels einem Spritzgussprozess

abgeformt. Als Werkstoff wurden die Polycarbonatwerkstoffe Makrolon® 2405 und 2805 (Fa. Covestro) ausgewählt (siehe Herstellerdatenblatt [117]). Die Spritzgussversuche wurden auf einer Maschine des Typs „IntElect 100/520-340 smart“ mit einer maximalen Schließkraft von 100 t und einem lichten Säulenabstand von 520 mm x 470 mm der Firma Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery durchgeführt (siehe [149]).

Werkstoff	Werkzeugtemperatur	Nachdruck	Temperatur-Schmelze
Makrolon® 2405	105°C	650 bar	300°C

Tabelle 43: Spritzgussparameter zur Abformung der 55°-Pyramidenstruktur

Für den Fall der 55°-Pyramidenform des Werkzeuges und den Bearbeitungsparametern aus Tabelle 41 wurden die strukturierten Proben unter Anwendung des Kunststoffes Makrolon® 2405 in der Farbe Schwarz mit folgenden Spritzgussparametern (siehe Tabelle 43) abgeformt. Als Ergänzung zu den Ergebnissen der negativ strukturierten Oberfläche aus Abbildung 77 ist in Abbildung 82 links die Oberflächenstruktur der optisch vermessenen Bauteiloberfläche (Alicona Infite Focus G5) in Falschfarbendarstellung der strukturierten Probe abgebildet. Hierbei stammt die Strukturaufnahme aus der Mitte des Bearbeitungsfeldes und deckt eine Fläche von 1,5 mm x 1,5 mm ab. Auf diesen Flächenbereich fallen somit 2.500 Einzeleindrücke. Trotz der bereits erwähnten Verschleißproblematik ist hier die quadratische Form der Pyramidenfläche des Werkzeuges zu erkennen, welche in die Werkstückoberfläche gedrückt wurde. In Abbildung 82 rechts ist das Ergebnis der optischen Flächenmessung der abgeformten Bauteiloberfläche der strukturierten Probe aus dem Werkstoff Makrolon® 2405 zu sehen. Die abgeformten Pyramidenstümpfe, welche etwa eine Höhe von 7 µm aufweisen, sind deutlich erkennbar.

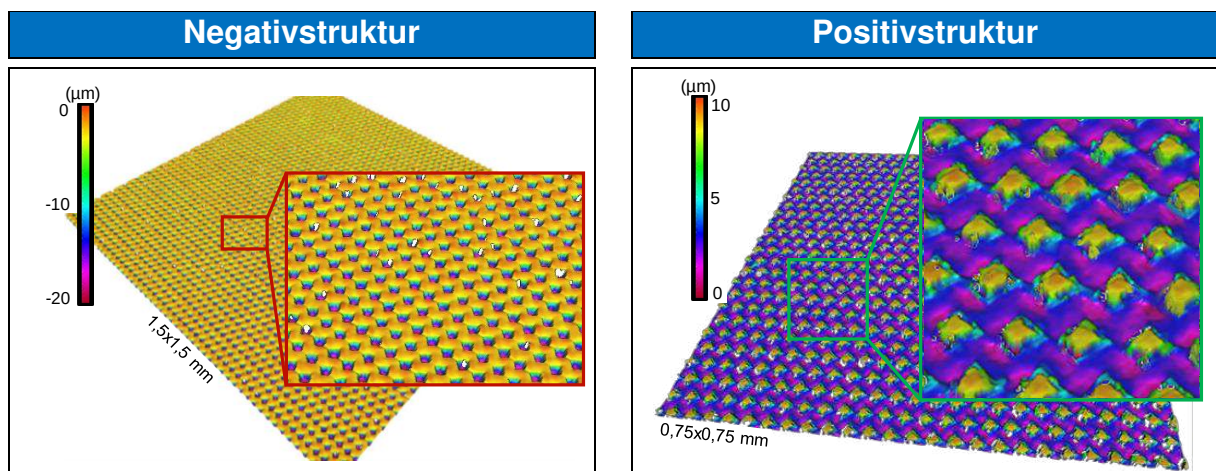


Abbildung 82: Optische Oberflächenmessung der erzeugten Negativ (links)- und der Positivstruktur (rechts) mit dem 55°-Pyramidenwerkzeug in den Werkstoffen X38CrMoV5-1 und Makrolon® 2405

Es konnte somit unter Anwendung der hier eingesetzten Spritzgussparameter keine vollständige Abformung der erzeugten Mikrostruktur erreicht werden. Aus den REM-Aufnahmen in Abbildung 77 ist jedoch deutlich die gute Umformqualität der erzeugten Mikrostruktur bis zur letzten Bearbeitungszeile (Zeile Nr. 533) zu erkennen. Wie somit hier dargestellt werden kann, spielt neben der Qualität der erzeugten Negativform auch der Abformprozess eine maßgebliche Rolle für die Herstellung einer Positivstruktur unter Anwendung eines Spritzgussprozesses. Um eine Beschreibung der erreichten Abformgüte der Positivstruktur auf der Kunststoffoberfläche vornehmen zu können, werden für beide Strukturen das arithmetische Mittel für die erzeugte Strukturhöhe s_h und die Tiefe der geometrischen Struktur t_p aus einem Profilschnitt ermittelt und zueinander ins Verhältnis gesetzt [118]. Vergleicht man so die mittlere Abformhöhe der Struktur des Kunststoffteiles mit der mittleren Tiefe der Negativform (Masterform), kann der Abformgrad a_g beschrieben werden. Dieser ist definiert nach:

$$a_g = \frac{\varnothing s_h}{\varnothing t_p} \cdot 100 \quad (40)$$

Entsprechend diesem Verhältnis kann somit für die erzeugte Struktur ein Abformgrad von 42,63% ermittelt werden, womit der tatsächliche Betrag für die Strukturhöhe nur zu rund 3/7 erreicht wird. Eine genaue Darstellung der gemessenen Werte zur Berechnung des Abformgrades bietet die Tabelle 44.

Werkstoff	Mittlere Strukturtiefe	Mittlere Abformhöhe	Abformgrad
Makrolon® 2405	17,7 µm	7,32 µm	42,63%

Tabelle 44: Abformgrad der 55°- Pyramiden-Struktur

Um in weiterer Folge auch den Einfluss der Oberflächengestaltung auf den beschriebenen hydrophoben Effekt zu untersuchen, wurden in weiterer Folge durch das IKV erneut Spritzgussbauteile aus Polycarbonat (Makrolon®) hergestellt. Der Effekt der hydrophoben Oberflächenwirkung bedingt eine definierte positive Oberflächenstruktur, wie diese in Abbildung 73 dargestellt ist. Wie in [119] beschrieben wird nehmen die Einspritzparameter einen großen Einfluss auf das Abformverhalten. Aus diesem Grund wurden unter Variation der Spritzgussparameter mehrere Bauteile erstellt und deren entstandenen Oberflächenstrukturen auf ihre Hydrophobie untersucht. Für die Untersuchungen zu den Prozesseinflüssen wird ein oberflächengehämmerter Struktureinsatz ausgewählt, der ein gutes Abformverhalten der strukturierten Fläche aufweist. Die für die Untersuchungen definierten Spritzgussparameter sind in Tabelle 45 gelistet. Zur Bewertung des Benetzungsverhaltens der abgeformten, positiv strukturierten Oberfläche wurde eine Kontaktwinkelmessung mit Wasser durch das IKV durchgeführt. Als variierenden Parameter des Spritzgussprozesses wurden folgende ausgewählt:

- Temperatur der Schmelze in °C
- Temperatur des Werkzeuges in °C
- Nachdruck in bar
- Einspritzgeschwindigkeit in cm/s

Nr.	Temp. Schmelze (°C)	Temp. Werkzeug (°C)	Nachdruck (bar)	ES-Geschw. (cm/s)
1	300	92,5	40	35
2	320	125	120	25
3	280	125	120	25
4	280	60	40	25
5	320	125	40	45
6	320	125	40	25
7	320	125	120	45

Tabelle 45: Spritzgussparameter zur Abformung der 45°-Kegelstruktur

Im Gegensatz zu vorhergegangenen Strukturierungsversuchen wurden bei dieser Versuchsreihe nach je 133 Zeilen ($\cong 4,3$ mm quer zur Bearbeitungsrichtung) der Bearbeitung das Strukturierungswerkzeug gewechselt. Somit wurde versucht, dem fortschreitenden Werkzeugverschleiß entgegenzuwirken. Das Ergebnis zeigte jedoch, dass durch die Anwendung mehrerer Umformwerkzeuge der Mittelwert der Strukturtiefe mit $t_p = 13,3 \pm 4 \mu\text{m}$ einer etwas höheren Streuung unterliegt und somit eine etwas ungleichmäßige Strukturtiefe entstand. Die weiteren angewendeten Bearbeitungsparameter zu dieser Versuchsreihe sind in Tabelle 46 aufgelistet.

Kegelstruktur	
Spitzenwinkel-Werkzeug (°)	45
Werkstoff Werkzeug	WC-Co (11,5% Co)
Werkzeugspitzenradius (μm)	2
Frequenz f (Hz)	200
Hub h (μm)	20
Signalform	Rechteck $\square$ mit 14% Tastgrad
Vorschubgeschwindigkeit (mm/min)	360
$s = a$ (μm)	30
Anzahl der Einzeleindrücke	285.156
Abstand zur Oberfläche (μm)	5
Bearbeitungsstrategie	Zeilenbearbeitung

Tabelle 46: Bearbeitungsparameter bei der Piezo-Mikrostrukturierung mit WC-Co-Werkzeug

In der Abbildung 83 ist der strukturierte Formeinleger mit den wichtigsten Details, sowie eine REM-Aufnahme der negativ strukturierten Oberfläche auf dem Werkzeugeinsatz aus dem Werkstoff X38CrMoV5-1 (1.2343). Im Detail rechts ist dabei eine Fehlstelle am Rand der Einzeleindrücke zu erkennen.

Strukturierter Formeinleger mit 45°-Kegelwerkzeug

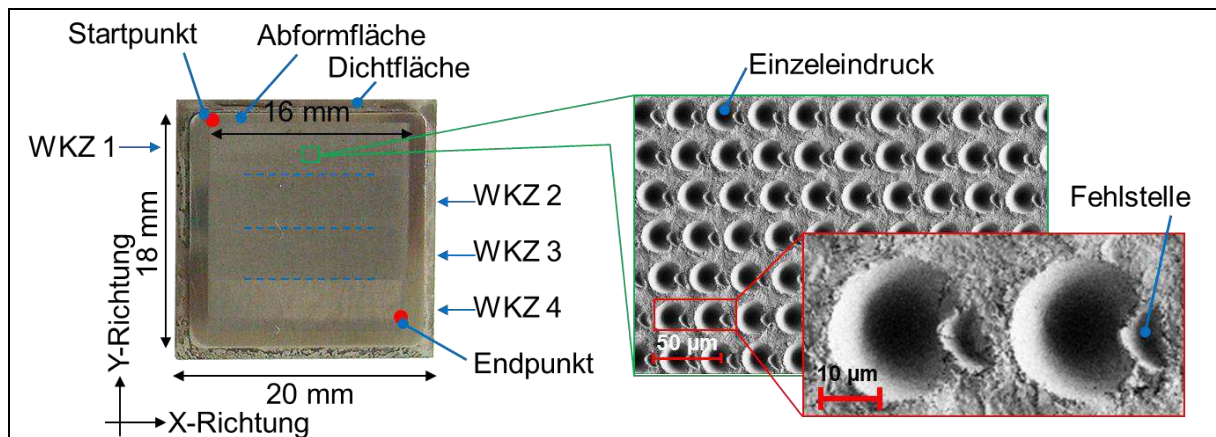


Abbildung 83: Kegelförmig strukturierter Formeinleger aus X38CrMoV5-1 unter Anwendung von vier 45°-Kegelwerkzeugen (WC-Co 11,5% Co) und Detailaufnahme der Oberfläche aus dem ersten Versuchsfeld

Es ist davon auszugehen, dass zu diesem Zeitpunkt bereits ein Defekt am Strukturierungswerkzeug vorliegt und somit eine fehlerhafte Umformung erzeugt. Ungeachtet dessen kann bei dieser Detailaufnahme ein kegelförmiger Abdruck erkannt werden. Die hier gezeigte Aufnahme entstammt aus dem ersten Sektor welcher mit dem Werkzeug Nr.1 hergestellt wurde. Zudem ist ersichtlich, dass unabhängig von der Fehlstelle eine scharfe Kante ohne Materialaufwerfung am Rand an der Oberfläche erzeugt werden kann. Diese Fehlstelle auf der strukturierten Oberfläche des Werkzeuges wird auch auf die Oberfläche des Spritzgussbauteil übertragen wie die Abbildung 84 zeigt. Unabhängig von dieser fehlerhaften Struktur zeigt sich eine sehr regelmäßige Struktur an der Oberfläche des Spritzgussbauteils aus dem Polycarbonat-Werkstoffe Makrolon® 2405. Im Gegensatz zur umgeformten Kegelstruktur am Formeinleger ist im hier gezeigten Fall keine exakte Abformung der Kegelspitze zu sehen.

Strukturiertes Spritzgussbauteil

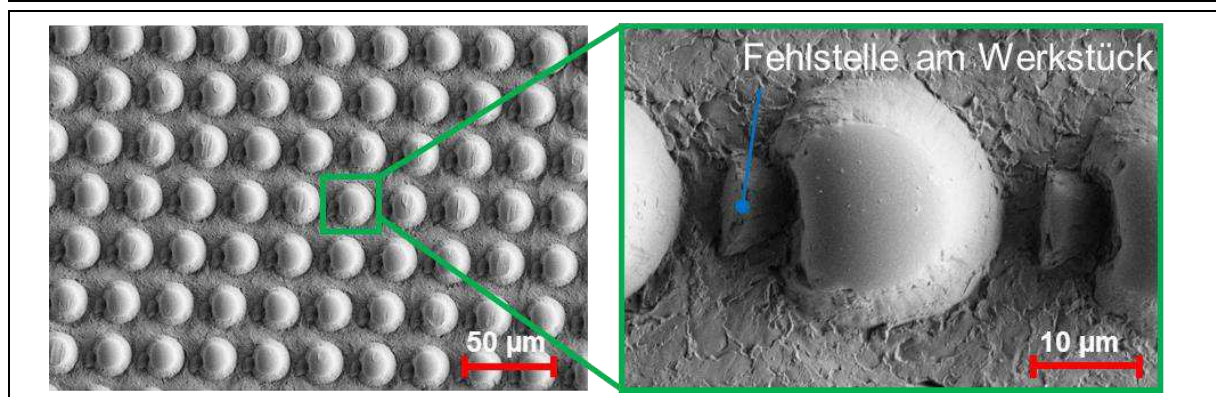


Abbildung 84: Strukturierte Oberfläche eines hergestellten Spritzgussbauteils aus dem Polycarbonat-Werkstoff Makrolon® 2405

Diese Eigenschaft ist unter anderem von den Parametern des Spritzgussprozesses abhängig. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Einflüsse auf den Abformgrad ist im Abschlussbericht des Forschungsprojektes SEPIM [149] gegeben. Trotz der fehlerhaften hergestellten Oberflächenstruktur konnte die hergestellten Spritzgussbauteile zu Kontaktwinkelmessungen herangezogen werden. Das Ergebnis der Kontaktwinkelmessungen für die angegebenen Versuchsnummern aus Tabelle 45 ist in Abbildung 85 dargestellt. In dieser Abbildung sind neben der Darstellung des gefertigten Kunststoffbauteils mit der fast zentrisch abgeformten positiven Mikrostruktur auch die Messergebnisse der beiden Polycarbonat-Werkstoffe Makrolon® 2405 (blau) und 2805 (grau) inklusive Fehlerbalken dargestellt. Zu erkennen ist hier, dass nahezu alle gelisteten Versuchsreihen im Mittel einen Kontaktwinkel von über 90° aufweisen. Die höchstgelegenen Werte sind dabei im Mittelwert mit 114° auszumachen. Es fällt auf, dass das niedrig viskosere Makrolon® 2405 etwas bessere Benetzungseigenschaften hinsichtlich einer hydrophoben Oberfläche aufweist. Bereits aus dieser Versuchsreihe kann der positive Einfluss der Temperatur des Werkzeuges und der Schmelze auf den Benetzungszustand und damit einer hydrophoben Oberflächenwirkung nachgewiesen werden. Dieser Effekt konnte auch in [119] in Abformversuchen festgestellt werden.

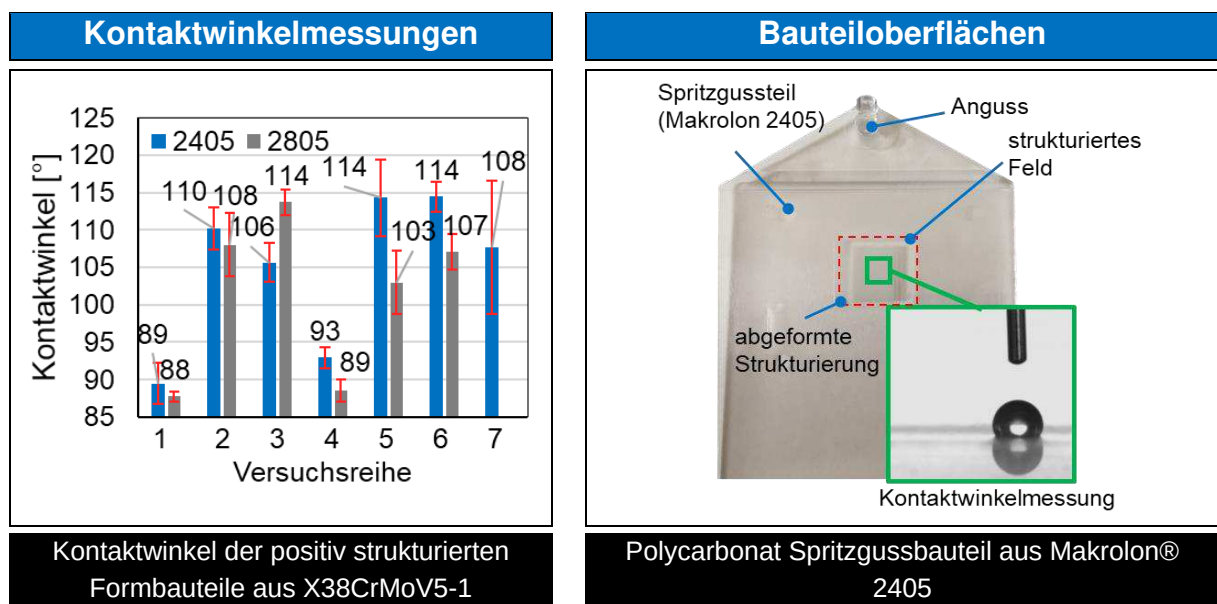


Abbildung 85 Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen der Spritzgussbauteile aus Makrolon® (links) abgeformt aus der Form mit 45°- Kegelstruktur, rechts: Detail des MHP-strukturierten Formeinlegers und abgeformtes Spritzgussbauteil aus Makrolon® 2405

Wie gezeigt wurde konnten in diesem Kapitel ebene Formeinleger aus dem Werkstoff X38CrMoV5-1 von Spritzgusswerkzeugen durch einen Mikroumformprozess strukturiert und die Strukturmerkmale auf Spritzgussbauteile aus Polycarbonatwerkstoffen übertragen werden. Zudem wurden die erzeugten Spritzgussteile genutzt, um die funktionale Eignung der hergestellten Strukturen auf

den Kunststoffbauteilen zu Untersuchen. Im speziellen konnte das Wasserbenetzungsverhaltens der strukturierten Oberfläche analysiert werden.

6 Gefügeumwandlung durch Mikroumformung

Neben dem Einfluss des Maschinensystems und der MHP-Aktorik nimmt auch der zu bearbeitende Werkstoff wie in Kapitel 4.4 gezeigt werden konnte, Einfluss auf die erzielbaren Randschichteigenschaften bei der MHP-Bearbeitung. Abhängig von der erzielbaren Wirkgröße (z.B. Glättung, Strukturierung, Kaltverfestigung) muss die benötigte Umformenergie von einem entsprechenden Aktorsystem aufgebracht werden. Diese unterscheidet sich vom Anwendungsfall und ist unter anderem vom Werkstoff des Bauteils abhängig. Anhand der Berechnungsmethode nach HERTZ kann diese für den elastisch-statischen Fall (vgl. [64]) beschrieben werden oder so lässt sich der dynamisch-plastische Umformvorgang nach JOHNSON [46] oder nach TABOR et al. [65] definieren. Neben der Glättung der Werkstoffoberfläche zählt auch die Beeinflussung der Verfestigungsmechanismen zu den nennenswerten Charakteristiken der Bearbeitung durch das maschinelle Oberflächenhämmern. In diesem Fall kommt es durch die eingebrachte plastische Umformarbeit in dem Werkstoff zu einer Phasenumwandlung bei metastabilen Austeniten. Damit ist es bei einer gleichen chemischen Zusammensetzung möglich eine Änderung der Gitterstruktur zu initiieren. Dabei kann dieser zunächst paramagnetische Werkstoff nach Einwirkung einer plastischen Umformung ferromagnetische Eigenschaften aufweisen. Somit ist es möglich die magnetische Permeabilität in der Randzone unter Anwendung des maschinellen Oberflächenhämmerns zu erhöhen. Welchen Einfluss die MHP-Bearbeitung auf die Werkstoffphase von metastabilen Austenitwerkstoffen nimmt und welche Rolle die Martensithärtung auf die magnetischen Eigenschaften spielt, ist Gegenstand dieses Kapitels.

6.1 Grundlagen zur Phasenumwandlung

Im Gegensatz zu einer unkontrollierten Änderung des Werkstoffgefüges im Bereich der Verarbeitung von kaltgewalzten Stahlblechen kann unter Anwendung des maschinellen Oberflächenhämmerns eine gezielte Beeinflussung des Werkstoffgefüges mit einer hohen örtlich definierten Auflösung umgesetzt werden. Dabei ist es möglich, neben der Werkstoffphase auch die Korngröße des Gefüges zu beeinflussen. In [120] konnte der Nachweis einer Kornfeinung als Ausdruck für die Minimierung der Korngröße an der Werkstoffoberfläche einer Magnesium-knetlegierung AZ31 durch einen Festwalzprozess bis hin zu einer Tiefe von 200 µm gebracht werden. Im Falle von CrNi-Werkstoffen ist bei der MHP-Bearbeitung dieser Werkstoffgruppe ein besonderes Augenmerk auf die Werkstoffphase zu legen. Im Allgemeinen besitzen austenitische Stahlwerkstoffe die Eigenschaft, dass die austenitische Phase in Reineisen bei Raumtemperatur nicht stabil gehalten werden kann. Erst durch eine mechanische oder chemische Stabilisierung des Zustandes ist es möglich, diese Phase bei Raumtemperatur zu stabilisieren, wie dies in [90] im Detail ausgeführt wird. Bei der mechanischen Destabilisierung der Phase tritt bei der

Umwandlung von kubischem Austenit zu tetragonalem Martensit eine Volumenzunahme auf und ist vom Kohlenstoffgehalt abhängig [90, S. 23]. Diese liegt bei etwa 1% und ist eine legierungsabhängige Größe [70]. Eine chemische Stabilisierung kann durch die Zugabe entsprechender Legierungselemente wie beispielsweise Nickel, Kohlenstoff oder Kobalt vorgenommen werden. Diese Elemente dehnen das Phasenfeld des Austenits zu tieferen Temperaturen aus, wodurch ein stabiles bzw. metastabiles Gefüge bei Raumtemperatur möglich wird [90]. Allen voran ist die Klasse der CrNi-Legierungen besonders interessant für die MHP-Bearbeitung. Unter der Einwirkung von äußeren Kräften ist es möglich, dass bei einer plastischen Verformung eine Umwandlung des austenitischen Gefüge hin zu einem martensitischen Gefüge gestartet wird [121]. Im Folgenden werden CrNi-Werkstoffe aufgelistet, welche zur verformungsinduzierten Martensitbildung neigen (vgl. [122] und [123]).

Bezeichnung	Werkstoffnummer	Cr %	Ni %
X5CrNi18-10	1.4301	18	10
X8CrNiS18-9	1.4305	18	9
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	14	3
X3CrNiCu18-9-4	1.4567	18	9

Tabelle 47: Ausgewählte Chrom-Nickel-Werkstoffe mit der Eignung zur verformungsinduzierten Martensitbildung

Aufgrund der plastischen Deformation an der Oberfläche während der MHP-Bearbeitung kann bei Chrom-Nickel-Werkstoffen eine verformungsinduzierte Umwandlung zu einem martensitischen Gefüge stattfinden. Eine Darstellung des Umwandlungsprozess wird in Abbildung 86 gezeigt. Wie bereits eingangs erwähnt, ist dieser Effekt auch im Bereich der Blechumformung durch Kaltverfestigung bei austenitischen Stählen bemerkbar (vgl. [124]). Dieser Umwandlungsmechanismus ist für austenitische Stähle insofern zu beachten, da diese eine breite Anwendung im Bereich der Blechumformung finden und etwa dreiviertel der weltweiten Erzeugung nicht-rostender Stähle abdecken [86]. Im Speziellen weisen diese Werkstoffe eine hohe Korrosionsbeständigkeit auf und befinden sich in einer metastabilen γ -Phase [125]. Durch die plastische Deformation, welche bei der MHP-Bearbeitung hervorgerufen wird, kann sowohl eine metastabile γ -Phase in einen ε -Martensit mit hexagonal dicht gepackter Kristallstruktur als auch in einen α' -Martensit mit kubisch raumzentrierter Elementarzelle übergeführt werden (siehe [88]). Bei der Überschreitung der Fließgrenze $\sigma > \sigma_F$ (plastische Deformation) erfolgt die Bildung von Versetzungen im Werkstoff. Zur Unterscheidung dieser drei genannten Phasenzustände weist lediglich der α' -Martensit magnetische Eigenschaften auf. Auf diese spezielle Eigenschaft wird im weiteren Verlauf dieses Kapitel noch näher eingegangen. Betrachtet man nun wie in Abbildung 84 dargestellt ist die kfz-Raumzelle, so kann bereits eine virtuell eingebettete tetragonal-raumzentrierte-Zelle (trz) erkannt werden. Eine einfache Beschreibung zur direkten Umwandlung von

Austenit (γ -Phase) hin zu α' -Martensit liefert das Modell nach BAIN (siehe [86]). Die vorhandene Oktaederlücke in der kfz-Struktur geht direkt in die Oktaederlücke des Martensits über [150]. Aus diesem Modell kann erkannt werden, dass die (111)-Ebene in der kfz-Struktur die der (110)-Ebene in der trz-Zelle entspricht. Ausgehend von dieser trz-Zelle muss nun eine Deformation der kfz-Zelle unternommen werden um die Struktur eines Martensits zu erhalten. Hierzu ist eine Stauchung der kfz-Zelle in der [001]-Richtung um ca. 20,63 %, sowie eine Dehnung in den Richtungen [100] und [010] um 12,25 % erforderlich [150]. Aufgrund einer allseitigen Verformung der Raumzelle welche keine Habitusebene zwischen den Strukturen zulässt wird meist, neben dem zuvor beschriebenen Modell nach BAIN, die Beziehung nach KURDJUMOV und SACHS angewendet. Diese Beziehung legt nahe, dass ein Orientierungs-Zusammenhang zwischen der (111)-Ebene des Austeniten und der (110)-Ebene des Martensiten sowie der [110]-Richtung im Austenit und der [111]-Richtung im Martensit vorliegt [150].

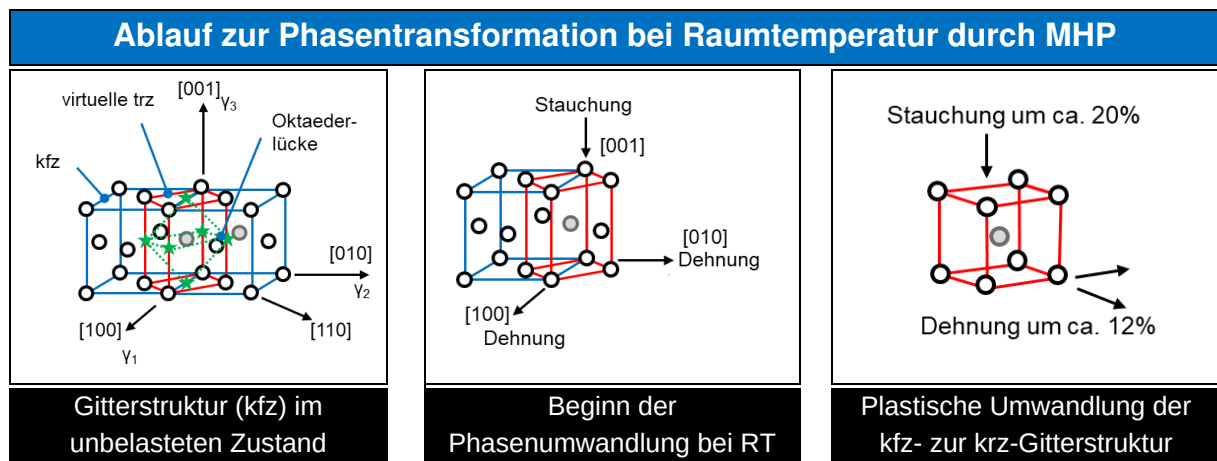


Abbildung 86: Schematische Darstellung der Phasentransformation bei metastabilen Austenitwerkstoffen durch plastische Umformung bei RT

Der Anteil dieser magnetischen Phasen in einem Werkstoff kann beispielsweise über magnetinduktive Messungen detektiert werden [126]. Untersuchungen in diesem Bereich wie z.B. in [121] - [123] zeigen, dass eine erhöhte Umformung eines Werkstoffes die Bildung von α' -Martensit fördert und diese Phasenänderung ebenso von der γ -Phase zur ε -Phase und weiter zur α' -Phase erfolgen kann. Zudem ist es auch möglich, eine direkte Umwandlung der γ -Phase hin zur α' -Phase zu erzeugen. Das α' -martensitische Gefüge spielt insbesondere für mechanisch belastete Bauteile eine interessante Rolle, verfügen sie doch über deutlich erhöhte Festigkeitswerte als ein γ -austenitisches Gefüge (siehe [86]) bei gleichzeitig identer chemischer Zusammensetzung. Im Falle der in der Tabelle 47 gelisteten Edelstähle nehmen die Hauptlegierungselemente Chrom (Cr) und Nickel (Ni) Einfluss auf das Gefüge und die mikrostrukturellen Eigenschaften. Ausgehend von diesem austenitischen Gefüge kann die Umwandlung der Phase nun durch verschiedene Mechanismen erfolgen. Der Mechanismus, welcher bei der Anwendung des MHP-Prozesses auftritt, kann durch

den plastischen Umformprozess und damit einer Überschreitung der Streckgrenze des Materials unterhalb der sogenannten M_{σ} -Temperatur (Martensittemperatur) als verformungsinduzierten Martensitbildung bezeichnet werden. Dabei wird eine Aktivierungsenergie für die Phasenumwandlung vom Austenit hin zum Martensit benötigt, welche durch Versetzungskonfigurationen bereitgestellt wird. Es ist anzumerken, dass ein metastabiles austenitisches Gefüge bei Raumtemperatur rein durch die plastische Verformungsenergie zu einem Martensit umgewandelt werden kann [86]. Weitere Möglichkeiten zur Phasenumwandlung sind die spannungsinduzierte Martensitbildung, welche zwischen der M_s - und $M_{s,\sigma}$ -Temperatur stattfindet und vorhandene Martensitkeime als Nukleationszentren für die Phasenumwandlung nutzt (siehe [86]). Bei dieser Art der Transformation erfolgt nach [90] die Martensitbildung, ausgehend von vorhandenen Martensitkeimen, durch eine Bereitstellung einer zur Phasenumwandlung benötigten Energie (chemische Reaktionskraft). Diese kann durch eine Unterkühlung unterhalb der Martensit-Starttemperatur (M_s) erreicht werden. Ab dieser Temperatur beginnt eine aprite Martensitbildung. Eine genaue Darstellung der Umwandlungsmechanismen bietet die Abbildung 87. Eine Umwandlung von einem austenitischen Gefüge hin zu einem Martensit kann nicht rein durch Abkühlung des Werkstoffes unterhalb der $T_{\text{Übergang}}$ erfolgen. Es bedarf einer Unterkühlung der Temperatur um eine Größe ΔT , um die Transformation zu starten. Somit ist eine freie Enthalpiedifferenz ΔG_s notwendig. Liegt der Werkstoff bei Raumtemperatur vor, so kann diese Aktivierungsenergie auch mechanisch z.B. unter Anwendung des MHP-Prozesses eingebracht werden (ΔG_{mech}). Diese Energieaufstellung kann folgendermaßen formuliert werden:

$$\Delta G_{RT} + \Delta G_{\text{mech}} > \Delta G_s \quad (41)$$

Die Menge des gebildeten verformungsinduzierten Martensits hängt von der Stapelfehlerenergie der austenitischen Phase des Werkstoffes ab [126]. Wie in [113] und [130] beschrieben wird, zählen diese zu den zweidimensionalen Gitterfehlern und hindern die Gleitvorgänge innerhalb der Gitterstruktur. Stapelfehler können bei der Verformung (Abgleiten von Teilversetzung) entstehen. Meist finden diese Versetzungen entlang der dicht gepacktesten Gleitebene. (kfz-Kristall: [111]) In Abbildung 87 ist zudem die Martensittemperatur Md_{30} eingezeichnet. Diese kennzeichnet die maximale Temperatur, bei der noch Verformungsmartensit erzeugt werden kann.

$$Md_{30}(C^\circ) = 551 - 462(C\% + N\%) - 9,2Si\% - 8,1Mn\% - 13,7Cr\% - 29(Ni\% + Cu\%) - 18,5Mo\% - 68Nb\% \quad (42)$$

Diese beschreibt die Temperatur bei der ein Umformgrad von 30% notwendig ist um 50% des Gefüges in Martensit umzuwandeln [126]. Nach [122] kann die

Md_{30} -Temperatur aus dem Gehalt der Legierungselemente nach Gleichung 42 berechnet werden.

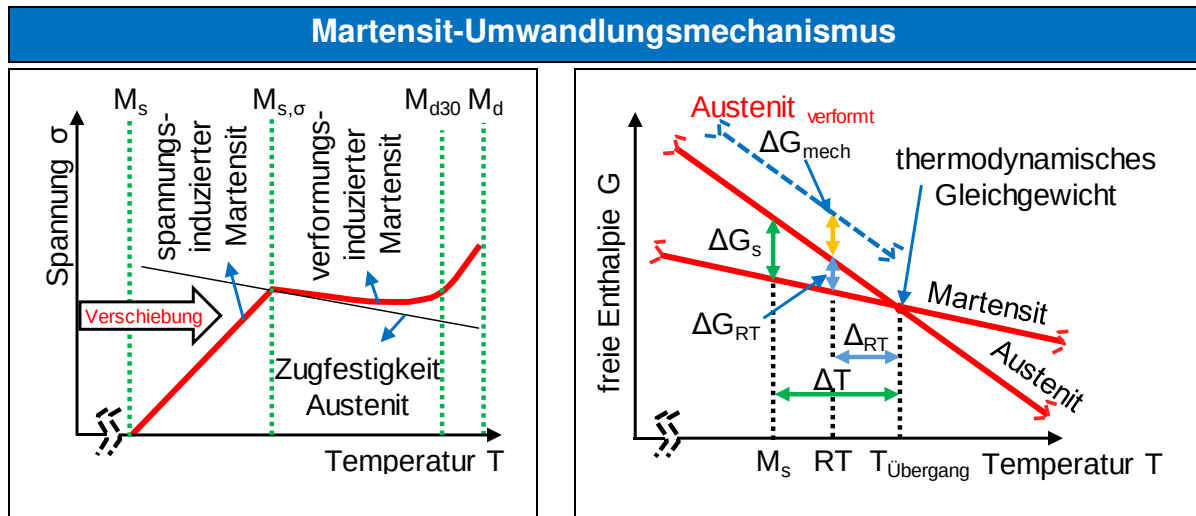


Abbildung 87: Umwandlungsmechanismen zur Martensittransformation, links: Einflüsse von Spannung und Dehnung auf die martensitische Umwandlungstemperatur in Anlehnung an [86], rechts: schematisches freies Enthalpie-Diagramm der verformungsinduzierten martensitischen Transformation nach [150].

Diese beschreibt die Temperatur bei der ein Umformgrad von 30% notwendig ist um 50% des Gefüges in Martensit umzuwandeln [126]. Nach [122] kann die Md_{30} -Temperatur aus dem Gehalt der Legierungselemente nach Gleichung 42 berechnet werden. Der für die Untersuchungen eingesetzte Werkstoff X5CrNi18-10 setzt sich dieser aus folgenden chemischen Elementen zusammen (Lieferzeugnis). In diesem Fall lag der Werkstoff als kaltgewalzter Flachstahl vor.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
0,038	0,381	1,339	0,03	0,002	18,166	9,038	0,049

Tabelle 48: Zusammensetzung in Masse-% des Werkstoffes X5CrNi18-10

Unter Anwendung der Gleichung 42 zur Berechnung der Md_{30} -Temperatur und der vorliegenden chemischen Zusammensetzung liegt die Temperatur bei der sich 50% Martensit bei einer Umformung von 30% bildet bei $-14,5$ Grad $^{\circ}\text{C}$ und somit deutlich unterhalb der Raumtemperatur und unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser. In [126] wird zudem beschrieben, dass eine weitere Unterkühlung des Werkstoffes die Bildung von Verformungsmartensit fördert.

In [131] wird gezeigt, dass austenitische Nickelstähle eine hohe Stapelfehlerenergie besitzen und sich im Vergleich zu austenitischen Chrom-Nickel-Stählen mit einer vergleichbaren geringen Stapelfehlerenergie weniger zur Martensitbildung eignen. Im Gegensatz zur Diffusion Umwandlung, handelt es sich bei der Martensittransformation um einen diffusionslosen Umwandlungsprozess. Es findet kein Platzwechsel der

Gitteratome statt, sondern lediglich eine Gitterverformung durch eine Scherbewegung. Im Falle der MHP-Bearbeitung kann diese Umwandlung durch den definierten Bearbeitungsprozess gezielt auf der Werkstückoberfläche durchgeführt werden, wodurch sich neue Anwendungsmöglichkeiten wie z.B. der Werkstoffcodierung durch lokale Bearbeitung ergeben. Im Gegensatz zur temperaturinduzierten Martensitbildung erfolgt durch die plastische Umformung des Werkstoffgefüges eine Richtungsabhängige Orientierung der Martensitstruktur, welche sich an den vorliegenden Spannungen in der Umformzone orientiert [70]. Neben der Untersuchung der verformungsinduzierten Martensitbildung durch die MHP-Bearbeitung kann auch dieser Effekte zur Kodierung von Werkstoffen herangezogen werden.

6.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Zu Beginn der Untersuchung wurde die kinetische Energie des E-MHP-System gemessen welche vor dem Auftreffen des Hammerkopfes auf die Werkstückoberfläche vorliegt. Neben der Erfassung der Hammerkopfbewegung erfolgte auch eine Vermessung der erzeugten Einzelabdrücke auf einer geschliffenen Werkstoffoberfläche. Hierzu wurde der E-MHP-Aktor von accurapuls in der Ausführung Typ 1600 auf einer Werkzeugmaschine DMG Mori Seiki NHX 6300 mit einer BT50-Werkzeugaufnahme montiert und mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 60.000 \text{ mm/min}$ über die Werkstoffoberfläche bewegt. Die erzeugten Einzeleindrücke wurden auf der Oberfläche des hochlegierten Werkstoffes X5CrNi18-10 (1.4301) generiert (Tabelle 48). Der Werkstoff lag in der Ausführung als kaltgewalzter Flachstahl in der Ausführung allseitig geschliffen (K320) vor. Das Gefüge des Werkstoffes im unbearbeiteten Zustand ist in Abbildung 92 zu sehen. Dabei kamen zwei unterschiedliche Parameter für den Hub des Hammersystems zur Anwendung ($h = 0,3 \text{ mm}$ sowie $h = 0,8 \text{ mm}$). Die dabei wirkenden Kontaktkräfte zwischen Hammerkopf und Werkstück wurden mittels eines Dynamometers (Kistler 9129AA) erfasst und die Hammerkopfbewegung entsprechend der Messmethodik aus [24] bestimmt und umgerechnet. Die entsprechende Messkette zur Bestimmung der Hammerkopfbewegung ist in Tabelle 49 abgebildet.

Bezeichnung	Typ	Messgröße
Wirbelstrom Sensor	NCDT 3300 Micro Epsilon	Weg
Drei-Achs Dynamometer	Kistler 9129AA	Kraft
Datenverarbeitung	LabView 2010	-

Tabelle 49: Messkette zur Bestimmung der MHP-Einflussgrößen

Ausgehend von dieser Messung konnte somit auch die Geschwindigkeit und damit die Energie vor dem Auftreffen auf die Werkstückoberfläche bestimmt werden. Der gewählte Hammerkopfdurchmesser betrug im Falle der Vorversuche $d = 3 \text{ mm}$. Die entstandenen Einzelabdrücke an der Werkstückoberfläche wurden im Anschluss am

3D-Oberflächenmessgerät vom Typ Alicona IFM G5 vermessen. Die Ergebnisse der Kontaktkraftmessung der aus dem Wegsignal berechneten Geschwindigkeit vor dem Aufprall v_0 und die über die bewegten Masse des Systems berechnete kinetische Energie Ek_0 sowie die Abmessungen der entstandenen Eindrücke sind in der Abbildung 88 abgebildet. Der Versuchsaufbau zeigt den eingebauten E-MHP-Aktor im Maschinenraum. Das Ergebnis der Wegmessung der Hammerkopfbewegung und der berechneten Geschwindigkeit für die beiden gewählten Hübe h von 0,3 mm und 0,8 mm sind Inhalt der Abbildung 89. Darin beschreibt die Nulllage der Ordinate den oberen Totpunkt der Bewegung, also den Aufprall der bewegten Masse auf die Rückprellplatte. Der größte negative Wert beschreibt den Aufprall auf die Werkstückoberfläche. Auffallend bei der Auswertung der Hammerkopfbewegung ist die höhere Kontaktzeit bei geringem Hub, sodass sich hier auch kein optimaler Schlag abbilden lässt. Diese Beobachtung konnte auch durch [24] bestätigt werden. In diesem Falle kann eine Kontaktzeit von rund $t = 1,4$ ms bei einem Hub von $h = 0,3$ mm ermittelt werden.

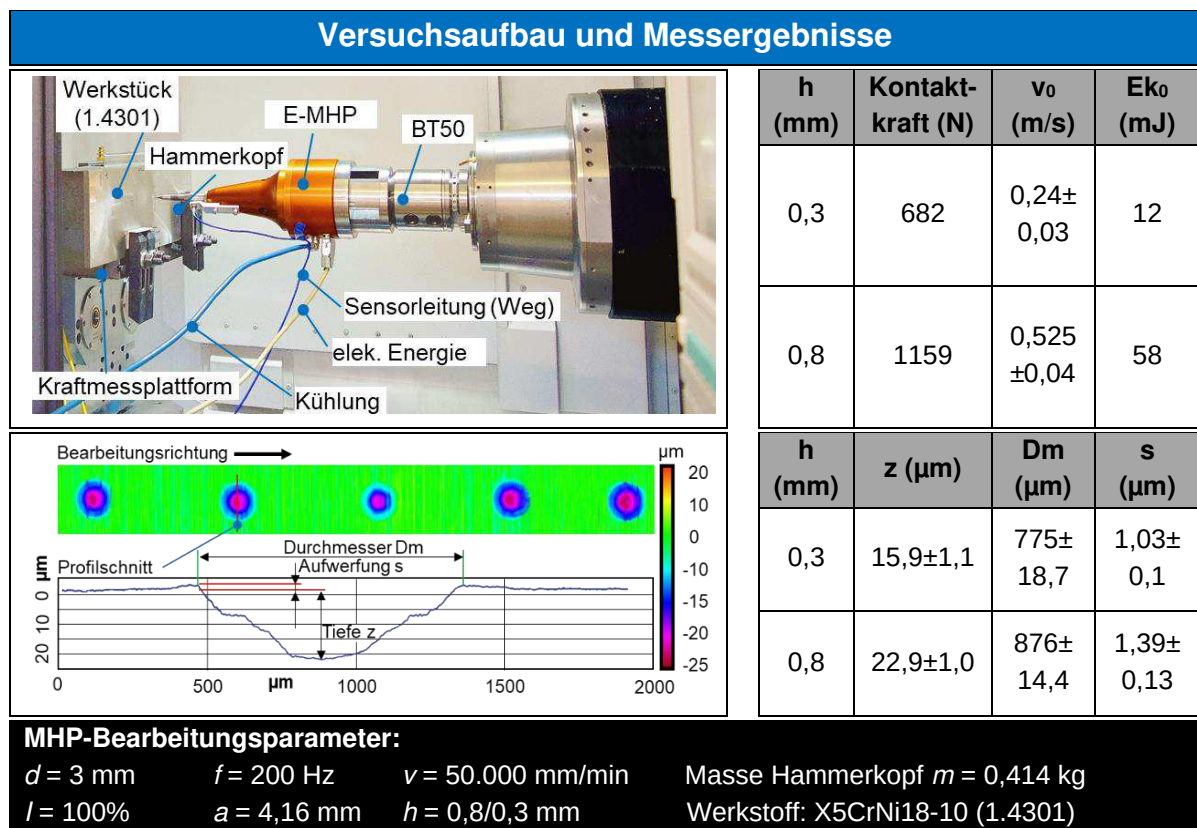


Abbildung 88: Versuchsaufbau und Ergebnisse der Prozess- und Wirkgrößen, links oben: Versuchsaufbau, links unten: Profilschnittmessung eines Einzeldruckes auf der Werkstückoberfläche

Im Gegensatz dazu beträgt die Zeit von der maximalen Geschwindigkeit des Hammerkopfes vor dem Auftreffen auf die Werkstückoberfläche (v_0) bis zur Bewegungsumkehr des Werkzeuges ($v = 0$) $453 \pm 40 \mu\text{s}$ für die Bewegung mit

$h = 0,8$ mm. Die hier dargestellten Bewegungskurven sind mit einem Bandstopffilter und einer Bandsperre von 1.200 - 5.000 Hz gefiltert. Ausgehend von diesem Bewegungsprofil konnte durch ableiten (dx/dt) ein Geschwindigkeitsprofil berechnet werden. Daraus lässt sich die in Abbildung 89 beschriebene Geschwindigkeit und Energien vor dem Aufprall bestimmen. Neben diesen Bearbeitungsgrößen wird zudem die Anzahl der Bearbeitungsschritte definiert. Um diese zu bestimmen, wird die Auswirkung einer Mehrfachbearbeitung einer Oberfläche auf die Rauheit betrachtet. Die Ausgangsrauheit der Oberfläche des geschliffenen kaltgewalzten Stahlbleches aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) weist einen Mittenrauwert $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ auf. Um einen möglichst großen Effekt der Transformation des γ -Eisens (Gamma Eisen - Austenit) zur α' -Phase (Alpha prime - Martensit durch plastische Deformation) zu erwirken, wurde im Vorfeld ein Versuch durchgeführt, welcher den Einfluss einer Mehrfachbearbeitung eines Flächenbereiches beschreibt.

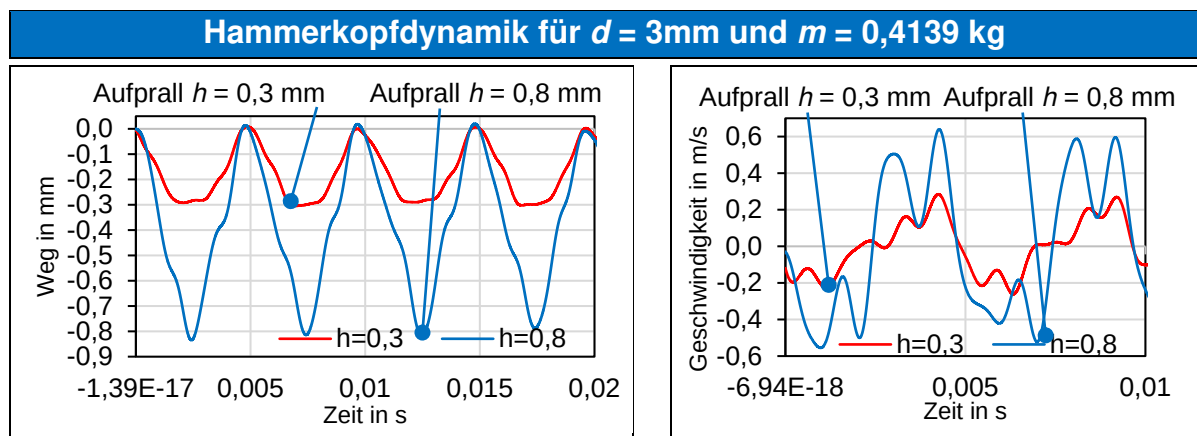


Abbildung 89: Ergebnis der Wegmessung der Hammerkopfbewegung (links) und berechnete Hammerkopfgeschwindigkeit (rechts) für den Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301)

Mit dem Hintergrund, dass eine mehrfache Bearbeitung auch eine höhere plastische Deformation bewirkt und damit auch die Bildung von Martensit fördert, musste zunächst jedoch festgestellt werden, ab welcher Anzahl an Bearbeitungsvorgängen die Oberflächenrauheit wieder zunimmt. Das Ergebnis der Vorversuche zeigte, dass bei einer fünfmaligen Bearbeitung der Oberfläche mit einem Hammerkopfdurchmesser $d = 3 \text{ mm}$ der Rauheitswert zunimmt. Bei $n = 4$ und einem Hub h von $0,3 \text{ mm}$ konnte eine minimale Oberflächenrauheit von $R_a = 0,11 \mu\text{m}$ erreicht werden, welche nach fünfmaliger Bearbeitung auf $R_a = 0,24 \mu\text{m}$ anstieg. Im Falle des größer gewählten Hubes mit $h = 0,8 \text{ mm}$ stieg die Rauheit von $R_a = 0,15 \mu\text{m}$ ($n = 4$) auf $R_a = 0,27 \mu\text{m}$ ($n = 5$) an. Aus diesem Grund wurde die maximale Bearbeitungszahl der Oberfläche auf $n = 4$ festgelegt, um eine möglichst hohen plastische Umformung zu erzielen. Mit den aus den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnissen und unter Berücksichtigung einer gleichmäßigen Flächenbearbeitung (Bahnabstand s = Eindruckabstand a) können die Bearbeitungsparameter für die Untersuchungen festgelegt werden. Diese sind in Tabelle 50 zusammengefasst. Die Versuchsdurchführung erfolgt gleich den

Vorversuchen mit dem E-MHP Aktor von accurapuls in der Ausführung Typ 1600 auf einer Werkzeugmaschine vom Typ DMG Mori Seiki NHX 6300 mit einer BT50-Werkzeugaufnahme.

Parameter der E-MHP Bearbeitung																	
Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
[v] (mm/min)	1200				2400				1200				2400				
[a] (mm)	0,1				0,2				0,1				0,2				
[h] (mm)	0,3		0,8		0,3		0,8		0,3		0,8		0,3		0,8		
[d] (mm)	6								3								
[f] (Hz)	200																
n	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	

Tabelle 50: Versuchsplan zur Bearbeitung des Werkstoffes X5CrNi18-10 mit n der Anzahl an Bearbeitungsdurchgängen

Ebenso wird der Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) bearbeitet. Die Größe der Bearbeitungsfelder wurde mit 20 mm x 20 mm gewählt. Aufgrund der von den Messungen abgeleiteten Geschwindigkeiten des Hammerkopfes vor dem Aufprall und den daraus berechneten Energien ist davon auszugehen, dass die eingebrachte Umformenergie und der damit einhergehenden Bildung von Martensit bei den festgelegten Bearbeitungsparametern aus Tabelle 50 die Bearbeitungsfelder Nr. 3, 4, 8 und 11, 12, 16 den größten Effekt hinsichtlich Kaltverfestigung und Umwandlung zu einem martensitischen Gefüge zeigen. Zum Nachweis der Martensitbildung erfolgt die Auswertung der Versuchsreihen in mehreren Schritten. Zunächst wird die Kaltverfestigung des Materials durch Erstellung einer Tiefenverlaufshärtemessung nach VICKERS beschrieben. Die durch die Umformung eingebrachte hohe Versetzungsdichte (hohe Gitterfehlerdichte) kommt es durch die Martensitbildung und der daraus resultierenden Volumenzunahme beim Umklappvorgang zu einer Härtesteigerung im bearbeitenden Bereich. Maßgeblichen Einfluss auf die zu erzielbaren Härtewerte werden vom Kohlenstoff- und Martensitgehalt abhängig [70]. Anschließend erfolgt auf Basis dieser Ergebnisse eine Gefügeuntersuchung sowie eine zusätzliche EBSD-Analyse der bearbeiteten Bereiche (EBSD - engl.: Electron Backscatter Diffraction - Elektronenrückstrahlbeugung).

Durch die Erstellung von Schliffbildern der bearbeiteten Proben ist es zunächst möglich, die stark plastisch deformierten Bereiche an der Oberfläche und den daran angrenzenden Randschichten sichtbar zu machen. Der Ablauf der Untersuchung der bearbeiteten Werkstoffproben ist schematisch in Abbildung 90 dargestellt. Dabei gestaltet sich der Ablauf zur Untersuchung des Werkstoffgefüges von der Präparation der Werkstoffproben, über das Messen der aufbereiteten Proben, bis hin zur Auswertung und der Analyse. Um in einem ersten Schritt die Auswirkung auf die Kaltverfestigung zu bestimmen, erfolgte eine Tiefenverlaufshärtemessung nach VICKERS. Die Messungen wurden auf einer EMCO Test M1C 010 mit einer HV05-

Sonde unter einer Einwirkungszeit der Belastung von $t = 15$ s durchgeführt. Das Ergebnis der Vickers-Härtemessung ist in Abbildung 91 dargestellt.

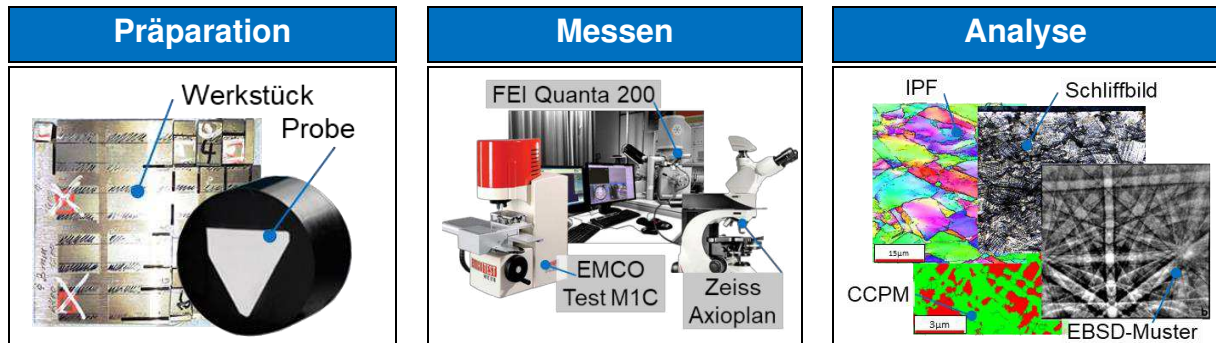


Abbildung 90: Ablauf zur Gefügeuntersuchung

Die Ergebnisse der Härtemessungen sind entsprechend des eingesetzten Hammerkopfdurchmessers in jeweils eigenen Diagrammen abgebildet. Ausgehend von einer Grundhärte des Werkstoffes nach VICKERS von 263 ± 5 HV05, welche in beiden Diagrammen mit einer durchgezogenen horizontalen Linie repräsentiert wird, ist eine Unterscheidung der einfach bearbeiteten (Kreis) und der vierfach bearbeiteten Proben (Dreieck) vorgenommen. Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse der Härtemessung erheblich von der eingebrachten Energie abhängen, welche neben dem Hub auch maßgeblich vom Hammerkopfdurchmesser beeinflusst werden. Der erste Messpunkt der Tiefenmessung wurde $50 \mu\text{m}$ unter der Oberfläche gesetzt.

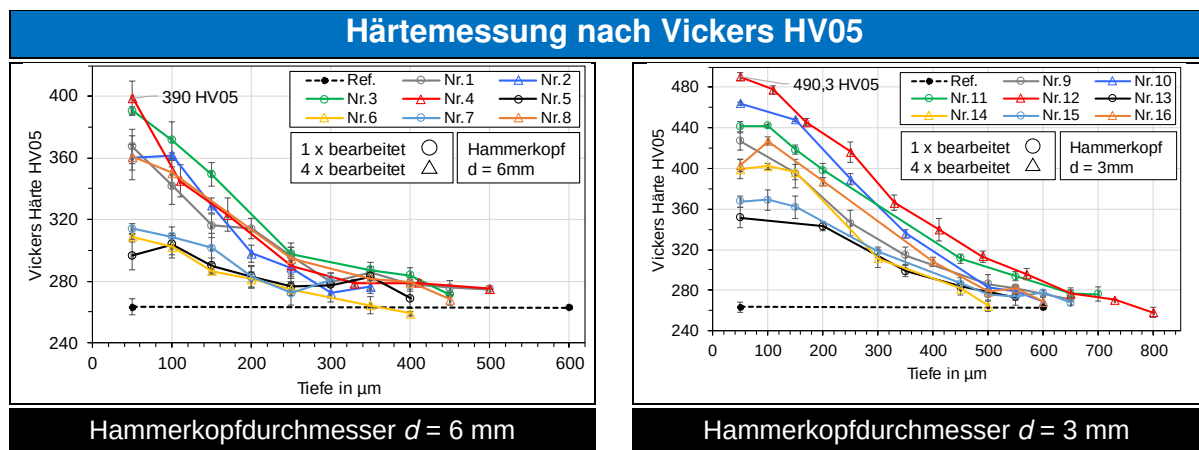


Abbildung 91: Härtetiefenverlaufsmessungen des Werkstoffes X5CrNi18-10 nach der E-MHP-Bearbeitung, links: Bearbeitung mit Hammerkopfdurchmesser $d = 6$ mm, rechts: Bearbeitung mit Hammerkopfdurchmesser $d = 3$ mm,

Dies lässt die Annahme zu, dass die tatsächliche Oberflächenhärte über den gemessenen Werten liegt. Wie ersichtlich, zeigen die bearbeiteten Proben 9 bis 12, die größte Steigerung der Härte. Diese wurden mit einer geringeren Vorschubgeschwindigkeit sowie einem geringeren Eindruckabstand bearbeitet. Neben dieser Ausprägung ist zudem ersichtlich, dass eine Mehrfachbearbeitung eine

Steigerung der Härte mit sich bringt. Die Probe Nr. 12 zeigt neben den höchsten Härtewerten (490 HV05) auch die größte Eindringtiefe. Die Wirttiefe reicht dabei bis zu 800 µm. Somit liegt die Oberflächenhärte dieser bearbeiteten Probe um den Faktor 1,8 über der unbearbeiteten Probe.

Um neben den Messungen der Kaltverfestigung auf eine Martensitumwandlung schließen zu können, wurden Schliiffbilder des Gefüges erstellt. Aus der bearbeiteten Werkstoffprobe wurden Segmente zur metallografischen Untersuchung durch langsames, nasses Trennen entnommen, eingebettet und entsprechend präpariert. Zunächst wurden Segmente des unbearbeiteten Bereiches mit zwei unterschiedlichen Ätzmittel geätzt. Die erste Farbätzung erfolgte mit dem Beraha II (BII) Ätzmittel, bestehend aus der Stammlösung (800 ml destilliertes Waaser, 400 ml Salzsäure und 48 g Ammoniumhydrogenflourid), sowie der Ätzlösung 1-2 g Kaliummetabisulfit pro 100 ml Stammlösung. Die zweite Ätzung (Abbildung 92-rechts) der Flächen erfolgte nach LICHTENEGGER und BLOECH-V (römisch Fünf) (LB-V). Die Lösung bestand aus 60 g Ammoniumhydrogendifluorid (NH_4HF_2), 2 g Kaliumdisulfit ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) und 100 ml heißem destillierten Wasser. Das BII Ätzmittels findet wird hauptsächlich austenitischen Chrom-Nickel-Werkstoffen Anwendung. Bei dieser Art der Ätzung wird zunächst der Delta-Ferrit gefärbt und anschließend der Austenit. Nach Anwendung dieser Ätzung werden die Delta-Ferrit Bereiche dunkelblau bis fast schwarz gefärbt bzw. nach längerer Einwirkung auch vollständig gelöst.

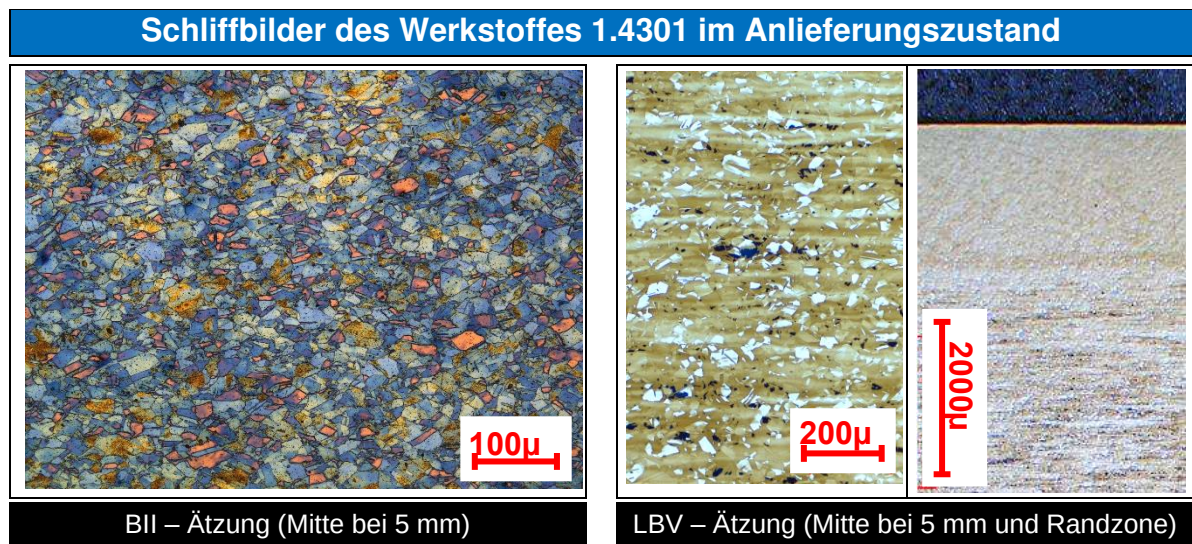


Abbildung 92: Schliiffbilder und Farbätzung gemäß BII (links) sowie nach LBV (rechts) des Werkstoffes im Anlieferungszustandes

Hingegen ist der Austenit in Abhängigkeit seiner Kristallorientierung in einer bläulichen bis rotbraunen Farbe ausgeprägt (Abbildung 92-links). Deutlich sind auch in dieser Farbdarstellung die nach dem Walzvorgang entstandene parallele Zwillingsgrenzen. Unter Anwendung des LBV-Ätzmittels (Abbildung 92-rechts) können im mittleren Bereich des Bleches helle verschwommene Seigerungsstreifen,

sowie Verformungsmartensit (leutend dunkelblau) erkannt werden. Die im speziellen in der Mitte erkennbaren weißen Bereiche ist uneingefärbter Delta-Ferrit. Die LBV-Ätzung zeigt in Abbildung 93 deutlich im Bereich der Oberseite der gehämmerten Probe Nr. 12 eine hohe Versetzungsaktivität, welche über die Tiefe hin abnimmt und in weiterer Folge zum Grundwerkstoff bzw. zur Rückseite hin zu unverformten Gefüge übergeht. Die hohen Versetzungsaktivitäten reichen in Abhängigkeit von den Bearbeitungsparametern bis zu 800 µm Tiefe und korrelieren mit den Tiefenhärtemessung bei den bearbeiteten Proben. Im Vergleich zu der Abbildung des Ausgangszustandes zeigt die bearbeitete Probe Nr. 12 eine deutliche Veränderung des Gefüges, vor allem hinsichtlich der Bildung von Gleitbändern. Die bearbeitete Oberfläche ist in diesem Fall am oberen Rand der Abbildung zu erkennen. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Mehrfachbearbeitung im Speziellen bei der Verwendung eines kleinen Hammerkopfdurchmessers einen starken Einfluss auf die Härtesteigerung an der Oberfläche sowie auf die maximale Eindringtiefe in den Werkstoff nimmt und zu einer erhöhten Versetzungsdichte in den plastisch deformierten Bereichen führt.

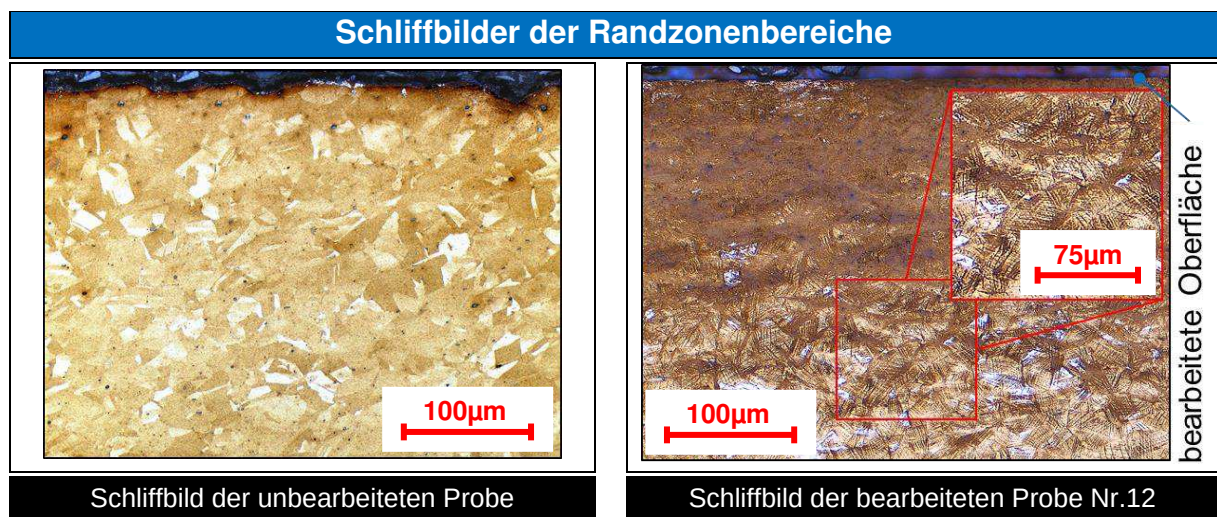
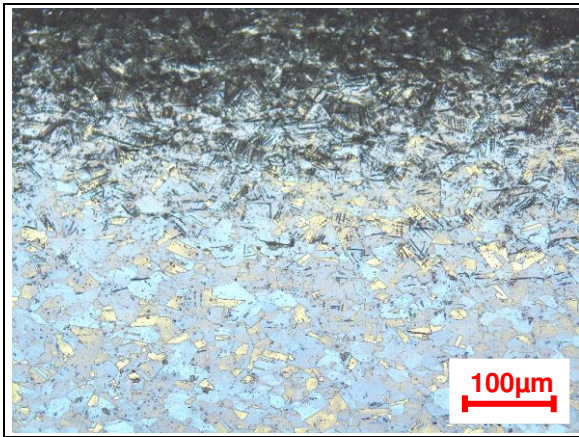


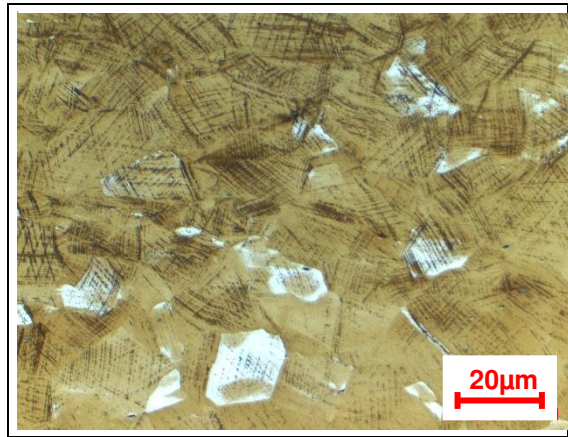
Abbildung 93: Schliffbilder des Werkstoffes X5CrNi18-10 der unbearbeiteten Probe im Anlieferungszustand (links) und der bearbeiteten Probe 12 (rechts) nach LICHTENEGGER und BLOECH-V-Ätzung (LBV),

Die Aufnahmen wurden mit einem Auflichtmikroskop vom Typ Axioplan der Firma Zeiss durchgeführt. Eine deutlich verbesserte Darstellung des metallographischen Gefüges der Werkstoffprobe Nr. 12 ist in einer Tiefe von etwa 500 µm erkennbar. In diesem Bereich ist eine Übergangszone (Abbildung 94-links) zu sehen, welche lediglich minimale Versetzungsaktivitäten zeigt. Es kann somit bei dieser Probe Nr. 12 festgehalten werden, dass eine hohe Konzentration an Verformungsmartensit bis hin zu einer Tiefe von Rund 500 µm detektiert werden kann. Zudem zeigt sich, dass die verformungsinduzierte Martensitbildung mit zunehmender Tiefe geringer konzentriert ist als im Bereich der äußersten Randzone.

Schliffbilder der bearbeiteten Probe Nr. 12



BII – Ätzung (Tiefe 500 µm)

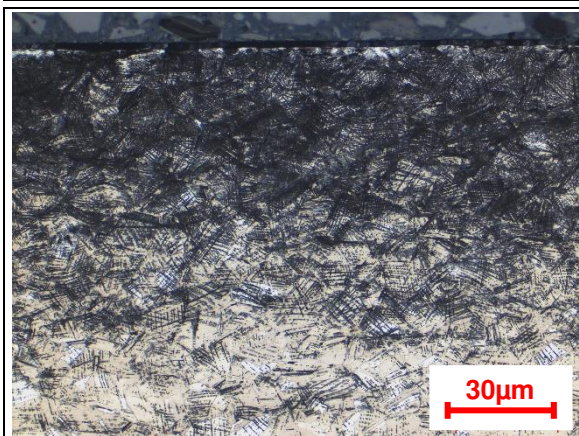


LBV – Ätzung (Tiefe 500 µm)

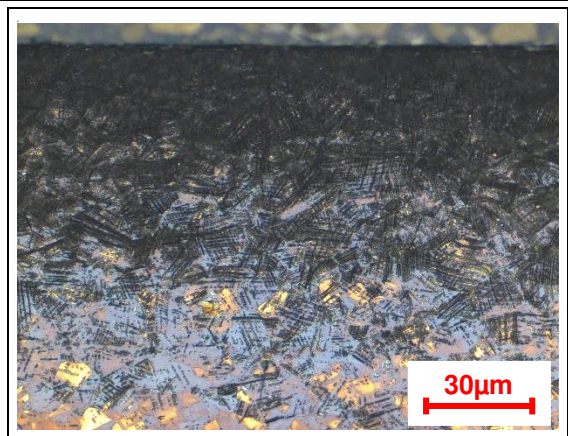
Abbildung 94: Schliffbilder und Farbätzung gemäß BII (links) sowie nach LBV (rechts) der Probe Nr. 12

Zur neutralen Faser hin (Mitte des Bleches) steigt die Gefügesegerung. Wie im oberen Bereich der bearbeiteten Oberfläche ersichtlich steigt mit der zunehmenden Umformung die Kontrastierung des metallographischen Gefüges. Dies erschwert zunehmend eine detailliertere Auswertung und Beurteilung des Gefüges und der Werkstoffphasen.

Schliffbilder der bearbeiteten Proben



BII – Ätzung Probe Nr. 1



BII – Ätzung Probe Nr. 2

Abbildung 95: Schliffbilder und Farbätzung gemäß BII der Proben Nr. 1 (links) sowie der Probe Nr. 2 (rechts)

Unter Anwendung der BII-Ätzung ist es möglich einen besseren Kontrast zu schaffen um die hohe Versetzungsdichte in der Randzone mittels der metallographischen Darstellung sichtbar zu machen. Hierzu sind Gefügeschliffe der Proben Nr. 1, 2, 5 und 13 abgebildet, welche hohe und geringere Versetzungsaktivitäten zeigen. Die Darstellungen der Proben Nr. 1 und Nr. 2 aus Abbildung 95 weisen entsprechend der

Härtemessungen eine hohe Kaltverfestigung auf. Dies kann auch gut anhand des hohen Anteil an schwarzen Versetzungslinien im metallographischen Schliffbild ausgemacht werden. Im Gegensatz dazu zeigt die Probe Nr. 5 eine deutlich geringere Steigerung der Oberflächenhärte. Entsprechend dieser Darstellung sind auch in der Gefügedarstellung deutlich geringere Versetzungsaktivitäten zu erkennen. Vereinzelt lokale hohe Versetzungsaktivitäten können zwar ausgemacht werden, doch lässt sich deutlich das Grundgefüge auch im obersten Randzonenbereich erkennen. Im Vergleich zu den Proben Nr. 1, 2 und 5 ($d = 6$ mm) wurde die Probe Nr. 13 mit einem kleineren Hammerkopf der Größe $d = 3$ mm bearbeitet. Zwar zeigt die Probe Nr. 13 im Vergleich zu den restlichen Versuchsparametern mit dieser Hammerkopfgroße ein durchschnittliches Ergebnis hinsichtlich einer Härtesteigerung, so sind dennoch deutlich die Versetzungsaktivitäten und damit einhergehend die Martensitbildung im Schliffbild zu erkennen. Als weitere Möglichkeit zum Nachweis der Martensitbildung kann eine Auswertung des Gefüges eine EBSD-Analyse angewendet werden. Zur Detektion der martensitischen Phase kann diese durch die Zuweisung einer ferritischen Phase in der Analysesoftware erfolgen. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass diese Analyse eine entsprechende Präparationskette erfordert und somit ein einfacher Nachweis von Martensit nicht möglich ist.

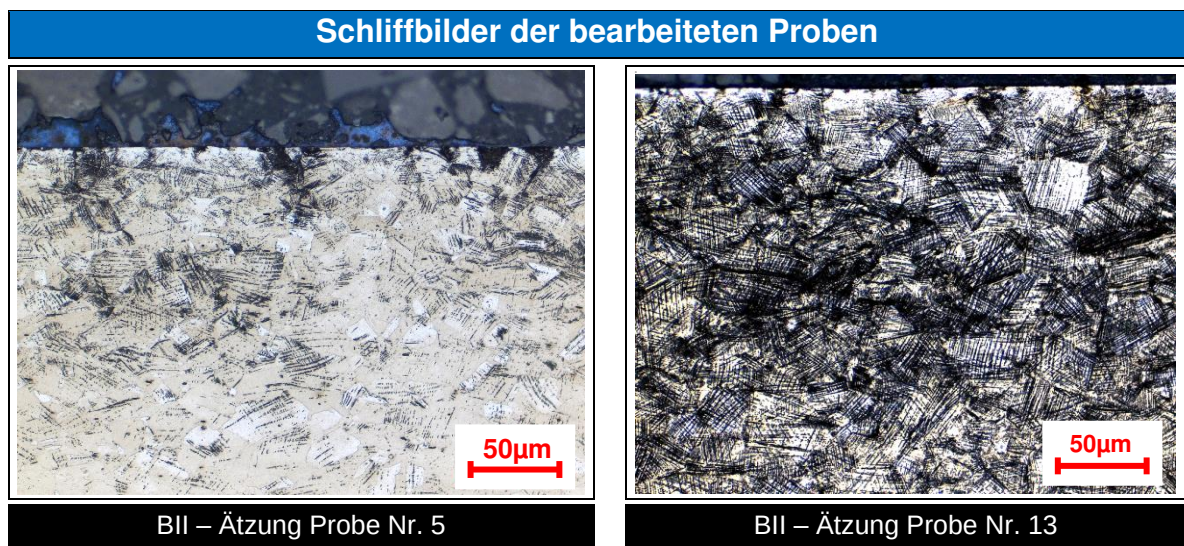
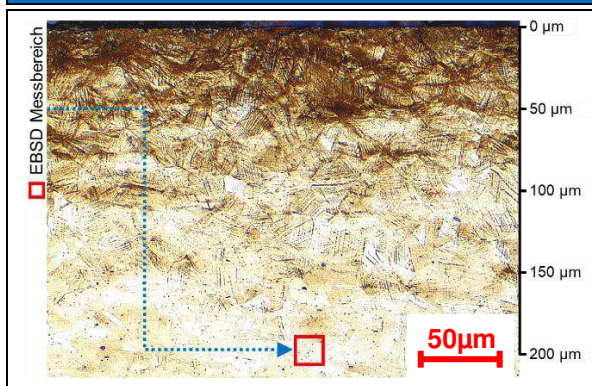


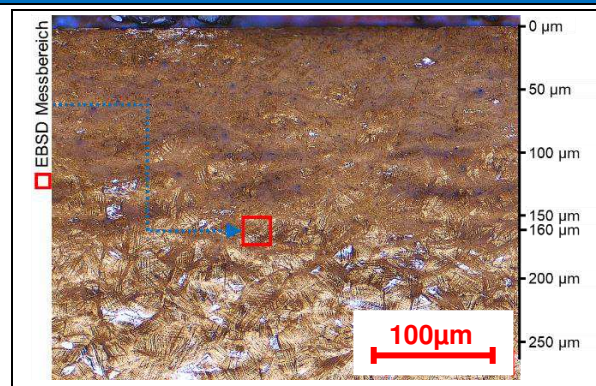
Abbildung 96: Schliffbilder und Farbätzung gemäß BII der Proben Nr. 5 (links) sowie der Probe Nr. 13 (rechts)

Aus diesem Grunde wurden zwei Proben ausgewählt, welche entsprechend der Härtemessung die größte Steigerung im Vergleich zur Grundhärte aufweisen. Die beiden ausgewählten Proben sind für den Hammerkopfdurchmesser $d = 3$ mm die Probe Nr. 12, sowie für $d = 6$ mm die Probe Nr. 4 (Abbildung 97). Die EBSD-Analyse erfolgte unter Anwendung eines Rasterelektronenmikroskops, ausgestattet mit einer „Field Emission Gun – FEI“ vom Typ Quanta 200.

Messpunkte der EBSD-Messungen



Schliffbild der bearbeiteten Probe Nr. 4

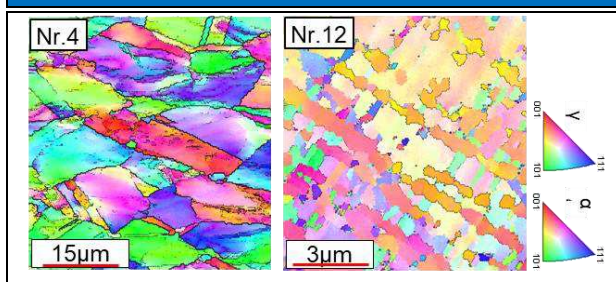


Schliffbild der bearbeiteten Probe Nr. 12

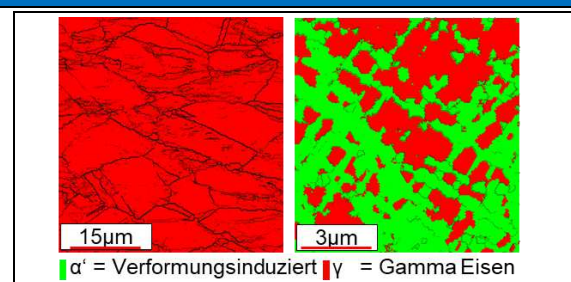
Abbildung 97: Schliffbilder und Farbätzung gemäß LBV der Proben Nr. 4 (links) sowie der Probe Nr. 12 (rechts) mit den Messpunkten zur EBSD-Messungen

Im Gegensatz zur konventionellen Mikroskopie, welche bei stark ausgeprägten Werkstoffphasen Einsatz findet, ist es durch die Anwendung der EBSD-Analyse möglich, Mehrphasenwerkstoffe zu charakterisieren [90]. In dem hier vorliegenden Fall der hohen eingebrachten Energien in die Werkstückoberfläche wird mit der EBSD-Analyse versucht, die Umwandlung zu detektieren. Die untersuchten Werkstoffproben wurden unter einem Winkel von 70° bei einer Beschleunigungsspannung von 15 kV untersucht. Als Schrittweite der EBSD-Untersuchung kamen 200 nm gewählt mit dem das zu untersuchende Messfeld abgerastert wurde. Aufgrund der schlechten Oberflächenqualität beim Ionenstrahlpolieren erfolgte die Vorbereitung der Oberfläche durch einen elektrochemischen Polierprozess.

Ergebnisse der EBSD-Untersuchung



IPV - Probe Nr. 4 und Nr. 12



CCPM - Probe Nr. 4 und Nr. 12

Abbildung 98: Ergebnisse der EBSD-Analyse der Proben 4 und 12 des Werkstoffes X5CrNi18-10 (1.4301), links IPF der Aufnahmen, rechts: Zuordnung der Werkstoffphasen

Die Messung der Probe Nr. 12 erfolgte in einer Tiefe von 160 µm und wurde über eine Feldgröße von 3 µm x 3 µm gescannt. Unter Anwendung der EBSD-Analyse kann die Ausrichtung jedes erfassten Datenpunktes punktspezifisch erfolgen und somit ein Muster der gescannten Oberfläche erzeugt werden kann, welches die

kristallographische Phase als auch die Orientierungen der Kristallstruktur beschreibt. Im Vergleich hierzu wurde bei Probe Nr.4 ein Feld von $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ bei einer Tiefe von $200\ \mu\text{m}$ betrachtet (Abbildung 97). Die Abbildung 98 zeigt für diese beiden Analysen jeweils die IPF (inverse pole figure) sowie die CCMP (Color Coded Phase Map). Die IPF beschreibt eine zweidimensionale stereographische Projektion eines dreidimensionalen Gefüges [132]. Diese stellt Informationen über die Ausrichtung des Gefüges und somit der einzelnen Körner zur Verfügung. Im Gegenzug dazu beschreibt die CCMP eine zweidimensionale Abbildung der einzelnen Werkstoffphasen. Beide der hier gezeigten Proben sind mit einer Mehrfachbearbeitung unter Anwendung des E-MHP-Verfahrens entsprechend der Parameter in Tabelle 50 bearbeitet. In der IPF der Probe 4 sind die einzelnen Körner im wenig verformten Zustand gut zu erkennen. Dieses Feld weist bei der Phasenzuordnung lediglich austenitische Anteile auf. Hingegen zeigt die Messung an der Probe 12 deutlich verformte Strukturen und Verformungsmuster. Aufgrund der großen Versetzungsdichte wurde hier eine geringere Feldgröße als bei Probe 4 betrachtet. Bei der Zuordnung der einzelnen Werkstoffphasen musste für die Detektion der martensitischen Phasenanteile diese über eine raumzentrierte Kristallstruktur eines Ferrits erfolgen. Grund dafür ist, dass α' -Martensit und α -Ferrit beide eine raumzentrierte Kristallstruktur aufweisen [129]. Wie in [133] beschrieben ist der Unterschied in den Kristallstrukturen dieser beiden Phasen α' -Martensit und α -Eisen zu gering, um diesen direkt mittels EBSD messen zu können. Eine Evaluierung der martensitischen Bereiche konnte durch die Zuweisung der krz-Struktur zu dieser Phase bestätigt werden. Durch die vorgestellten Messmethoden konnte die Bildung des α' -Martensit in den Randzonen nachgewiesen werden. Die Bestimmung der Kaltverfestigung mittels der Härtemessung nach VICKERS zeigte auch deutlich, dass die Einwirktiefe der Umformung bis auf rund $800\ \mu\text{m}$ erreicht werden konnte, ehe sich wieder die Grundhärte des unverformten Werkstoffes einstellte. Die Ergebnisse der Härtemessung korrelierten auch mit der Annahme, dass die höchste eingebrachte Umformenergie den größten Einfluss auf die Verfestigungsmechanismen nehmen. Auch stellte sich der Nachweis der Martensitbildung unter Anwendung der EBSD-Analyse ein, sobald eine ferritische Werkstoffphase zum Phasen-Mapping angewendet wird.

6.3 Beschreibung der Umformarbeit

Um aus den Messgrößen aus Abbildung 88 auch den Energieeintrag bestimmen zu können, wird ein kombinierter Ansatz aus messtechnisch bestimmten Größen und analytisch bestimmten Werten verfolgt. Nach JOHNSON [46, S. 363] sind durch den Aufprall einer Kugel auf einer Werkstückoberfläche folgende Parameter für die plastische Umformung verantwortlich: Kugelmasse m_{WZ} , geometrische Abmessungen, die Aufprall-Geschwindigkeit v_0 des Indenters sowie die Materialeigenschaften des Werkstückes bzw. des Werkzeuges. GHAEDNIA [134] konnte zeigen, dass eine plastische Deformation auf der Werkstückoberfläche eintritt, wenn die Zugfestigkeit

des Indenters mindestens dem 1,7-fachen des Werkstückes beträgt. Johnson [46] wiederum zeigte für elastisch-plastische Kontaktbedingungen zwischen einer Kugel und einem elastischen Halbraum, dass der Kontaktdruck p_0 dem 1,6-fachen der Zugfestigkeit des Werkstoffes des zu bearbeitenden Bauteiles betragen muss, um eine Umformung herbeizurufen. Aus der Beziehung nach JOHNSON:

$$\frac{\rho V_Y^2}{Y} = 26 \left(\frac{Y}{E^*} \right)^4 \quad (43)$$

Mit ρ der Dichte des Indenters (Hammerkopf), V_Y der aufzuwendenden Geschwindigkeit des Indenters um eine plastische Deformation hervorzurufen, mit Y der Streckgrenze des Werkstoffes (engl. yield) und dem kombinierten E-Modul der beiden Werkstoffe (Target und Indenter) bei einer Streckgrenze des hier eingesetzten Werkstoffes 1.4301 von 329 N/mm², kann eine notwendige Geschwindigkeit von $V_Y = 3,67 \cdot 10^{-3}$ m/s beschrieben werden bei der bereits plastische Umformung stattfindet. Allenfalls gelten die Kontaktbedingungen nach Hertz. Aus den in den Vorversuchen ermittelten geometrischen Größen der Einzeleindrücke kann die geleistete Umformarbeit berechnet werden. Um diese plastische Umformarbeit zu bestimmen ist durch TABOR et al. [65] ein Berechnungsansatz dargelegt, welcher die benötigte Umformarbeit für eine plastische Deformation beschreibt. Dieser Ansatz besitzt seine Gültigkeit, wenn Reibung sowie die Umformarbeit im Indenter selbst vernachlässigbar sind. Dabei wird ein elasto-plastischer Umformvorgang eines Halbraumes durch eine elastische Kugel angenommen. Mit Hilfe des Modells kann die in der Probe elastisch gespeicherte Arbeit W_2 berechnet werden. Dieser Anteil wird ähnlich einer Feder nach dem Kontakt mit dem Indenter wieder abgegeben und verbleibt nicht als plastische Verformung im Werkstück. Wenn noch die gesamte Arbeit W_1 , die der Indenter am Werkstück verrichtet, bekannt ist, kann der Anteil der Arbeit W_3 , der im Werkstück als plastische Verformung verbleibt, als Differenz (TABOR et al. [65]) berechnet werden. Die Gleichung kann aufgestellt werden zu:

$$E_P = W_3 = W_1 - W_2 = E_{k0} - E_E \quad (44)$$

Die gesamte Arbeit W_1 ergibt sich aus der kinetischen Energie des Indenters, die von der Hammermasse m und der Aufprallgeschwindigkeit v_0 abhängt:

$$E_{k0} = W_1 = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (45)$$

Für die Arbeit $W_2 = E_E$ muss zunächst der Radius r_2 der bleibenden Verformung, die am Werkstück festgestellt wird, berechnet werden. Im Profilschnitt durch einen Eindruck sind die Sehnenlänge d und die Tiefe t_p des Eindrucks messbar. Mit Hilfe der geometrischen Zusammenhänge am Kreissegment ergibt sich der Radius r_2 zu:

$$r_2 = \frac{4t_p^2 + d^2}{8t_p} \quad (46)$$

Außerdem muss jener Radius a_E berechnet werden, der sich an der Oberfläche bei rein elastischem Kontakt zwischen Kugel und Probe ergibt. Dieser ist abhängig von der maximalen Kontaktkraft F , des E-Modul E_1 des Indenters und der Probe E_2 sowie dem Radius des Indenters r_1 und dem oben berechneten Radius r_2 ab. Es gilt nach TABOR et al. [65]:

$$a_E = 1,11 \cdot \left[\frac{F \cdot r_1 \cdot r_2}{2(r_2 - r_1)} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (47)$$

Die Arbeit $W_2 = E_E$ ergibt sich dann zu (Tabor et al. [65]):

$$E_E = W_2 = \frac{0,27 \cdot F^2}{a_E} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \quad (48)$$

In weiterer Folge kann die Arbeit der plastischen Verformung W_3 berechnet werden. Es ist anzumerken, dass den beiden letzten Gleichungen eine Querdehnzahl von 0,3 für Indenter und Werkstück zugrunde liegt. Die Ergebnisse der berechneten plastischen Energien E_P sowie die elastischen Energieanteile E_E sind in der Tabelle 51 zusammengefasst. Diese hier berechneten Energiegrößen zeigen, dass bei der Wahl des größeren Hubes $h = 0,8$ mm eine um den Faktor 4,8 höhere Energie in die Werkstoffoberfläche eingebracht wird als bei einem geringeren Hub von $h = 0,3$ mm. Bei der Annahme einer harmonischen Hammerkopfbewegung kann eine ideale Bahngeschwindigkeit berechnet werden.

Berechnete Umformenergien nach TABOR et al.		
Energiezusammensetzung	$h = 0,8$ mm	$h = 0,3$ mm
W_3 : plastische Energie E_P in mJ	48,15	7,97
W_2 : elastische Energie E_E in mJ	10,27	4,24
W_1 : Gesamtenergie E_{ko} in mJ (Energie vor dem Auftreffen)	58,42	12,21

Tabelle 51: Berechnete Umformenergien am Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) mit dem E-MHP-System und $d = 3$ mm

Diese Betrachtung beschreibt lediglich eine gleichförmige sinusförmige Bewegung und dient zur Abschätzung der Geschwindigkeiten bei gegebener Frequenz f und bei gegebenem Hub h . Die Berechnung der Geschwindigkeit kann nach Gleichung (3) erfolgen. So kann für den Hub $h = 0,8$ mm eine Geschwindigkeit von $v = 0,5$ m/s und für $h = 0,3$ mm ein Wert von $v = 0,19$ m/s berechnet werden. Vergleicht man nun diese berechneten Größen mit den zuvor experimentell bestimmten Werten, so ist zu erkennen, dass diese Werte in ihrer Größenordnung mit denen der vereinfachten Annäherung übereinstimmen. Für einen Hub von $h = 0,8$ mm steht der idealisierten Geschwindigkeit von $v = 0,5$ m/s ein experimentell ermittelter Wert von $v = 0,525$ m/s gegenüber. Im Falle des geringeren Hubes von $h = 0,3$ mm liegt hier ein experimentell ermittelter Wert von $v = 0,24$ m/s vor.

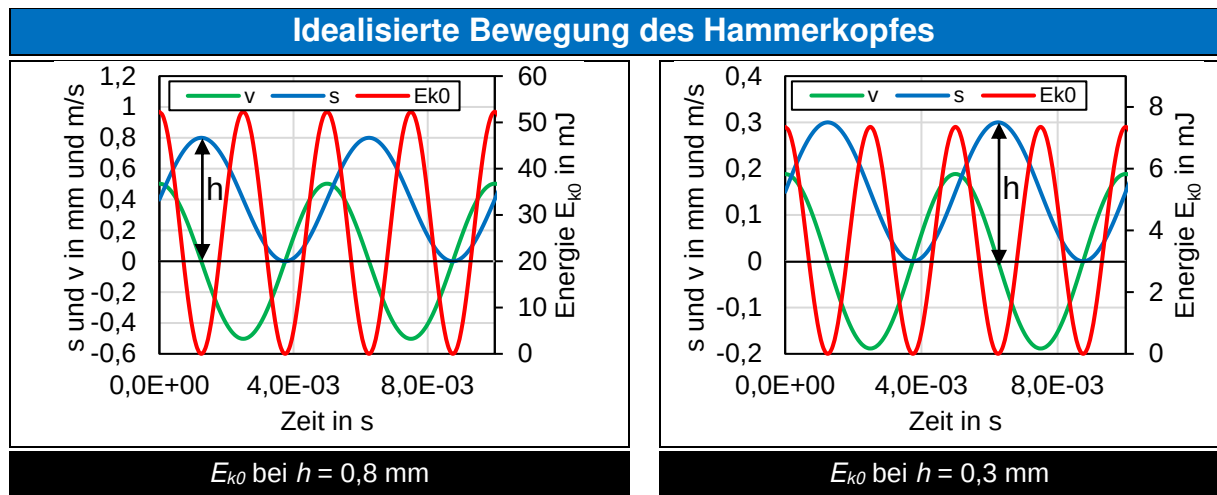


Abbildung 99: Idealisierter Energieverlauf (E_{k0}) vor dem Auftreffen auf die Werkstückoberfläche

Anzumerken ist jedoch, dass diese über den harmonischen Ansatz berechneten Werte der Geschwindigkeit nicht die durch das Aktorsystem zusätzlich aufgebrachte Energie aus dem Schlag-Gegenschlag berücksichtigt und etwaige Verluste beinhaltet. Anhand dieses harmonischen Ansatzes kann mittels der Gleichung Nr. 3 eine idealisierte Energie des Hammerkopfes vor dem Auftreffen auf die Werkstückoberfläche (E_{k0}) beschrieben werden. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abbildung 99 dargestellt. Unter der Annahme, dass neben der Variation des Hubes h auch der Eindruckabstand a in zwei Stufen variiert wird, kann unter der weiteren Voraussetzung einer Matrixbearbeitung (Eindruckabstand $a = \text{Bahnabstand } s$) die plastische Gesamtumformenergie beschrieben werden, welche in die Bauteiloberfläche eingebracht wird (Tabelle 52).

Energieübersicht				
$[a = s] \text{ (mm)}$	0,1	0,1	0,2	0,2
Einzeleinschläge	40.000	40.000	10.000	10.000
Hub $[h] \text{ (mm)}$	0,3	0,8	0,3	0,8
$[W_3 = E_P] \text{ Energie plastisch (mJ)}$	7,97	48,15	7,97	48,15
$n = 1: E_{P\text{-ges}} \text{ (J)}$	318	1.926	79,7	481,5
$n = 1: E_P/A \text{ (J/mm}^2\text{)}$	0,8	4,8	0,2	1,2
$n = 1: E_{P\text{-ges}} \text{ (J)}$	1.272	7.704	318,8	1.674
$n = 1: E_P/A \text{ (J/mm}^2\text{)}$	3,2	19,3	0,8	4,8

Tabelle 52: Berechnete Gesamtumformenergien am Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) für $d = 3 \text{ mm}$

Für die Abschätzung der eingebrachten Energie in die Werkstückoberfläche wird von einer gleichmäßigen Verteilung der Einzeleinschläge ausgegangen. Die Ergebnisse der plastischen Gesamtumformenergie $E_{P\text{-ges}}$ sind wie die plastische Umformenergie je Flächeneinheit E_P/A in J/mm² in der Abbildung 100 zusammengefasst.

Energieübersicht der E-MHP Bearbeitung

Feld Nummer	9	11	13	15
$n = 1: [E_P/A]$ (J/mm ²)	0,8	4,8	0,2	1,2
Feld Nummer	10	12	14	16
$n = 4: [E_P/A]$ (J/mm ²)	3,2	19,3	0,8	4,8

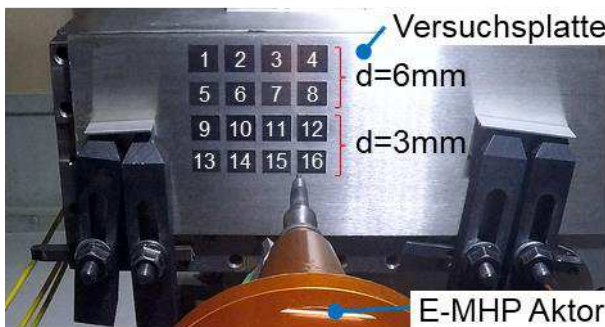


Abbildung 100: links: Zuordnung der berechneten Gesamtumformenergien zu den einzelnen Bearbeitungsfeldern für $d = 3 \text{ mm}$, rechts: Versuchsplatte mit Bearbeitungsfeldern

Die hierzu angenommenen Parameter für den Hub und den Eindruckabstand sind entsprechend angeführt. Zusätzlich findet eine Multiplikation der eingebrachten Energie mit der Anzahl der Überarbeitungen n statt. Aus dieser Tabelle ist für den Hammerkopfdurchmesser $d = 3 \text{ mm}$ ersichtlich, dass die höchste plastische Umformenergie bei großem Hub, geringem Eindruckabstand sowie bei einer Mehrfachbearbeitung eines Einzelfeldes vorliegt. Im speziellen zeigt sich bei dem Feld Nr.12 dass die hohe eingebrachte Energie von $19,3 \text{ J/mm}^2$ die größte Auswirkung auf die Kaltverfestigung nimmt wie dies anhand der Härteverlaufsmessungen gezeigt werden konnte. In Abbildung 100 sind zur besseren Übersicht die in den Werkstoff eingebrachten Energien für den Hammerkopfdurchmesser von $d = 3 \text{ mm}$ den bearbeiteten Feldern zugeordnet.

6.4 Aufbringen von Signaturen

Eine weitere Möglichkeit, den Umwandlungsprozess der Werkstoffphase einfach nachweisen zu können, kann in der Qualifizierung der magnetischen Eigenschaften der umgewandelten Werkstoffphase gefunden werden. Wie bereits beschrieben weist lediglich der α' -Martensit ferromagnetische Eigenschaften auf. Im Gegensatz zum ferromagnetischen Werkstoffen weisen paramagnetische Werkstoffe keine ausgerichteten Bezirke auf. Erst durch Anlegen eines äußeren Feldes richten sich die magnetischen Momente der Atome aus, wie dies in [135, S. 146] beschrieben ist. Es richten sich die sogenannten Spinnomente aus, welche durch die Rotation der Elektronen um sich selbst entstehen und verstärken somit das äußere magnetische Feld [136, S. 473]. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um die Phasenumwandlung nachzuweisen. Grundsätzlich besitzen austenitische Werkstoffe ein paramagnetisches Verhalten und werden im Allgemeinen für Bauteilen eingesetzt, welche ein neutrales Verhalten gegenüber Magnetfeldern aufweisen sollen. Durch die Bildung des verformungsinduzierten martensitischen Gefüges (α' -Martensit) ist ein ferromagnetisches Verhalten möglich. Der verformungsinduzierte Martensit entsteht bei Kaltumformprozessen, typischerweise unter 100°C und ändert in Abhängigkeit des

Umformgrades φ seine relative Permeabilität μ_r (vgl. [122]). Die Permeabilität μ als skalare Größe die Durchlässigkeit eines Materials für magnetische Felder. Nach [137] und [138] ist die Magnetische Flussdichte B (Kraftwirkung des Magnetfelds) mit der magnetischen Feldstärke H über die magnetische Permeabilität μ_r verbunden.

$$B = \mu \cdot H \quad (49)$$

Tabelle 53 zeigt für unterschiedliche metastabile austenitische Stahlwerkstoffe die relative Permeabilität in Abhängigkeit des Umformgrades des Werkstoffes.

Relative Permeabilität in Abhängigkeit vom Umformgrad φ in %				
Werkstoff	$\mu_{rel} (\varphi = 0)$	$\mu_{rel} (\varphi = 10)$	$\mu_{rel} (\varphi = 20)$	$\mu_{rel} (\varphi = 30)$
X5CrNiS18-9 (1.4305)	1,003	1,050	1,620	3,420
X5CrNi18-10 (1.4301)	1,012	1,046	1,626	3,090
X2CrNiMo18-14-3 (1.4435)	1,007	1,008	1,024	1,130
X6CrNiCuS18-9-2 (1.4567)	1,005	1,005	1,012	1,082

Tabelle 53: Relative Permeabilität metastabiler austenitischer Stahlwerkstoffe [139]

Aus dieser Tabelle geht hervor, dass relative Permeabilitätszahlen von bis zu $\mu_r = 3,42$ nachgewiesen werden können und diese mit größer werdendem Umformgrad ansteigen. Als Beispiel kann hier der erreichte Umformgrad φ beim Kugelstrahlen als auch beim Rollieren genannt werden. Dieser kann Werte > 1 (100%) annehmen [140]. In der Abbildung 101 ist ein Beispiel für den einfachen Nachweis der Bildung eines α' -Gefüges dargestellt. Dabei handelt es sich um die MHP-Bearbeitung der Oberfläche des Werkstoffes X5CrNi18-10. Der gezeigte Würfel wurde mit dem P-MHP-System der Firma 3S-Engineering und einem 8 mm Hammerkopf bei $p = 8$ bar und einer Frequenz f von 276 Hz bearbeitet. Hierbei lässt sich die Phasenumwandlung einfach mittels eines handelsüblichen Magneten überprüfen, welcher die ferromagnetischen Eigenschaften der Phasenumwandlung zeigen soll. Zu den Möglichkeiten des Nachweises einer ferromagnetischen α' -Phase zählen die Messung der magnetischen Flussdichte, das Messen der relativen Permeabilität der bearbeiteten Bereiche sowie die Untersuchung des umgeformten Gefüges unter Anwendung der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM). Im Falle der Messung der magnetischen Flussdichte können Magnetometer eingesetzt werden, um den Effekt zu charakterisieren. Unter den Begriff des Magnetometers fallen eine Vielzahl von Messmethoden, welche in [141] näher beschrieben sind. Als Beispiel einer gängigen Methode zur Messung der Flussdichte können Hall-Sensoren genannt werden. Unter dem Hall-Effekt versteht man die Ablenkung von Elektronen durch ein Magnetfeld und einer daraus resultierenden elektrischen Spannung. Diese Ablenkung resultiert aus der wirkenden Lorentz-Kraft, welche eine bewegte elektrische Ladung in einem magnetischen oder elektrischen Feld erfährt. Diese ist senkrecht auf die Bewegungsrichtung der Ladung und zu den Feldlinien des Magnetfelds ausgerichtet. So liefert ein mit einem Speisestrom durchflossener Hall-Sensor in einem Magnetfeld eine Hall-Spannung. Aus der Verknüpfung von Speisestrom und Hallspannung lässt

sich die magnetische Flussdichte bestimmen (siehe [141]). Als Beispiel zur direkten Messung des Phasenanteiles ist ein unter der Bezeichnung „Ferritscope“ anwendbares Verfahren zu nennen. Dieses arbeitet über ein Wechselfeld in einer Messspule, welches durch eine Erregerspule gespeist wird. Über die Wechselwirkung zwischen Erregerspule und Messspule kann mittels Korrekturfaktoren auf den Ferritgehalt rückgeschlossen werden [142].

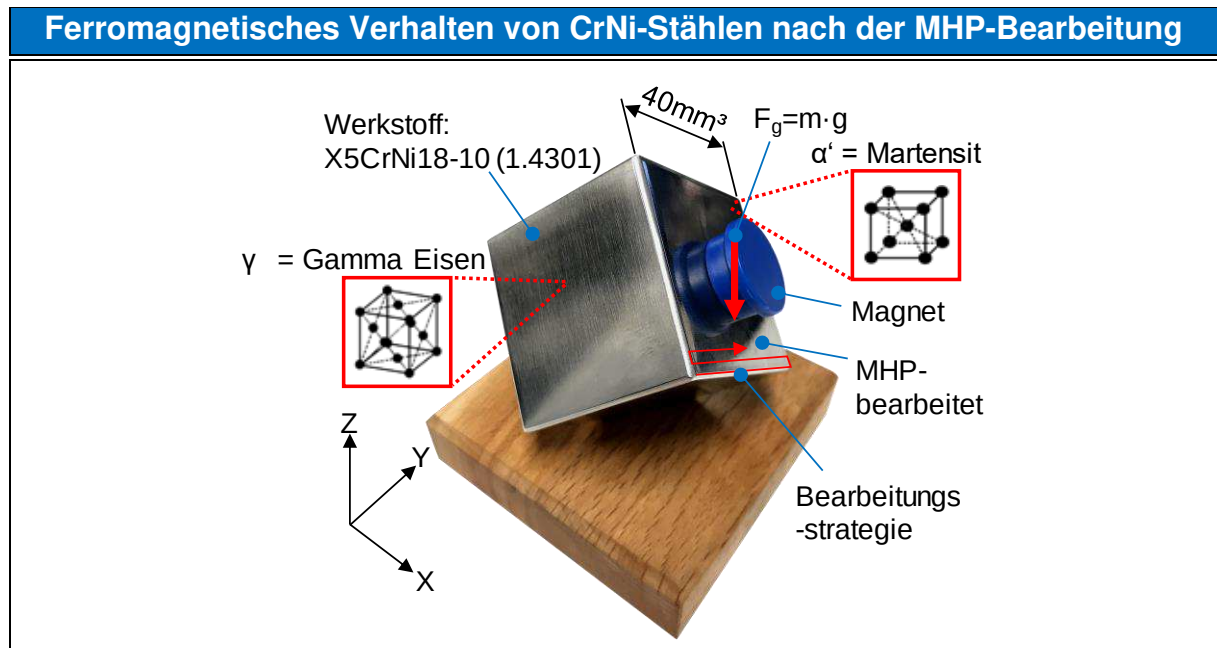
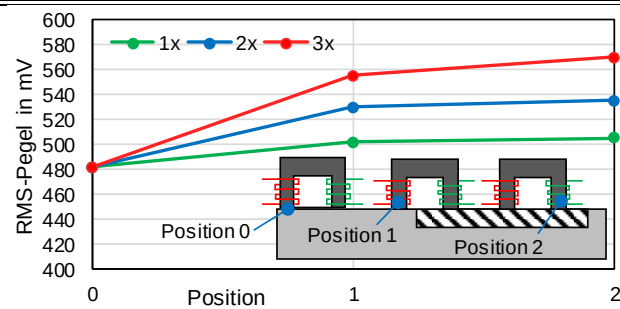
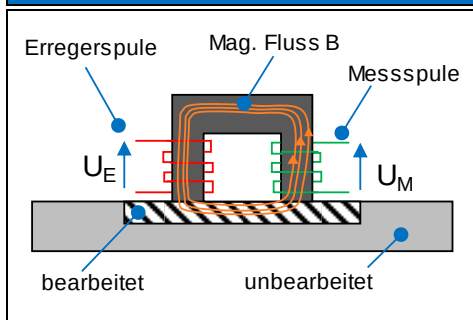


Abbildung 101: Einseitig MHP – bearbeitete Probe des Werkstoffes X5CrNi18-10 mit ferromagnetischem Verhalten

Ein Versuchsaufbau mit einem ferritischen C-Kern und zwei um die Schenkel gewickelte Spulen mit identen Eigenschaften bietet eine weitere einfache Möglichkeit, den Effekt der Phasenumwandlung zu detektieren. In diesem Fall repräsentiert eine Spule die Erregerseite und die zweite stellt die Messspule dar. Wird die Erregerspule nun mit einem Wechselfeld beaufschlagt, so kann auf der Messspule eine induzierte Spannung gemessen werden. Diese Spannung ist unter anderem vom vorliegenden Magnetkreis abhängig und wird durch das Aufsetzen des C-Kerns auf eine bearbeitete Oberfläche beeinflusst. In einem Versuchsaufbau konnte bei der Bearbeitung des Werkstoffes X5CrNi18-10 (1.4301) mit dieser Methode die Veränderung der Werkstoffphase nachgewiesen werden. Der Versuchsaufbau zur Bestimmung der magnetischen Leitfähigkeit ist in Abbildung 102 dargestellt. Darin beschreibt U_E die Erregerspannung und U_M die Messspannung. In Abbildung 102 rechts sind neben drei unterschiedlichen Messpositionen auch drei unterschiedliche Kurven der Messspannung U_M bei gegebener Erregerspannung U_E abgebildet. Im Falle der Kurven handelt es sich um Messwerte von unterschiedlich bearbeiteten Messfeldern. So wurden drei Messfelder untersucht, welche mit dem E-MHP-System einmal (Feld 1), zweimal (Feld 2) und dreimal (Feld 3) bearbeitet wurden.

Versuchsaufbau zur Messung der magnetischen Leitfähigkeit



MHP-Bearbeitungsparameter:

$d = 6 \text{ mm}$ $f = 200 \text{ Hz}$ $v = 1200 \text{ mm/min}$ Werkstoff: X5CrNi18-10 (1.4301)
 $l = 100\%$ $a = 0,1 \text{ mm}$ $s = 0,1 \text{ mm}$ $h = 1 \text{ mm}$

Abbildung 102: Messung der magnetischen Eigenschaften des Werkstoffes X5CrNi18-10, links: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, rechts: Ergebnis der Messung des Spannungswertes der Messspule in Volt in Abhängigkeit der Messposition

In Abhängigkeit von der Position des C-Kerns und dem Bearbeitungsfeld konnten somit die drei Kurvenverläufe erstellt werden. Wie aus dem Ergebnis ersichtlich ist, ist es mit diesem einfachen Aufbau möglich, ein bearbeitetes Feld von einem unbearbeiteten zu unterscheiden. Als Voraussetzung hierbei gilt jedoch, dass sich durch die MHP-Bearbeitung eine Änderung der magnetischen Leitfähigkeit einstellt. Zudem ist aus den Kurvenverläufen der Einfluss einer Mehrfachbearbeitung zu erkennen. Mit zunehmender Umformung steigt auch die magnetische Leitfähigkeit im Werkstoff und ein höherer Spannungspegel an der Messspule ist messbar.

Widerstand R in Ω	Induktivität L in μH	d-Draht in mm	Windungsanzahl N	Erregerfrequenz f in kHz	Scheitelwert der Erregerspannung U in V
0,3	107	0,25	30	60	10

Tabelle 54: Kennwerte der Erreger- und der Messspule

Dieses Ergebnis bestätigt auch die zuvor in diesem Kapitel diskutierten Ergebnisse der EBSD-Analyse und der Härtemessungen. In Tabelle 54 sind die Daten der Erreger- als auch der Messspule und der Versorgungsspannung zusammengefasst. In dem hier gezeigten Aufbau liegt zwischen Erreger- und Messspule eine gegensinnige Wicklung vor. Nachdem der Nachweis der Phasenumwandlung erbracht werden konnte und auch Methoden zur Messung und zum Nachweis des Effektes dargestellt wurden, kann dies auch für eine gezielte Gefügeumwandlung und somit zur lokalen Erhöhung der magnetischen Leitfähigkeit von Werkstoffen herangezogen werden. Durch die NC-geführte Bearbeitungsmöglichkeit eines MHP-Systems ist es möglich, Markierungen auf Bauteiloberflächen ähnlich einem Barcodesystem aufzubringen. Unter dem Titel „Verfahren zur Bearbeitung eines einen Informationsbereich aufweisenden Bauteils, Bauteil mit einem Informationsbereich und Messsystem“ ist mit der Dokumenten-Referenz-Nr. 2018111316194000DE [148] eine Erfindung beschrieben,

welche vorzugsweise an metallischen Werkstoffen einen Informationsbereich abbilden kann, der über einen definierten Umformprozess erzeugt wird. Diese gezielt erstellte Codierung kann mittels der zuvor genannten Messmethoden detektiert werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Martensitumwandlung auch in der Tiefe des Werkstoffes stattfindet, kann die Oberfläche durch einen mechanischen Abtragprozess (z.B. Schleifen) eingeebnet werden, um die Bearbeitungsbereiche unsichtbar zu gestalten. Auch eine Beschichtung der Oberfläche ist denkbar. Weitere Anwendungsgebiete können Positionsmesssysteme, Schließsysteme oder die Originalteileüberwachung von Bauteilen sein. Ein weiteres Beispiel ist in der Abbildung 103 dargestellt, welche ein Schließsystem mit MHP-kodiertem Schlüssel zeigt.

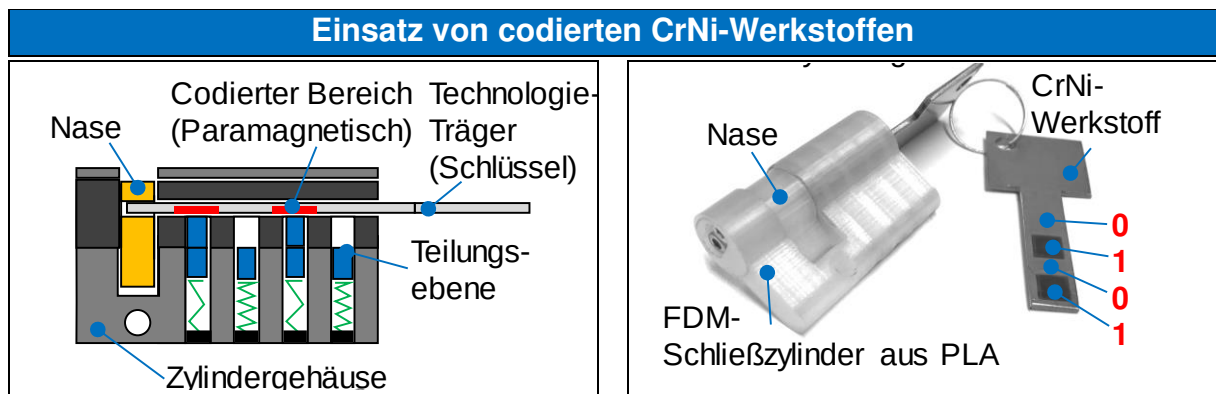


Abbildung 103: Anwendungsbeispiel eines MHP-kodierten CrNi-Werkstoffes, links: Funktionsprinzip, rechts: Prototyp eines mechanischen Schließsystems

Auf Basis von bearbeiteten und unbearbeiteten Bereichen ist es möglich, auf der Oberfläche des CrNi-Werkstoffes eine Codierung aufzubringen. Diese repräsentiert in diesem Falle den Binärcode 1-0-1-0 (gehämmert-unbearbeitet-gehämmert-unbearbeitet). Mittels einer mechanischen Umsetzung des Schließsystems über Feder und Permanentmagneten kann ein Öffnen realisiert werden. Das Thema der magnetcodierten Schließsysteme findet sich auch in den diversen Patentschriften wie etwa AT341901B [143] oder in EP2803792B1 [144]. Im Gegensatz zu den hier angeführten Patentschriften kann der partiell-codierte CrNi-Schlüssel als monolithischer Körper ausgeführt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Wie in dieser Arbeit gezeigt werden konnte, nimmt das maschinelle Oberflächenhämmern eine wichtige Rolle im Bereich der Fertigungstechnik ein. In Abhängigkeit von dem eingesetzten Aktorsystem ist es möglich, ein breit gefächertes Anwendungsspektrum der Technologie aufzuspannen. Ausgehend von den bereits etablierten Einsatzmöglichkeiten wie der Oberflächenglättung oder Steigerung der Oberflächenhärte konnte in dieser Arbeit das Anwendungsspektrum dieser Technologie um die Erzeugung kleinster Oberflächenstrukturen und der gezielten Phasentransformation erweitert werden.

Zunächst wurden die einzelnen Prozesskomponenten der MHP-Bearbeitung im Detail betrachtet. Dabei richtete sich der Fokus zunächst auf die System- und Prozessgrößen. Anhand des eingesetzten Maschinensystems zur Bahnbewegung wurde eine statische als auch die dynamische Charakterisierung eines Sechs-Achs-Industrieroboters vom Typ KUKA KR30-3 durchgeführt. Im Detail wurde dessen Eignung als Maschinensystem für den MHP-Prozess untersucht. So konnte gezeigt werden, dass die geringe Steifigkeit als auch die Bahndynamik des Roboters in dieser Ausführung das Bearbeitungsergebnis der MHP-Bearbeitung beeinflusst. So sind es im speziellen Strukturschwingungen welche direkt auf der Oberfläche abgebildet werden und damit eine Welligkeit hervorrufen. Zudem konnten die Auswirkungen unterschiedlicher Bearbeitungsstrategien auf das Bearbeitungsergebnis, sowie eine Gegenüberstellung der Roboterbearbeitung zu einem Fünf-Achs-Bearbeitungszentrum behandelt werden. Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen und der Erkenntnis, dass es im Bereich von Bahnnumkehrpunkten zu einer erhöhten plastischen Umformung kommt, wurde in Abschnitt 4.2 eine Möglichkeit zur Koppelung der Bearbeitungsparameter mit der Bahndynamik des Roboters vorgestellt. Auf Basis des E-MHP-Systems wurde eine gezielte Steuerung der Hämmerfrequenz als auch der Intensität realisiert. Durch diese gezielte Steuerung der Prozessparameter des E-MHP-Systems konnte eine Optimierung bei der Oberflächenstrukturierung sowie bei der Kantenbearbeitung erreicht werden.

Im nächsten Abschnitt 4.3 wurde der Einfluss der MHP-Aktorik auf den Energieeintrag in den Werkstoff untersucht. Ausgehend von einer Beschreibung des Energiezustandes während des elastisch-plastischen Umformprozesses erfolgte der Vergleich zwischen drei unterschiedlichen MHP-Systemen auf Basis einer expliziten Umformsimulation mit der Software ANSYS WB. Durch diese modellhafte Beschreibung des Umformprozesses konnte der Einfluss des mechanischen Aufbaus der Aktorik beschrieben werden. So wurde gezeigt, dass die Aktorik einen Anteil der Energie zur Umformung in sich aufnimmt. Anhand einer Referenzgeometrie wurde das E-MHP-System mit einem Kugelfalltest und einem neuen MHP-Antriebskonzept verglichen. Es konnte dabei gezeigt werden, dass die kinetische Energie zu einem Teil

in elastische Umformarbeit im Werkzeug umgewandelt wird und dadurch die ins Werkstück eingebrachte Energie mindert. Die dabei eingebrachte Umformarbeit ist maßgeblich vom mechanischen Aufbau des Systems abhängig. Durch eine kompakte Anordnung der bewegten Massen konnte anhand eines Konzeptes die verbesserte Energieeinbringung in den Werkstoff vorgestellt werden.

In Abschnitt 4.4 wurden experimentelle Untersuchungen an unterschiedlichen Werkstoffen durchgeführt, um den Einfluss dieser auf die Oberflächenglättung und den Effekt der Kaltverfestigung zu untersuchen. Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche MHP-Systeme verwendet und deren Auswirkungen auf das Bearbeitungsergebnis miteinander verglichen. Neben der Untersuchung von Kalt- und Warmarbeitsstählen sowie Vergütungs- und CrNi-Stählen wurde auch eine Aluminiumknetlegierung mit einem elektrodynamischen sowie mit einem pneumatischen Hammersystem bearbeitet. Unter Anwendung statistischer Auswertemethoden konnten die Einflüsse der Stellgrößen auf die Oberflächenglättung sowie auf die Kaltverfestigung für die untersuchten Werkstoffe und der beiden Aktoriken erhoben werden. Das Ergebnis dieser Untersuchungen resultierte in ausgearbeiteten Datenblätter, welche der Dissertation als Anhang beigelegt sind.

Resultierend aus den in der Arbeit gewonnenen Erkenntnissen wurden in Kapitel 5 Mikrostrukturen auf der Oberfläche eines Warmarbeitsstahles unter Anwendung einer piezoelektrischen MHP-Aktorik erzeugt. Aufgrund der Erkenntnisse aus in Kapitel 4 wurde gezeigt, dass mit bestehenden MHP-Aktoriken eine Herstellung von kleinsten Oberflächenstrukturen in der Werkstückoberfläche nicht umsetzbar ist. Aus diesem genannten Grund wurde eine piezobasierte Aktorik entwickelt welche eine Mikrostrukturierung herstellen konnte. Bei einem Abstand der Strukturmerkmale von $a = s = 30 \mu\text{m}$ in Längs- und Querrichtung der Bearbeitung mussten kleinste Hammerkopfspitzen aus HM mit einem Spitzenradius von $2 \mu\text{m}$ eingesetzt werden. Zudem war es notwendig, für die Strukturierung ein Bearbeitungszentrum als Maschinensystem heranzuziehen, um eine möglichst hohe Positioniermöglichkeit gewährleisten zu können. Der bereits in Kapitel 4.4 eingesetzte Warmarbeitsstahl X138CrMoV5-1 (1.2343) konnten letztendlich auf einer Feldgröße von $16 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ strukturiert werden. Dies bedeutet, dass über 284.000 Einzeleindrücke mit einer Strukturtiefe von mindestens $15 \mu\text{m}$ erzeugt werden konnten. Bei der Strukturierung der Oberflächen stellte sich heraus, dass die Strukturen mit einem Aspektverhältnis von größer 0,8 (t_p/d_i) in der Oberfläche des Werkzeugstahles hergestellt werden konnten. Somit konnte gezeigt werden, dass es mit diesem mechanischen Verfahren möglich ist Aspektverhältnis in die Richtung 1 zu realisieren. Die dabei strukturierten Bauteile – ausgeführt als Einleger für ein Spritzgusswerkzeug – konnten in einem nachgelagerten Spritzgussprozess an einen Polycarbonatkunststoff abgeformt werden. Die hergestellten Kunststoffbauteile zeigten im Bereich des strukturierten Bereiches eine positive erhabene Mikrostruktur.

Durch eine Kontaktwinkelmessung eines aufgetragenen Wassertropfens konnte eine wasserabweisende Wirkung auf der Oberfläche der abgeformten Kunststoffbauteile festgestellt werden. Durch die Wahl von geeigneten Spritzgussparametern konnte ein Benetzungswinkel (Kontaktwinkel) von über 114° des Wassertropfens gemessen werden.

In Kapitel 6 wurde auf mikroskopischer Ebene der Einfluss der E-MHP-Bearbeitung auf einen metastabilen austenitischen CrNi-Werkstoff beschrieben. Im Detail ließ sich der Einfluss einer Mehrfachbearbeitung auf die verformungsinduzierte Martensitbildung und die damit einhergehende Steigerung der Oberflächenhärte nachweisen. Der Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) zeigte im Vergleich zu den in Kapitel 4.4 untersuchten weichmartensitischen CrNi-Werkstoff vom Typ X3CrNiMo13-4 (1.4313) eine deutlich höhere Neigung zur Kaltverfestigung. Auf Basis von Messergebnissen und einer analytischen Beschreibung der Kontaktmechanik nach TABOR et. al. [65] konnte auch die in den Werkstoff eingebrachte plastische Umformarbeit berechnet werden. Einhergehend mit der Phasenänderung durch die MHP-Bearbeitung wurde das paramagnetische Verhalten der krz-Gitterstruktur beschrieben und in weiterer Folge untersucht. Hervorzuheben hierbei ist, dass durch eine Erhöhung der plastischen Umformung an der Werkstoffoberfläche auch der Anteil der verformungsinduzierten α' -Phase (Martensit) erhöht werden kann. Als weiteres Unterscheidungsmerkmal zum weichmartensitischen CrNi-Werkstoff konnte anhand der Phasenumwandlung des metastabilen Austenits hin zu einer martensitischen Phase gezeigt werden, dass im Bereich der gehämmerten Bereiche ein paramagnetisches Werkstoffverhalten vorliegt. Im Gegensatz dazu weist der Werkstoff X3CrNiMo13-4 (1.4313) ein ferromagnetisches Verhalten unabhängig von der Bearbeitung auf. In einem weiteren Versuch konnte die steigende magnetische Leitfähigkeit bei einer erhöhten plastischen Umformung nachgewiesen werden.

Das Ergebnis dieser Arbeit zeigte, dass durch eine gezielte Steuerung der Hämmerparameter, der Auswahl geeigneter Bearbeitungsstrategien und Maschinensysteme die Wirkgrößen der MHP-Bearbeitung beeinflusst werden können. Im speziellen die definierte Phasentransformation des Werkstoffs X5CrNi18-10 (1.4301) beinhaltet ein großes Potential im Bereich der Codierung von Bauteilen. Neben den in dieser Arbeit festgestellten paramagnetischen Eigenschaften sind es im speziellen die Fragen welche minimale örtliche Auflösung und damit auch verbunden welche örtliche Abgrenzungen der Phasenumwandlung erzielt werden können. Auch im Bereich einer automatisierten Auslösemöglichkeit und der Informationsdichte dieser erzeugten Codierung besteht noch ein großes Potential.

Neben den erzeugten Wirkgrößen und den damit veränderten Eigenschaften in der Werkstückrandzone muss zukünftig vor allem die Optimierung von Aktorsystemen im Fokus der weiteren Tätigkeiten im Bereich des maschinellen Oberflächenhämmerns

stehen. So ist das in dieser Arbeit vorgestellte DIP-System in umfangreichen experimentellen Versuchen einzusetzen. Dieser Schritt ist als Notwendig einzustufen um zukünftig mit diesem System einen definierten Energieeintrag in die Werkstückoberfläche vornehmen zu können. Anhand dieses Systems mit der eingebauten Wegmesssensorik und der gekoppelten Leistungselektronik könnte die vorhin skizzierte Bauteilcodierung von CrNi-Werkstoffen bestmöglich umsetzbar sein.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Elastisch-plastische Umformung bei der MHP-Bearbeitung.....	13
Abbildung 2: MHP-Prozess als Systemdarstellung	14
Abbildung 3: Einordnung des maschinellen Oberflächenhämmerns	18
Abbildung 4: Systemcharakterisierung geführter MHP-Prozesse.....	19
Abbildung 5: Gegenüberstellung der kinetischen Energie aktueller MHP-Systeme ..	22
Abbildung 6: Entwicklung mechanischer Systeme zur Oberflächenbearbeitung.....	23
Abbildung 7: FORGEfix (Air) und Funktionsprinzip des Schlagmechanismus	25
Abbildung 8: Handbediengeräte des Herstellers PiTEC des Herstellers DYNATEC.	26
Abbildung 9: E-MHP Hammersystem der Fa. accurapuls	28
Abbildung 10: Mechanische Festhammervorrichtung Ecopeen	29
Abbildung 11: Funktionsprinzip und Aufbau piezoelektrischer MHP-Systeme	30
Abbildung 12: UIT-Systeme im Labor- und Handbetriebssetup	31
Abbildung 13: DIP-MHP-Aktor des IFT	34
Abbildung 14: Bezeichnung und Symbole der Prozessparameter VDI 34	35
Abbildung 15: Einteilung der Wirkgrößen bei der MHP-Bearbeitung.....	37
Abbildung 16: Ergebnis der plastischen Umformung durch einen MHP-Prozess.....	38
Abbildung 17: Beschichtung von Werkstoffoberflächen	39
Abbildung 18: Auswirkung der MHP-Bearbeitung auf die Oberflächenrauheit.....	41
Abbildung 19: Strukturierte Oberflächen mit E-MHP –	43
Abbildung 20: Einfluss der MHP-Bearbeitung auf die Kaltverfestigung,.....	45
Abbildung 21: Ergebnisse einer Simulation des MHP-Prozesses	46
Abbildung 22: Beeinflussung des Werkstoffgefüges durch MHP	47
Abbildung 23: Systemgrößen bei der MHP-Bearbeitung.....	51
Abbildung 24: Sechs-Achs-Roboter KUKA KR30-3 mit E-MHP-Aktor.....	52
Abbildung 25: Messung der Position des Roboterflansches bei MHP-Bearbeitung ..	54
Abbildung 26: Vergleich des dynamischen Verhaltens von Maschinensystemen	55
Abbildung 27: Schwingungsverhalten des Roboters	57
Abbildung 28: Darstellung der gedämpften und ungedämpften Schwingung.....	57
Abbildung 29: Hysterese der 1. Hauptdrehachse des Roboters KUKA KR30-3.....	59

Abbildung 30: Einfluss der Bearbeitungsstrategie zur Oberflächenstrukturierung	60
Abbildung 31: Auswirkung der Interpolationsart auf die MHP-Bearbeitung	62
Abbildung 32: Bahndynamik unterschiedlicher Interpolationsarten am Roboter	63
Abbildung 33: Geschwindigkeitsdarstellung eines Bahngeschwindigkeitsverlauf	64
Abbildung 34: Festgelegte Bearbeitungsstrategien zur Kantenbearbeitung.....	65
Abbildung 35: Ergebnis der Bearbeitungsstrategien zur Kantenbearbeitung	66
Abbildung 36: Abweichungen der umgeformten Kante in Bezug auf die Sollkontur..	67
Abbildung 37: Konzept für das E-MHP-System zur Frequenzsteuerung.....	69
Abbildung 38: Signallogik der Datenverarbeitung zur Anpassung der Steuersignale	70
Abbildung 39: Ansteuerungsverhalten des E-MHP-Systems	71
Abbildung 40: Ergebnis einer ungesteuerten E-MHP-Bearbeitung Al-2024-T351.....	71
Abbildung 41: Ergebnis unterschiedlicher Bearbeitungsstrategien Al-2024-T351.....	73
Abbildung 42: Ergebnis einer gesteuerten E-MHP-Bearbeitung Al-2024-T351.....	74
Abbildung 43: Vergleich Profilschnitte der Referenz- und optimierten Bearbeitung..	75
Abbildung 44: Optimierte Kantenbearbeitung mit dem E-MHP System	76
Abbildung 45: Modellaufbau der explizit transienten Energiesimulation.....	79
Abbildung 46: Kontaktmodell und Materialmodell der Simulation.....	80
Abbildung 47: Transiente Energiedarstellung während des Aufpralls	81
Abbildung 48: Ergebnis der transienten Verläufe der kinetischen Energien i.....	82
Abbildung 49: Aufgenommenen Arbeit durch das Werkzeug	83
Abbildung 50: Hämmerfrequenz des pneumatischen MHP-System.....	86
Abbildung 51: Kontaktkraftmessung des pneumatischen MHP-Systems.....	87
Abbildung 52: Versuchsfelder und Systemübersicht der Parameterstudie.....	89
Abbildung 53: Haupteinflussfaktoren der Parameteruntersuchungen	90
Abbildung 54: Ergebnis der Oberflächenhärte für die Aluminiumlegierung Al2014...	91
Abbildung 55: Oberflächenhärte für P-MHP-bearbeitete Stahlwerkstoffe	92
Abbildung 56: Oberflächenhärte für E-MHP-bearbeitete Stahlwerkstoffe	93
Abbildung 57: Rauheitswerte für den E-MHP- und P-MHP Al-2024-T351	96
Abbildung 58: Rauheitswerte für P-MHP bearbeitete Werkstoffe.....	97
Abbildung 59: Rauheitswerte für E-MHP bearbeitete Werkstoffe.....	98
Abbildung 60: Haupteffekte zur Glättung der Werkstoffoberfläche Al-2024-T351.....	99

Abbildung 61: Strukturierte Oberflächen kraft- und weggesteuert.....	103
Abbildung 62: Physikalische Effekte von Piezokeramiken	106
Abbildung 63: Dehnung, Polarisierung und Feldstärke bei Piezokeramiken	107
Abbildung 64: Spannungs-Auslenkungs-Verhalten eines Stapel-Piezo-Aktors.....	108
Abbildung 65: Aufbau des uniaxialen Schwingtisches.....	110
Abbildung 66: Axiale Lagerung der Piezo-Stacks.....	113
Abbildung 67: Ergebnis der FEM-Modalanalyse der Piezo-Antriebseinheit	114
Abbildung 68: MHP-PZ-Aktor	116
Abbildung 69: Vorderansicht des eingesetzten Piezoverstärkers.....	118
Abbildung 70: Bestimmung des Resonanzverhaltens des PZ-Aktors	119
Abbildung 71: Schwingungssignale des MHP-PZ-Aktors	120
Abbildung 72: Strukturierungswerkzeuge aus WC-Co (9% und 11,5% Co)	122
Abbildung 73: Merkmale von Mikrostrukturen als Negativ und Positivgeometrie	124
Abbildung 74: Systemaufbau des PZ-Aktors	124
Abbildung 75: Mikrostruktur am mit AlCrN-beschichtetem Hartmetallwerkzeug	126
Abbildung 76: Mikrostruktur am Werkstoff X38CrMoV5-1, Pyramide, Kegel.....	127
Abbildung 77: Mikrostruktur am Werkstoff X38CrMoV5-1 55°-Pyramiden-WKZ	128
Abbildung 78: REM-Aufnahmen einer WC-Co-Werkzeugspitze.....	129
Abbildung 79: REM-Aufnahmen der Mikrostruktur X38CrMoV5-1 mit 55°-Kegel....	129
Abbildung 80: Tiefenverlaufsprofil für 55°-Kegel und 55°-Pyramidenstruktur	130
Abbildung 81: Benetzungsverhalten von Oberflächen.....	131
Abbildung 82: Optische Oberflächenmessung der Negativ undr Positivstruktur	133
Abbildung 83: Kegelförmig strukturierter Formeinleger aus X38CrMoV5-1.....	136
Abbildung 84: Strukturierte Oberfläche eines Spritzgussbauteils a.....	136
Abbildung 85 Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen.....	137
Abbildung 86: Darstellung der Phasentransformation	141
Abbildung 87: Umwandlungsmechanismen zur Martensittransformation,.....	143
Abbildung 88: Versuchsaufbau und Ergebnisse der Prozess- und Wirkgrößen.....	145
Abbildung 89: Wegmessung der Hammerkopfbewegung	146
Abbildung 90: Ablauf zur Gefügeuntersuchung	148
Abbildung 91: Härtetiefenverlaufsmessungen des Werkstoffes X5CrNi18-10	148

Abbildung 92: Farbätzung gemäß BII und LBV im Anlieferungszustandes	149
Abbildung 93: Schliffbilder der unbearbeiteten Probe, Nr.12 (LBV)	150
Abbildung 94: Schliffbilder und Farbätzung gemäß BII und LBV der Probe Nr. 12.	151
Abbildung 95: Schliffbilder und Farbätzung gemäß BII der Proben Nr. 1, Nr. 2.....	151
Abbildung 96: Schliffbilder und Farbätzung gemäß BII der Proben Nr. 5, Nr. 13....	152
Abbildung 97: Schliffbilder und Farbätzung gemäß LBV der Proben Nr. 4, Nr. 12..	153
Abbildung 98: Ergebnisse der EBSD-Analyse der Proben 4 und 12	153
Abbildung 99: Idealisierter Energieverlauf (E_{k0}) vor dem Auftreffen	157
Abbildung 100: Gesamtumformenergien und Zuordnung zu Bearbeitungsfeldern..	158
Abbildung 101: MHP – bearbeitete Probe des Werkstoffes X5CrNi18-10.....	160
Abbildung 102: Messung der magnetischen Eigenschaften des Werkstoffes	161
Abbildung 103: Anwendungsbeispiel eines MHP-codierten CrNi-Werkstoffes.....	162
Abbildung 104: Geometrie der Biegebalken der Festkörperlagerung.....	197
Abbildung 105: Ergebnisse der mechanisch-statischen Simulation	199
Abbildung 106: Ergebnis der FEM-Modalanalyse der Antriebseinheit	199
Abbildung 107: Reales Modell der Antriebseinheit des DIP-MHP-Aktors.....	201

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirkgrößen bei der MHP-Bearbeitung nach VDI 3416 [1]	17
Tabelle 2: Übersicht zu periodisch und kontinuierlich arbeitenden MHP-Systemen ..	20
Tabelle 3: Eigenschaften und Einflussgrößen des pneumatischen Systems	25
Tabelle 4: Eigenschaften und Einflussgrößen des PIT- Systems.....	26
Tabelle 5: Eigenschaften und Einflussgrößen des Dynatec HiFIT-System [9]	27
Tabelle 6: Eigenschaften und Einflussgrößen des elektrodynamischen Systems.....	28
Tabelle 7: Eigenschaften und Einflussgrößen des mechanischen Systems	29
Tabelle 8: Eigenschaften und Einflussgrößen des elektromagnetischen Systems ...	32
Tabelle 9: Messkette zur Bestimmung der statischen Eigenschaften	53
Tabelle 10: Abweichung der Bahngeschwindigkeit zum Vorgabewert	56
Tabelle 11: Ergebnis der Steifigkeitsmessung am Roboter	58
Tabelle 12: Bearbeitungsparameter für die 2D-Strukturierung	72
Tabelle 13: Messung der Eindrucktiefe t_p an der Startposition	74
Tabelle 14: Johnson-Cook-Parameter für den Werkstoff 1.6944	80
Tabelle 15: Äquivalente Energiegrößen auf Basis der Simulationsergebnisse	84
Tabelle 16: Systemvergleich der beiden eingesetzten Systeme	85
Tabelle 17: Überblick über die bearbeiteten Stahl- und Aluminiumwerkstoffe	86
Tabelle 18: Messkette zur Bestimmung der Eigenschaften der P-MHP Aktorik.....	87
Tabelle 19: Festgelegte Bearbeitungsparameter der MHP-Bearbeitung.....	88
Tabelle 20: Parametersätze der MHP-Bearbeitung zur Werkstoffuntersuchung.....	89
Tabelle 21: Ausgangshärte nach Vickers auf der Bauteiloberfläche	91
Tabelle 22: Oberflächenhärte nach Vickers aller Versuchsreihen (E-MHP-System). 94	
Tabelle 23: Oberflächenhärte nach Vickers aller Versuchsreihen (P-MHP-System). 94	
Tabelle 24: Gemittelte Oberflächenrauheit für das E-MHP-System	101
Tabelle 25: Gemittelten Oberflächenrauheit für das P-MHP-System	101
Tabelle 26: Anforderungen an ein Piezo-Antriebssystems.....	105
Tabelle 27: Komponenten zur Lagerung eines einzelnen Piezo-Stacks	109
Tabelle 28: Auszug aus dem Datenblatt des eingesetzten Piezo-Aktors	109
Tabelle 29: Komponenten des Uniaxialen Piezo-Schwingtisches	111

Tabelle 30: Eckdaten des Piezo-Schwingtisch	111
Tabelle 31: Werkstoffeigenschaften des Vergütungsstahls 42CrMo4	112
Tabelle 32: Geometrische Größen der Festkörperlagerung	113
Tabelle 33: Modale Masse der Antriebseinheit als Ergebnis der FEM-Berechnung	115
Tabelle 34: Berechnete Umformenergie bei harmonischer Werkzeugbewegung ...	115
Tabelle 35: Eigenschaften des uniaxialen Piezo-Schwingtisches	115
Tabelle 36: Eckdaten des PZ-MHP-Aktorsystems.....	116
Tabelle 37: Messkette zur Ermittlung der dynamischen Eigenschaften	118
Tabelle 38: Berechnete Spitzenstromwerte der PZ-Aktorik.....	121
Tabelle 39: Eigenschaften der formgestalteten Werkzeuge	122
Tabelle 40: Bearbeitungsparameter der Mikrostrukturierung (45°-Kegel)	125
Tabelle 41: Bearbeitungsparameter bei der Piezo-Mikrostrukturierung	127
Tabelle 42: Berechnetes Aspektverhältnis	131
Tabelle 43: Spritzgussparameter zur Abformung der 55°- Pyramidenstruktur	133
Tabelle 44: Abformgrad der 55°- Pyramiden-Struktur	134
Tabelle 45: Spritzgussparameter zur Abformung der 45°-Kegelstruktur	135
Tabelle 46: Bearbeitungsparameter bei der Piezo-Mikrostrukturierung	135
Tabelle 47: CrNi-Werkstoffe zur verformungsinduzierten Martensitbildung	140
Tabelle 48: Zusammensetzung in Masse-% des Werkstoffes X5CrNi18-10	143
Tabelle 49: Messkette zur Bestimmung der MHP-Einflussgrößen	144
Tabelle 50: Versuchsplan zur Bearbeitung des Werkstoffes X5CrNi18-10	147
Tabelle 51: Berechnete Umformenergien des E-MHP-System und d = 3mm	156
Tabelle 52: Berechnete Gesamtumformenergien für d = 3 mm.....	157
Tabelle 53: Relative Permeabilität metastabiler austenitischer Stahlwerkstoffe.....	159
Tabelle 54: Kennwerte der Erreger- und der Messspule	161
Tabelle 55: Überblick über die bearbeiteten Stahlwerkstoffe	182
Tabelle 56: Werkstoffeigenschaften der Titanlegierung Ti6Al4V [146].....	197
Tabelle 57: Festigkeitseigenschaften der Festkörperlagerung aus Ti6Al4V.....	198
Tabelle 58: Modale Masse der Antriebseinheit als Ergebnis der FEM-Berechnung	200

Literaturverzeichnis

- [1] VDI 3416 Blatt 1 Maschinelles Oberflächenhämmern – Grundlagen, VDI, 2018
- [2] J. Wied, Oberflächenbehandlung von Umformwerkzeugen durch Festklopfen, Dissertation, 2011
- [3] B. Adjassoho, E. Kozeschnik, F. Bleicher, C. Lechner, S. Gössinger, und C. Bauer, Induction of residual stresses and increase of surface hardness by machine hammer peening technology, DAAAM, Wien, 2012, S. 697–702
- [4] M. Steitz, Richtlinien zur Terminologie für das Verfahren der mechanischen Oberflächenbehandlung ,Maschinelles Oberflächenhämmern, 2015
- [5] F. Bleicher, C. Lechner, C. Habersohn, E. Kozeschnik, B. Adjassoho, und H. Kaminski, „Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology“, CIRP Ann. - Manuf. Technol., Bd. 61, Nr. 1, S. 375–378, 2012
- [6] M. Steitz, J. Scheil, C. Müller, und P. Groche, „Effect of Process Parameters on Surface Roughness in Hammer Peening and Deep Rolling“, Key Eng. Mater., Bd. 554–557, S. 1887–1901, 2013
- [7] Patentschrift: J. Wied, Kaltschmiedevorrichtung und Kaltschmiedeverfahren, DE102010019547
- [8] Patentschrift: P. Gerster, Apparatus for hammering welded seams on metal components, to improve weld strength, comprises motor-driven striking tool controlled in response to metal surface characteristics, DE102009001284
- [9] HiFIT Brochure, 01-2019.
- [10] Patentschrift: E. Statnikov, Method and means for ultrasonic impact machining of surfaces of machine components, US2007244595A1
- [11] Patentschrift: C. Loecker, Klopfvorrichtung und –verfahren, DE102006033004
- [12] Patentschrift: T. Weiler, S. Krall, und F. Bleicher, Reluktanz-Linearaktor und damit ausgeführte Werkzeuge/Antriebe, PCT/EP2018/081206
- [13] Patentschrift: A. Ostertag und S. Zenk, Festhammervorrichtung zum Beeinflussen von Werkstücken und zugehöriges Verfahren, DE102015203487A1
- [14] Patentschrift: M. D. Klamser, P. D. Linden, A. Tschürtz, und J. M. S. Wied, Kaltschmiedevorrichtung, Kaltschmiedeanlage und Verfahren zur Bearbeitung von Metalloberflächen und -werkstücken, DE102009041720A1
- [15] Patentschrift: E. Statnikov, Method of metal performance improvement and protection against degradation and suppression thereof by ultrasonic impact, KR20080050519
- [16] F. Lienert et.al., Experimental Study on Comparing Intensities of Burnishing and Machine Hammer Peening Processes, 3rd CIRP Conference on Surface Integrity, 2016
- [17] V. Schulze, F. Bleicher, P. Groche, Y. B. Guo, und Y. S. Pyun, Surface modification by machine hammer peening and burnishing, CIRP Ann., Bd. 65, Nr. 2, S. 809–832, 2016
- [18] Patentschrift: Y. Gauli, Angetriebene Schlagverdichtungssystem, E20161000389

- [19] Patentschrift: M. Kranz, Werkzeug und Verfahren zum Aufbringen kleiner Schlagimpulse, DE102014107173A1
- [20] Patentschrift: M. Kranz, „Werkzeug sowie Verfahren zum Aufbringen kleiner Schlagimpulse, DE201410107173
- [21] Patentschrift: R. Mitsching, Electromagnetically operated peening tool, US4641510
- [22] Patentschrift: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V, Festklopfvorrichtung, DE202013002473U1
- [23] Patentschrift: F. Killer, Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung von Druckeigenspannungen in der Oberfläche von Werkstücken, WO2004028739A1
- [24] C. Habersohn, Analytische und simulative Betrachtung eines Oberflächenhämmerprozesses, Dissertation, TU Wien, 2016
- [25] 3S-Engineering GmbH, Pneumatisches Kaltschmiedesystem FORGEfix, Produktflyer
- [26] P. Gerster, Erhöhung der Lebensdauer bzw. der Ermüdungsfestigkeit durch Schweißnahtnachbehandlung, Prakt., S. 302–310, Sep. 2009
- [27] P. Gerster, Pneumatic Impact Treatment zur Erhöhung der Lebensdauer bzw. Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen, Stahlbau, Feb. 2009
- [28] G. Telljohann und S. Dannemeyer, HiFIT - Technische Entwicklung und Anwendung, Stahlbau, Sep-2009
- [29] C. Löcker, Verfahren und Vorrichtung zur kalten Mikroschmiedetechnik von beliebigen 3-d-freiformflächen, DE112006002729A5
- [30] C. Lechner, Oberflächenmodifikation unter Einsatz der Technologie des Schlagverdichtens (Machine Hammer Peenings), Dissertation, TU Wien, 2014
- [31] S. Krall, F. Bleicher, Robot based machine hammer peening to generate defined surface structures, HSM Metz, 2016.
- [32] Patentschrift: A. Ostertag und S. ZENK, Festhammervorrichtung zum Beeinflussen von Werkstücken und zugehöriges verfahren, WO2016135169A1
- [33] S.Krall, 7th workshop machine hammer peening, Apprimus, S. 85 – 100, 2018
- [34] 5. Workshop Machine Hammer Peening, Darmstadt, 2016
- [35] Dokument: Piezomechanik GmbH - Einstieg in die Piezo-Aktorik
- [36] Dokument: Piezoelektrische Aktoren, Bauelemente, Technologie, Ansteuerung, PI Ceramic
- [37] E. Hering, A. Vogt, und K. Bressler, Handbuch der elektrischen Anlagen und Maschinen 1999
- [38] F. Lienert, J. Hoffmeister, und V. Schulze, Residual Stress Depth Distribution after Piezo Peening of Quenched and Tempered AISI 4140, Mater. Sci. Forum, Bd. 768–769, S. 526–533, 2013

- [39] F. Lienert, Bauteiloptimierung mittels Piezopeening - Auswirkungen auf den Randschichtzustand und die Schwingfestigkeit von 42CrMo4 V450“, Dissertation, KIT, 2017
- [40] E. Westkämper und H.-J. Warnecke, Einführung in die Fertigungstechnik, Vieweg+Teubner Verlag, 2004
- [41] Y.-S. Seo und K. Park, Direct patterning of micro-features on a polymer substrate using ultrasonic vibration, Microsyst. Technol., Bd. 18, Nr. 12, S. 2053–2061, 2012
- [42] W. Gust, H. I. Prokopenko, A. V. Kozlov, B. N. Mordyuk, und V. O. Abramov, Ultrasonic shock treatment of welded joints, Mater. Sci., Bd. 35, Nr. 5, S. 678–683, 1999,
- [43] R. Hessert, J. Bamberg, W. Satzger, und T. Taxer, Ultrasonic impact treatment for surface hardening of the aero-engine material in718, Proc.: ICSP-10, Tokyo, Japan, 2008
- [44] A. Amanov, Y.-S. Pyun, J.-H. Kim, und S. Sasaki, The usability and preliminary effectiveness of ultrasonic nanocrystalline surface modification technique on surface properties of silicon carbide, Appl. Surf. Sci., Bd. 311, S. 448–460, 2014
- [45] Fatigue Improvement - Ultrasonic Impact Peening of parts and welded elements, Sintec, [Online, Verfügbar unter: <http://www.sintec.ca/>, 21-Nov-2018]
- [46] K. L. Johnson, Contact mechanics, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1985
- [47] P. Thümmeler, Beschreibung der Vorgänge beim Ultraschallkugelstrahlen unter Berücksichtigung der Strahlintensität und der Kugelbewegungen bei Parameteränderungen, 2009
- [48] K. Wellinger und H. Breckel, Kenngrößen und Verschleiss beim Stoss metallischer Werkstoffe, Wear, Bd. 13, Nr. 4, S. 257–281, 1969
- [49] R. Herzog, W. Zinn, B. Scholtes, und H. Wohlfahrt, Zur Aussagefähigkeit der Almenintensität als Kennwert bei der gezielten Eigenspannungserzeugung durch Kugelstrahlen, Mater. Werkst., Bd. 27, Nr. 12, S. 608–617, 1996
- [50] B. Scholtes und O. Vöhringer, Ursachen, Ermittlung und Bewertung von Randschichtveränderungen durch Kugelstrahlen, Mater. Werkst., Bd. 24, Nr. 12, S. 421–431, 1993
- [51] M. Rodríguez Ripoll, F. Heindl, C. Lechner, C. Habersohn, M. Jech, und F. Bleicher, Improving wear resistance of functional surfaces using the machine hammer peening technique, Tribol. - Mater. Surf. Interfaces, Bd. 8, Nr. 1, S. 21–26, 2014
- [52] J. Wied, J. Scheil, M. Klamser, und C. Berger, „Impact experiments and finite element simulation of surface roughness reduction by machine hammer peening“, Mater. Werkst., Bd. 42, Nr. 9, S. 827–832, Sep. 2011
- [53] S. Krall, C. Lechner, M. Nirtl, und F. Bleicher, Robot based machine hammer peening using an electromagnetic driven hammering device, DAAAM Proceedings, S. 0633–0640, 2016
- [54] Patentschrift: C. Löcker und P. Schenk, Implementierung von fremden Substanzen in die Oberfläche fester Körper, DE102013020728A1

- [55] M. Steitz, J. Scheil, und K. Weigel, Maschinelle Oberflächeneinglättung für den effizienten Werkzeug- und Formenbau, PtU (TU Darmstadt), Dissertation, 2013
- [56] F. Bleicher, C. Lechner, C. Habersohn, M. Obermair, F. Heindl, und M. Rodriguez Ripoll, Improving the tribological characteristics of tool and mold surfaces by machine hammer peening, CIRP Ann., Bd. 62, Nr. 1, S. 239–242, 2013
- [57] M. Reiter, S. Krall, und F. Bleicher, Mechanical functionalisation of cutting inserts by machine hammer peening, in DAAAM Proceedings, S. 0767–0772, 2017
- [58] J. Berglund, M. Liljengren, und B.-G. Rosén, On finishing of pressing die surfaces using machine hammer peening, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Bd. 52, Nr. 1–4, S. 115–121, 2011
- [59] P. Groche, P. Sticht, V. Schulze, A. Klumpp, F. Bleicher, und S. Krall, Abschlussbericht: HaPTec - Weiterentwicklung des maschinellen Oberflächenhämmerns zur Ausweitung des industriellen Einsatzgebietes, 2017
- [60] C. Lechner, F. Bleicher, C. Habersohn, C. Bauer, und S. Gössinger, The use of machine hammer peening technology for smoothing and structuring of surfaces, DAAAM, 2012
- [61] P. Groche, M. Steitz, C. Müller, und J. Scheil, Einglättung durch Festwalzen und Festklopfen, Werkstattstech. Online, Bd. 102, Nr. 10, S. 665–671
- [62] F. Lienert, J. Hoffmeister, und V. Schulze, Changes in surface layer after piezo peening in quenched and tempered AISI 4140, ICSP12, 2014
- [63] B. N. Mordyuk und G. I. Prokopenko, Fatigue life improvement of α -titanium by novel ultrasonically assisted technique, Mater. Sci. Eng. A, Bd. 437, Nr. 2, S. 396–405, 2006
- [64] J. A. Williams und R. S. Dwyer-Joyce, Contact between solid surfaces, in Modern tribology handbook, Boca Raton, FL: CRC Press, S. 121–162, 2001
- [65] D. Tabor und G. I. Taylor, A simple theory of static and dynamic hardness, Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci., Bd. 192, Nr. 1029, S. 247–274, 1948
- [66] P. Sticht, M. Steitz, und P. Groche, Prediction and experimental validation of an impact energy threshold for mechanical surface smoothing, Procedia CIRP, Bd. 45, S. 159–162, 2016
- [67] M. Steitz, P. Stein, und P. Groche, „Influence of hammer-peened surface textures on friction behavior“, Tribol. Lett., Bd. 58, Nr. 2, Mai 2015
- [68] S. Gössinger, C. Bauer, und C. Lechner, „Using Machine Hammer to Reduce Friction in Turbulent Fluid Flows“, WASSERWIRTSCHAFT, Bd. 105, Nr. 13, S. 120–124, Mai 2015
- [69] S. Gössinger, Erweiterte Anwendungsmöglichkeiten von maschinelltem Oberflächenhämmern im Kontext hydraulischer Strömungsmaschinen, Dissertation, TU Wien, 2014
- [70] J. Ruge und H. Wohlfahrt, Technologie der Werkstoffe: Herstellung, Verarbeitung, Einsatz, Springer Vieweg, 2013

- [71] E. Doege und B.-A. Behrens, Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen, Springer, 2010
- [72] E. Roos und K. Maile, Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung, Springer Vieweg, 2015
- [73] B. N. Mordyuk und G. I. Prokopenko, Ultrasonic impact peening for the surface properties' management, J. Sound Vib., Bd. 308, Nr. 3–5, S. 855–866, 2007
- [74] K. E. Aifantis und A. A. Konstantinidis, Hall–Petch revisited at the nanoscale, Mater. Sci. Eng. B, Bd. 163, Nr. 3, S. 139–144, 2009
- [75] E. Hornbogen und H. Warlimont, Metalle: Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen, Springer Vieweg, 2016
- [76] J. Rösler, M. Bäker, und H. Harders, Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, 2008
- [77] A. Cherif, Y. Pyoun, und B. Scholtes, Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) on residual stress state and fatigue strength of AISI 304, J. Mater. Eng. Perform., Bd. 19, Nr. 2, S. 282–286, 2010
- [78] I.-S. Cho, C.-S. Lee, A. Amanov, Y.-S. Pyoun, und I.-G. Park, The effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the high-frequency fretting wear behavior of AISI304 steel, J. Nanosci. Nanotechnol., Bd. 11, Nr. 1, S. 742–746, 2011
- [79] P. Groche, M. Engels, M. Steitz, C. Müller, J. Scheil, und M. Heilmaier, Potential of mechanical surface treatment for mold and die production, Int. J. Mater. Res., Bd. 103, Nr. 6, S. 783–789, 2012
- [80] S. Krall, M. Reiter, und F. Bleicher, Influence of the machine hammer peening technology on the surface near material structure of stainless steel X5CrNi18-10, Mater. Today Proc., 2018
- [81] A. Gill u. a., Comparison of mechanisms of advanced mechanical surface treatments in nickel-based superalloy, Mater. Sci. Eng. A, Bd. 576, S. 346–355, 2013
- [82] F. Bleicher, S. Krall, A. Steininger, J. Brier, und M. Reiter, Investigation of the dynamic behaviour in drilling with indexable insert drills and influence of the contact energy on surface modification by machine hammer peening, MTTRF Annual Meeting, San Francisco, 2017
- [83] F. Klocke, D. Trauth, F. Schongen, und A. Shirobokov, Analysis of friction between stainless steel sheets and machine hammer peened structured tool surfaces: experimental and numerical investigation of the lubricated interaction gap, Prod. Eng., Bd. 8, Nr. 3, S. 263–272, 2014
- [84] A. Amanov, S. Sasaki, und Young-SikPyun, Frictional behaviour of duplex nano-corrugated and nanostructured cu alloy produced by UNSM“, Procedia Eng., Bd. 68, S. 491–496, 2013
- [85] L. Neto, Studying the application of additive manufacturing to large parts, Cranfield, 2017

- [86] Hans-J. Christ, Andrei Grigorescu, Carsten Müller-Bollenhagen, Martina Zimmermann, Metastable austenitic stainless steels and the effect of deformation-induced phase transformation on the fatigue properties, 2015
- [87] Mangonon PL Jr, Thomas G, The martensite phases in 304 stainless steel, Metallurgical Transactions, Volume 1, Issue 6, pp 1577–1586, 1970
- [88] E. Dryzek, M. Sarnek, und M. Wróbel, Reverse transformation of deformation-induced martensite in austenitic stainless steel studied by positron annihilation, J. Mater. Sci., Bd. 49, Nr. 24, S. 8449–8458, 2014
- [89] Maksimova, Martensite transformations: history and laws, Metal Science and Heat Treatment, Volume 41, Issue 8, pp 322–339, 1999
- [90] J. Scheil, Entwicklung von Austenitisch-Ferritischem Gusseisen (ADI) aus EN-JS2070: Mikrostruktur, mechanische Eigenschaften und deren Auswirkung auf die Oberflächenbearbeitung durch das Maschinelle Oberflächenhämmern, Dissertation, TU Darmstadt, 2016
- [91] D. Trauth, Tribology of machine hammer peened tool surfaces for deep drawing, Dissertation, RWTH Aachen, 2016
- [92] G. Schrec, Roboter statt Werkzeugmaschine, FUTUR – Vision, Innovation und Realisierung, S. 8–9, 2012
- [93] E. Roos, Anwendungsorientierte Meß- und Berechnungsverfahren zur Kalibrierung off-line-programmierter Roboterapplikationen, Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl, 1998
- [94] M. Wenz, Automatische Konfiguration der Bewegungssteuerung von Industrierobotern. Berlin: Logos-Verl, 2008
- [95] Z.-J. Zhang, Freistrahlturbinen: Hydromechanik und Auslegung. Berlin: Springer, 2009
- [96] H. Winter, Fertigungstechnik von Luft- und Raumfahrzeugen Aufsätze aus verschiedenen Aufgabengebieten der Fertigung und eine Bibliographie der Veröffentlichungen. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1967
- [97] C. Gebhardt, Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik, 2., überarb. Aufl. München: Hanser, 2014
- [98] J. Che, T. Zhou, Z. Liang, J. Wu, und X. Wang, An integrated Johnson–Cook and Zerilli–Armstrong model for material flow behavior of Ti–6Al–4V at high strain rate and elevated temperature, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., Bd. 40, Nr. 5, Mai 2018
- [99] H. Ullah, A. Rauf, B. Ullah, M. Rehan, und R. Muhammad, Explicit dynamics simulation of shot peening process induced by various types of shots impacts, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., Bd. 40, Nr. 2, 2018
- [100] Vorlesungsskriptum: J. Wassermann, Messtechnik und Aktorik, LVA-Nr. 325.014, TU Wien, Sep-2008
- [101] R. Parthier, Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006

- [102] M. Abed Al-Wahab, Neue Aktorsysteme auf Basis strukturierter Piezokeramik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2004.
- [103] A. Schmidt, Piezokeramik – Funktion, Bauarten und Anwendungen, Informationszentrum Technische Keramik
- [104] U. J. Sutter, Domäneneffekte in ferroelektrischen PZT-Keramiken, Universität Karlsruhe (IKM), 2006
- [105] M. Herz, Optimierung der Förderrate einer piezoelektrischen Hochleistungs-Mikropumpe, TU München, 2011
- [106] A. Böge u. a., Hrsg., Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, Springer Vieweg, 2017
- [107] Datenblatt: Ceramic Multilayer Piezo Technology AN07/8510A, EPCOS
- [108] F. Bleicher, G. Wiesinger, C. Kumpf, D. Finkeldei, C. Baumann, und C. Lechner, Vibration assisted drilling of CFRP/metal stacks at low frequencies and high amplitudes, Prod. Eng., Bd. 12, Nr. 2, S. 289–296, 2018
- [109] Bericht: Precision linear flexure bearing cartridge, Phillips laboratory space and missiles technology directorate air force materiel command, Kirtland Air Force Base, Final Report, 1994
- [110] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch, und J. Voßiek, Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung, Vieweg+Teubner Verlag, 2011
- [111] E. Søgaaard, Injection molded self-cleaning surfaces, Technical University of Denmark, 2014
- [112] H. Dubbel, W. Beitz, und K.-H. Grote, Hrsg., Taschenbuch für den Maschinenbau: mit Tabellen, Springer, 2001
- [113] W. Weißbach, Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [114] H. Immink, Superhydrophobe Oberflächen: Funktionserhaltung durch Regeneration, Dissertation, Universität Bonn - Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Bonn, 2010
- [115] C. M. Herrmann, „Experimentelle Untersuchungen zum Benetzungsverhalten fester und elastischer linearer Grabenstrukturen“. Universität des Saarlandes, 03-März-2016.
- [116] W. Hild Dr. rer. nat., Tribologische Untersuchungen an Mikrosystemen: Einfluss der Benetzbarkeit, Dissertation, 2005
- [117] Datenblatt: Makrolon® 2405, Covestro AG
- [118] T. Schröder, Lernen von der Natur - die Biologie als Vorbild, Institut für Kunststoffverarbeitung der Hochschule Darmstadt
- [119] A. Burr, M. Kübler, M. Deckert, S. Kuhn, und C. Bleesen, Konzepte und Anwendungen der hochdynamischen variothermen Spritzgießtechnologie, Hochschule Heilbronn, Forschungsbericht 2010/2011.

- [120] U. Noste, Zum Verformungsverhalten der Magnesiumbasislegierungen AZ31 und AZ91 bei zyklischen und quasi-statischen Beanspruchungen im Temperaturenbereich 20-300°, Dissertation, Universität Kassel, 2003
- [121] H. Schumann, Verformungsinduzierte Martensitbildung in metastabilen austenitischen Stähle“, Krist. Tech., Bd. 10, Nr. 4, S. 401–411, 1975
- [122] Merkblatt 827: Magnetische Eigenschaften nichtrostender Stähle, Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 2013
- [123] J. Talonen, P. Aspegren, und H. Hänninen, Comparison of different methods for measuring strain induced α -martensite content in austenitic steels, Mater. Sci. Technol., Bd. 20, Nr. 12, S. 1506–1512, 2004
- [124] B.-A. Behrens, E. Doege, und B. Springub, Transformation induced martensite evolution in metal forming processes of stainless steels, Steel Res. Int., Bd. 75, Nr. 7, S. 475–482, 2004
- [125] Behrens, B.-A.; Hübner, S.; Voges-Schwieger, K.; Weilandt, K., Verformungsinduzierte Martensitevolution zur lokalen Festigkeitssteigerung, Umformtechnik Science, 2007
- [126] C. Müller-Bollenhagen, Verformungsinduzierte Martensitbildung bei mehrstufiger Umformung und deren Nutzung zur Optimierung der HCF- und VHCF-Eigenschaften von austenitischem Edelstahlblech, 2011
- [127] V. Seetharaman und R. Krishnan, Influence of the martensitic transformation on the deformation behaviour of an AISI 316 stainless steel at low temperatures, J. Mater. Sci., Bd. 16, Nr. 2, S. 523–530, 1981
- [128] T. Fukuda, T. Kakeshita, und K. Kindo, Effect of high magnetic field and uniaxial stress at cryogenic temperatures on phase stability of some austenitic stainless steels, Mater. Sci. Eng. A, Bd. 438–440, S. 212–217, 2006
- [129] A. Das, S. Sivaprasad, M. Ghosh, P. C. Chakraborti, und S. Tarafder, Morphologies and characteristics of deformation induced martensite during tensile deformation of 304 LN stainless steel, Mater. Sci. Eng. A, Bd. 486, Nr. 1–2, S. 283–286, 2008
- [130] Vorlesungsskriptum: P. H. Mayrhofer, Skriptum zur VO Werkstoffkunde metallischer Werkstoffe, TU Wien, 2014
- [131] H. Schumann, Verformungsinduzierte Martensitbildung in metastabilen austenitischen Stählen, Krist. Tech., Bd. 10, Nr. 4, S. 401–411, 1975
- [132] S. Suwas und R. K. Ray, Representation of texture, in crystallographic texture of materials, Springer London, S. 11–38, 2014
- [133] L. Ryde, Application of EBSD to analysis of microstructures in commercial steels, Mater. Sci. Technol., Bd. 22, Nr. 11, S. 1297–1306, 2006
- [134] H. Ghaednia, X. Wang, S. Saha, Y. Xu, A. Sharma, und R. L. Jackson, A Review of Elastic–Plastic Contact Mechanics, Appl. Mech. Rev., Bd. 69, Nr. 6, S. 060804, 2017
- [135] B. Ramm und S. Gurk, Physik und physikalisches Praktikum, Springer, 1982
- [136] A. Smekal, Aufbau Der Zusammenhängenden Materie, Springer, 1933

- [137] P. Ripka, Hrsg., Magnetic sensors and magnetometers. Boston: Artech House, 2001
- [138] E. Hering, Sensoren in Wissenschaft und Technik Funktionsweise und Einsatzgebiete, Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [139] Dubois, P.-E., Magnetic properties of stainless steels: applications, opportunities and new developments, Steels in Cars and Trucks, Bd. SCT2008, S. 314–320, 2008,
- [140] S. Yi, M. Wollmann, T. Ludian, und L. Wagner, Analyzing the near-surface deformation gradients due to shot peening and ball-burnishing of alpha brass and stainless steel, ICSP-10, Japan, 2008
- [141] M. Urbaniak, Basic magnetic measurement methods, 2014
- [142] Broschüre Ferritscope FMP30, Helmut Fischer GmbH
- [143] Patentschrift: Steuereinrichtung, insbesondere Schloss, AT341901
- [144] Patentschrift: Schlüssel zum Betätigen eines Schließzylinders sowie Verfahren zur Herstellung des Schlüssels, EP2803792B1
- [145] K. Ruschmeyer und W. J. Bartz, Hrsg., Piezokeramik: Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen, 1995
- [146] Materialdatenblatt: Thyssenkrupp, Ti6AL4V (3.7165)
- [147] B. Oberwinkler, Fatigue-proof and damage tolerant lightweight design of Ti-6Al-4V Forgings, 2010
- [148] Patentanmeldung: S. Krall, M. Prießnitz, F. Bleicher, Verfahren zur Bearbeitung eines einen Informationsbereich aufweisenden Bauteils, Bauteil mit einem Informationsbereich und Messsystem, Dokumenten Referenz-Nr. 2018111316194000DE
- [149] S. Krall, M. Schmitz, M. Orth, Projekt Abschlussbericht: SEPIM - Surface Engineering in Plastics Injection Moulding, 2018
- [150] Macherauch E., Zoch HW, V15 Martensitische Umwandlung, In: Praktikum in Werkstoffkunde, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

Anhang A

Im Rahmen des CORNET Forschungsprojektes HaPTec - Hammer Peening Technologie mit der Kurzbeschreibung: „Weiterentwicklung des maschinellen Oberflächenhämmerns zur Ausweitung des industriellen Einsatzgebietes“ mit der FFG Projektnummer: 846119, wurde für ausgewählte Werkstoffe ein Materialkatalog erstellt, welcher als Ergänzung zu den in Kapitel 4.3 beschriebenen Untersuchungen dient. Die folgenden Tabellenblätter sind Auszüge aus dem Materialkatalog des Forschungsberichtes des genannten Projektes und entstanden im Zuge meiner Bearbeitung der Arbeitspakete 6 und 7 dieses Projektes (siehe [59]).

Werkstoff-nummer	DIN-Bezeichnung	Zustand	Werkstoffgruppe
1.2340	X35CrMoV 5-1 (E38K)		Warmarbeitsstahl
1.2343	X38CrMoV 5-1		Warmarbeitsstahl
1.4313	X3CrNiMo13-4		weichmartensitischer CrNi-Stahl
1.2379	X155CrVMo 12-1		Kaltarbeitsstahl
1.7225	42CrMo4		Vergütungsstahl
1.7225	42CrMo4	Q+T auf R_m 1000 - 1100 N/mm ²	Vergütungsstahl
3.1355	AlCu4Mg1 (EN AW-2024)	T351	AlMgSi-Knetlegierung

Tabelle 55: Überblick über die bearbeiteten Stahlwerkstoffe

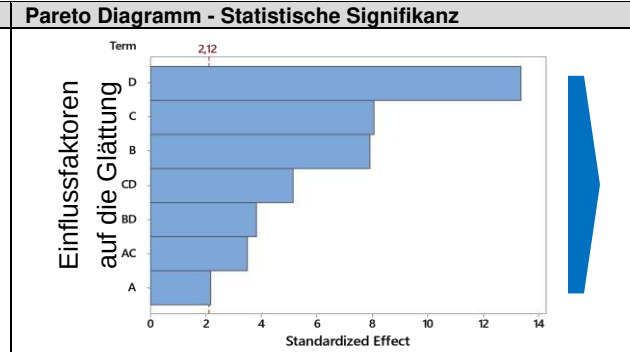
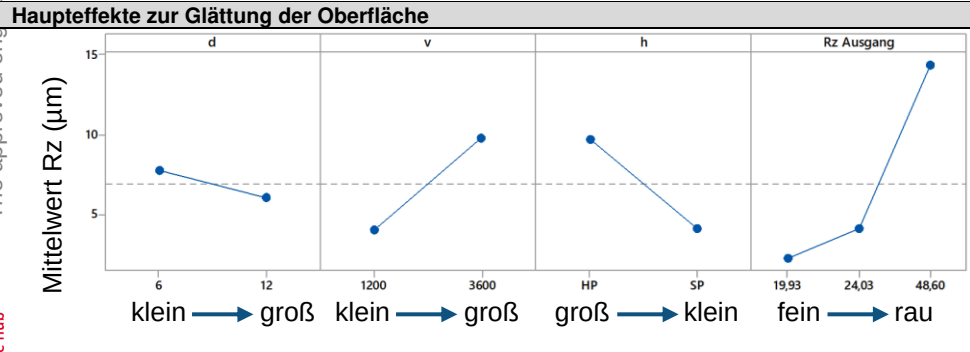
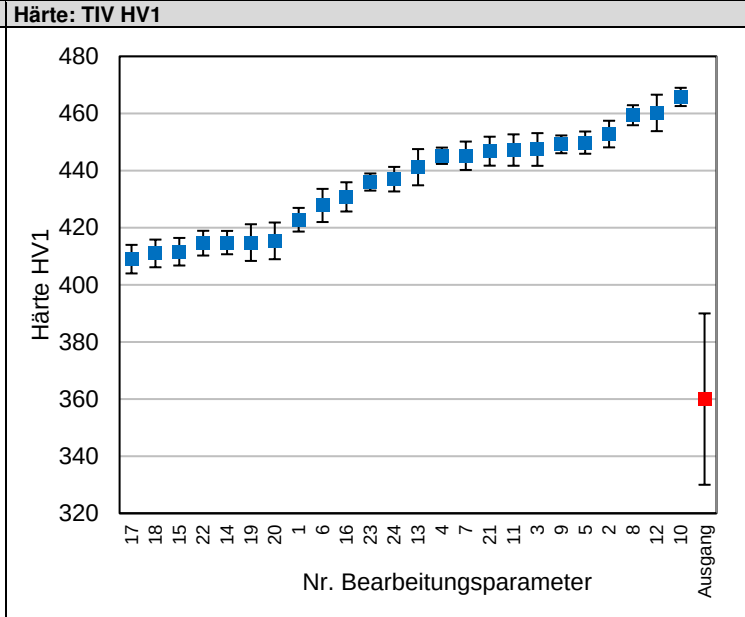
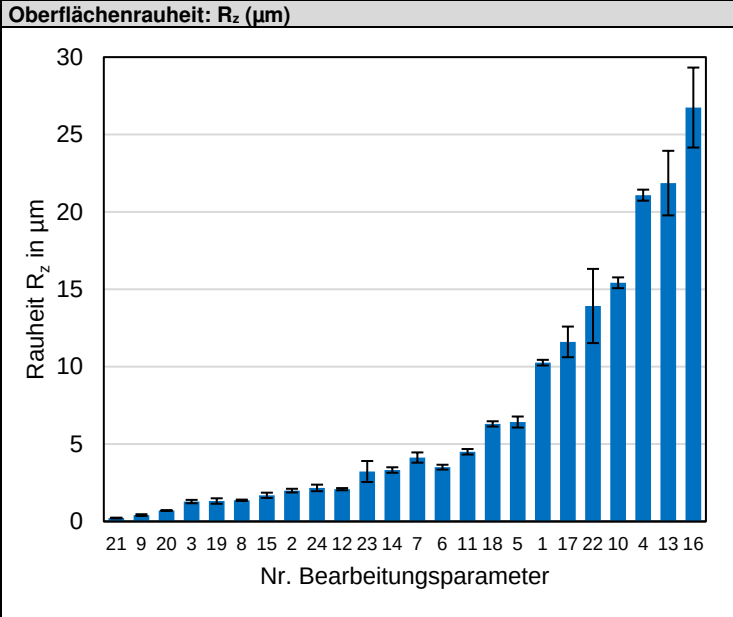
Werkstoffbezeichnung: X35CrMoV 5-1 (E38K)			
C 0,35 Si 0,30 Mn 0,30 S < 0,003 Cr 5,00 Mo 1,35 V 0,45			
Bezeichnung:	Rauheit		Härte
	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	11,79±0,9	48,6±3,8	422±9
Mittel	6,16±0,08	24±0,2	
Fein	4,07±0,07	15,9±0,4	

Bearbeitungsparameter					
Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	Einsatz	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	HP	48,6
2					24,0
3					15,9
4					48,6
5					24,0
6					15,9
7		3600	0,3	SP	48,6
8					24,0
9					15,9
10					48,6
11					24,0
12					15,9
13	6	1200	0,1	HP	48,6
14					24,0
15					15,9
16					48,6
17					24,0
18					15,9
19		3600	0,3	SP	48,6
20					24,0
21					15,9
22					48,6
23					24,0
24					15,9

Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Pneumatische MHP-Bearbeitung mit einem konstanten Druck von 8 bar unter Anwendung des Hämmer-Werkzeuges der Firma 3S-Engineering vom Typ FORGEfix Air.

Frequenz bei 8 bar: ca. 275 Hz bei Verwendung des SP-Druckverteilers
Frequenz bei 8 bar: ca. 246 Hz bei Verwendung des HP-Druckverteilers



Einflussfaktoren

A: Durchmesser d

B: Vorschub v

C: Schlageinheit des pneumatischen Aktuators (HP... high pressure; SP... standard pressure)

D: Ausgangsrauheit R_z

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Geringe Vorschubgeschwindigkeit (hohe Überdeckung); Verwendung des SP-Druckverteilers; geringe Ausgangsrauheit führt zu einer besseren Glättung.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung einer Oberfläche mit großem Hammerkopfdurchmesser führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

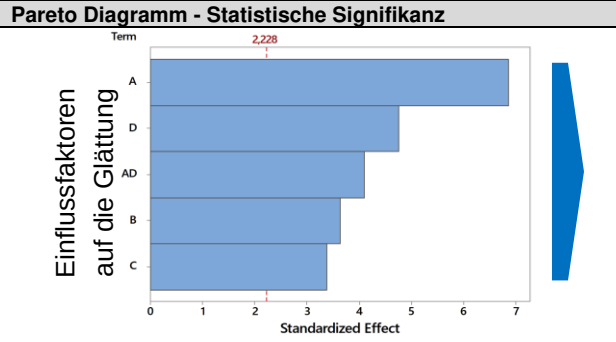
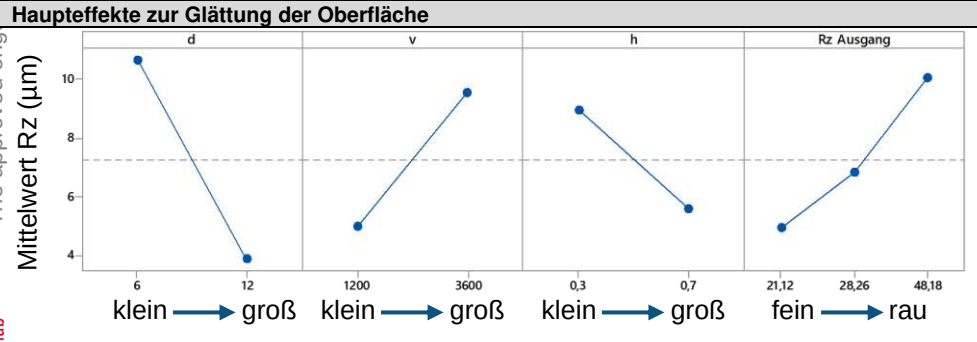
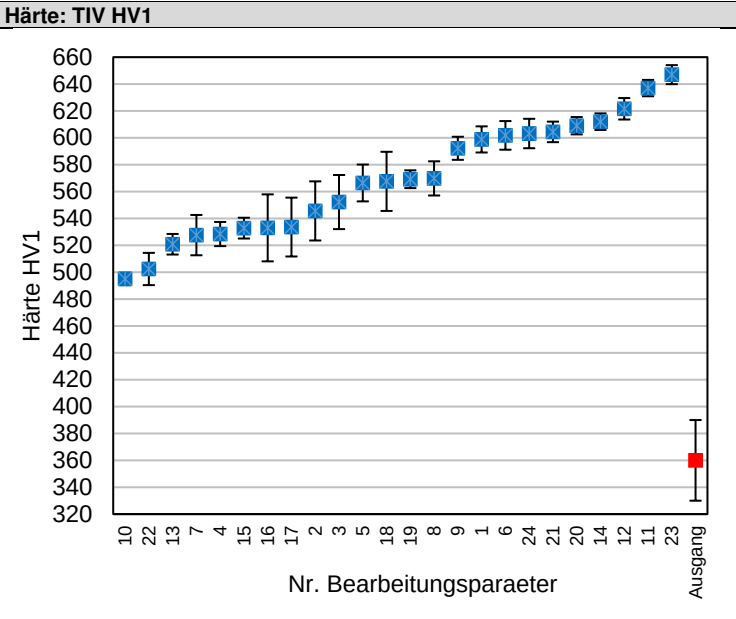
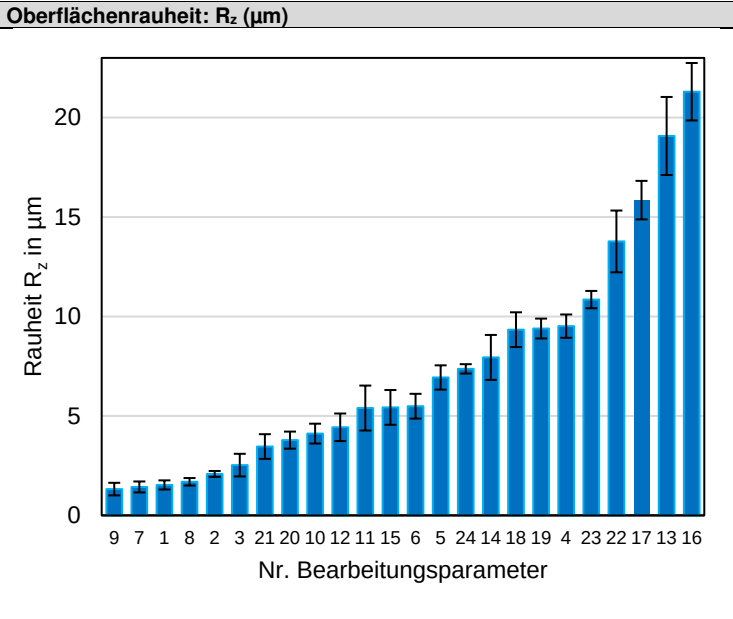
Die Wahl einer geringen Vorschubgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verwendung eines großen Hammerkopfdurchmessers, kombiniert mit dem SP-Druckverteiler, resultiert in einer optimalen Bearbeitung.

Werkstoffbezeichnung: X35CrMoV 5-1 (E38K)			
C 0,35 Si 0,30 Mn 0,30 S < 0,003 Cr 5,00 Mo 1,35 V 0,45			
	Rauheit		Härte
Bezeichnung:	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	12,37±0,6	48,2±2	422±9
Mittel	5,58±0,3	28,3±1,7	
Fein	4,41±0,26	21,1±1	

Bearbeitungsparameter					
Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	h (mm)	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	0,3	48,2
2					28,3
3					21,1
4		3600	0,3	0,3	48,2
5					28,3
6					21,1
7		1200	0,1	0,7	48,2
8					28,3
9					21,1
10	6	3600	0,3	0,3	48,2
11					28,3
12					21,1
13		1200	0,1	0,3	48,2
14					28,3
15					21,1
16		3600	0,3	0,3	48,2
17					28,3
18					21,1
19	6	1200	0,1	0,7	48,2
20					28,3
21					21,1
22		3600	0,3	0,7	48,2
23					28,3
24					21,1

Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Elektromagnetische MHP-Bearbeitung mit konstant eingestellter Hämmerfrequenz durch Verwendung des elektromagnetischen Hämmer-Werkzeuges der Firma accurapuls.
Frequenz: 200 Hz bei einer eingestellten Leistung von 100% an der Bedieneinheit



Einflussfaktoren

A: Durchmesser d

B: Vorschub v

C: Hub des Stößels h

D: Ausgangsrauheit R_z

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Wahl eines großen Kugeldurchmessers sowie Bearbeiten bei geringer Ausgangsrauheit.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung einer Oberfläche mit geringer Ausgangsrauheit führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

Die Bearbeitung einer Oberfläche mit geringer Ausgangsrauheit sowie die Wahl eines geringen Hubs führen zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Werkstoffbezeichnung: X37CrMoV5-1 (1.2343)

C 0,35 Si 1 Cr 5,30 Mo 1,30 V 0,04

	Rauheit		Härte
Bezeichnung:	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	10,2±0,1	43±4,3	357±19,9
Mittel	3,64±0,18	17,4±0,9	
Fein	2,12±0,09	9,8±0,49	

Bearbeitungsparameter:

Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	Einsatz	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	HP	43,00
2					17,40
3					9,80
4		3600	0,3	HP	43,00
5					17,40
6					9,80
7	12	1200	0,1	SP	43,00
8					17,40
9					9,80
10		3600	0,3	SP	43,00
11					17,40
12					9,80
13	6	1200	0,1	HP	43,00
14					17,40
15					9,80
16		3600	0,3	HP	43,00
17					17,40
18					9,80
19	6	1200	0,1	SP	43,00
20					17,40
21					9,80
22		3600	0,3	SP	43,00
23					17,40
24					9,80

Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Pneumatische MHP-Bearbeitung mit einem konstanten Druck von 8 bar unter Anwendung des Hämmer-Werkzeuges der Firma 3S-Engineering vom Typ FORGEfix Air.

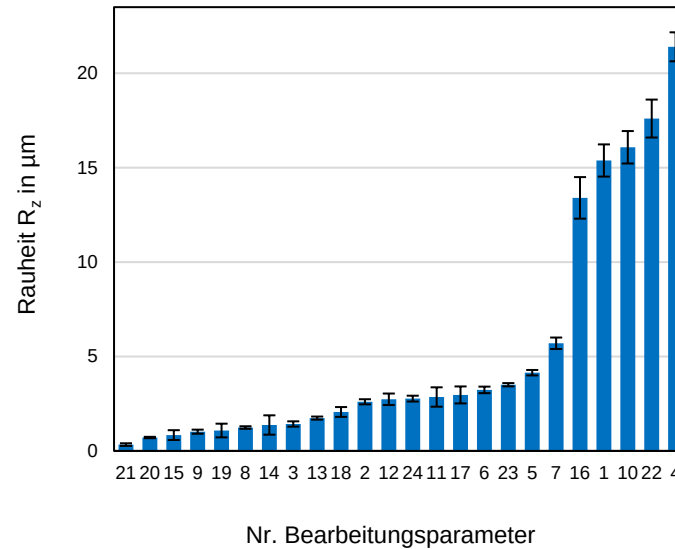
Frequenz bei 8 bar: ca. 275 Hz bei Verwendung des SP-Druckverteilers

Frequenz bei 8 bar: ca. 246 Hz bei Verwendung des HP-Druckverteilers

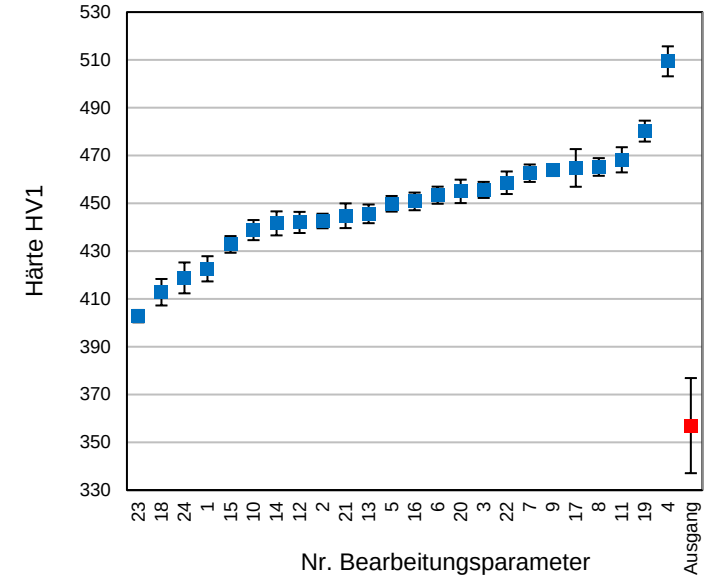
Hammersystem FORGEfix Air



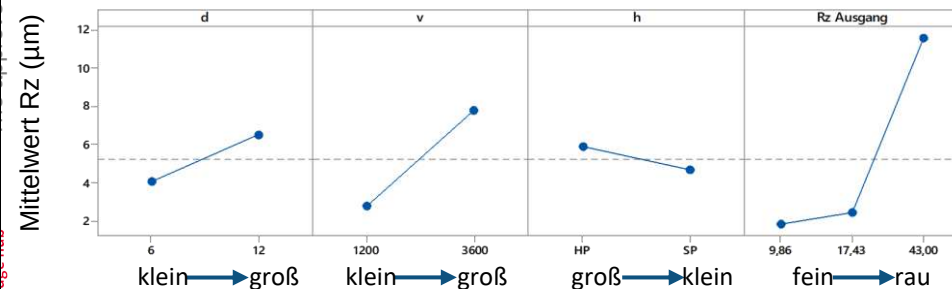
Oberflächenrauheit: Rz (µm)



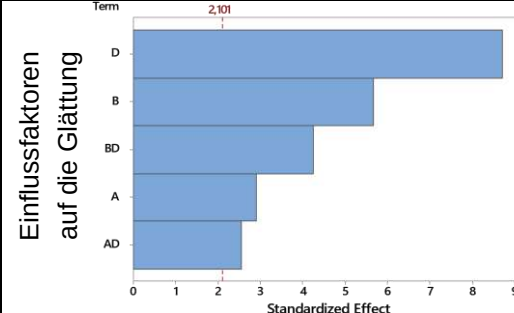
Härte: TIV HV1



Haupteffekte zur Glättung der Oberfläche



Pareto Diagramm - Statistische Signifikanz



Einflussfaktoren

- A: Durchmesser d**
- B: Vorschub v**
- C: Schlageinheit des pneumatischen Aktuators (HP... high pressure; SP... standard pressure)**
- D: Ausgangsrauheit R_z**

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Verwendung eines kleinen Kugeldurchmessers bei geringer Vorschubgeschwindigkeit in Kombination mit einer geringen Ausgangsrauheit führt zu einer optimalen Glättung.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung einer Oberfläche mit hoher Ausgangsrauheit und großem Hammerkopfdurchmesser bei gleichzeitiger geringer Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

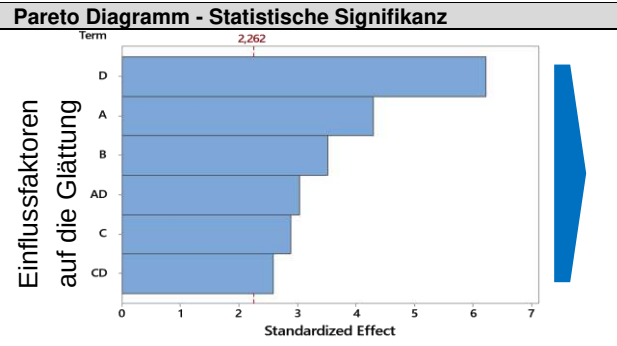
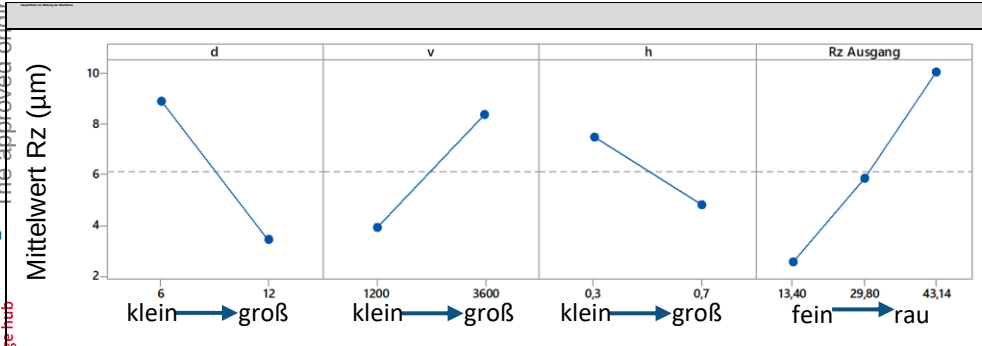
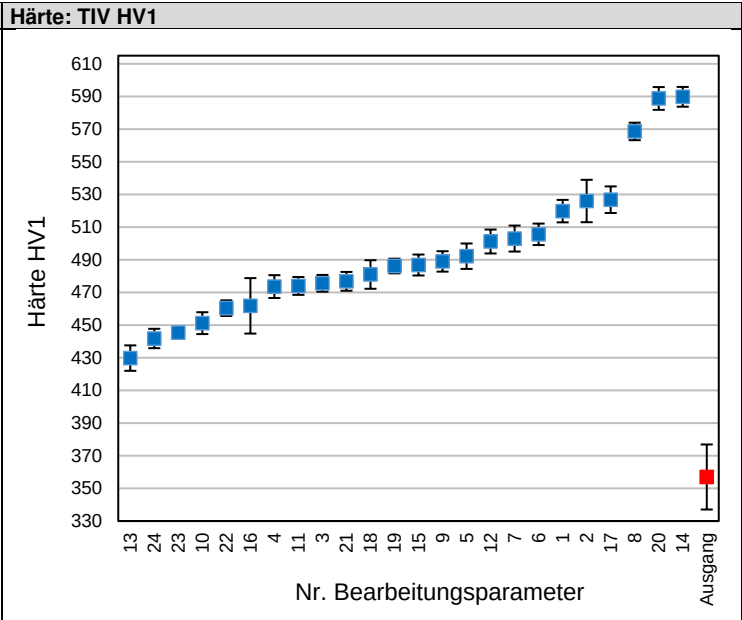
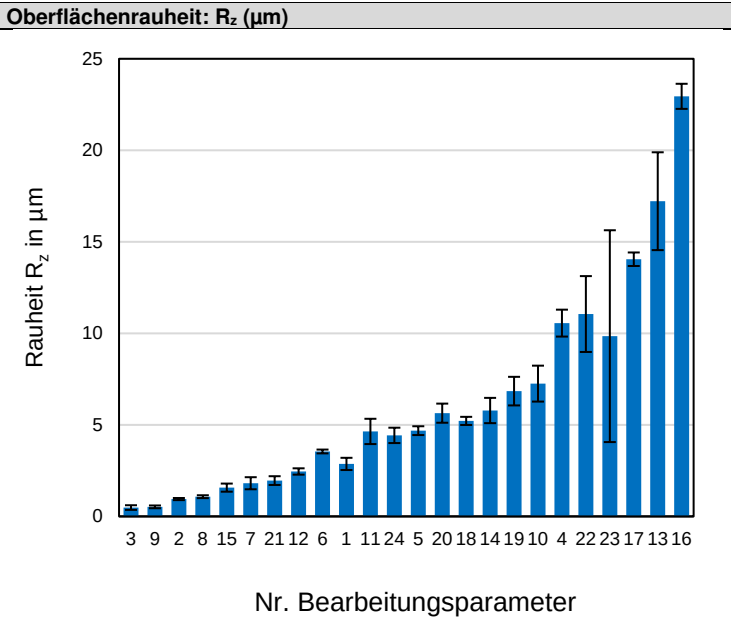
Geringe Ausgangsrauheit der Oberfläche kombiniert mit einem großen Kugeldurchmesser bei gleichzeitiger Verwendung einer geringen Vorschubgeschwindigkeit.

Werkstoffbezeichnung: X37CrMoV5-1 (1.2343)			
C 0,35 Si 1 Cr 5,30 Mo 1,30 V 0,04			
	Rauheit		Härte
Bezeichnung:	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	10,3±0,2	43,1±0,9	357±19,9
Mittel	7,1±0,5	29,8±1,3	
Fein	2,9±0,6	13,4±0,3	

Bearbeitungsparameter:					
Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	h (mm)	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	0,3	43,10
2					29,80
3					13,40
4		3600	0,3	0,3	43,10
5					29,80
6					13,40
7	6	1200	0,1	0,7	43,10
8					29,80
9					13,40
10		3600	0,3	0,7	43,10
11					29,80
12					13,40
13		1200	0,1	0,3	43,10
14					29,80
15					13,40
16		3600	0,3	0,3	43,10
17					29,80
18					13,40
19		1200	0,1	0,7	43,10
20					29,80
21					13,40
22		3600	0,3	0,7	43,10
23					29,80
24					13,40

Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Elektromagnetische MHP-Bearbeitung mit konstant eingestellter Hämmerfrequenz durch Verwendung des elektromagnetischen Hämmer-Werkzeuges der Firma accurapuls.
Frequenz: 200 Hz bei einer eingestellten Leistung von 100% an der Bedieneinheit



Einflussfaktoren

A: Durchmesser d

B: Vorschub v

C: Hub des Stößels h

D: Ausgangsrauheit Rz

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Wahl eines großen Kugeldurchmessers, geringe Vorschubgeschwindigkeit, niedrige Ausgangsrauheit und geringer Hub führen zu einem optimalen Glättungsergebnis.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung mit einem großen Hammerkopfdurchmesser bei gleichzeitiger Bearbeitung mit geringer Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

Geringe Vorschubgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verwendung eines großen Kugeldurchmessers, kombiniert mit einer geringen Ausgangsrauheit.

Werkstoffbezeichnung: X3CrNiMo 13- 4 (1.4313)

C 0,05 12<Cr<14 3,5<Ni<4,5 0,3<Mo<0,7 N 0,02

Bezeichnung:	Rauheit Ra (µm)	Rz (µm)	Härte HV1
Grob	12,1±1,3	50,7±4,5	282±22
Mittel	6,2±0,2	23,4±0,9	
Fein	4,3±0,1	15,9±0,9	

Bearbeitungsparameter:

Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	Einsatz	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	HP	50,70
2					23,40
3					15,90
4		3600	0,3	HP	50,70
5					23,40
6					15,90
7	12	1200	0,1	SP	50,70
8					23,40
9					15,90
10		3600	0,3	SP	50,70
11					23,40
12					15,90
13	6	1200	0,1	HP	50,70
14					23,40
15					15,90
16		3600	0,3	HP	50,70
17					23,40
18					15,90
19	6	1200	0,1	SP	50,70
20					23,40
21					15,90
22		3600	0,3	SP	50,70
23					23,40
24					15,90

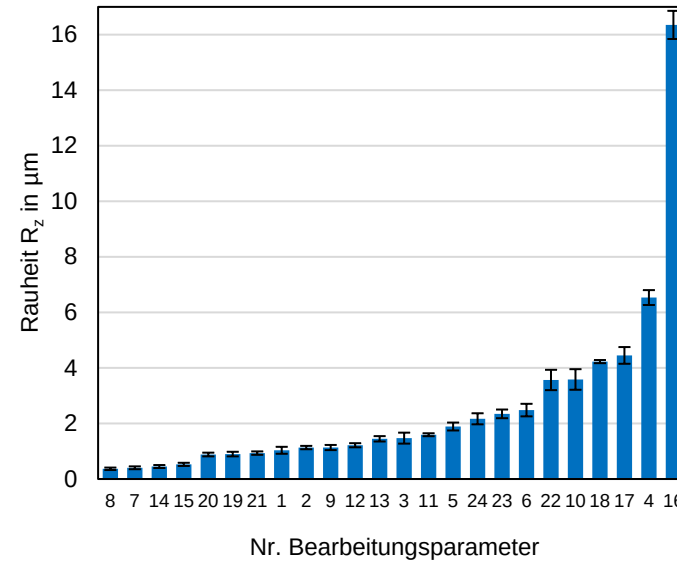
Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Pneumatische MHP-Bearbeitung mit einem konstanten Druck von 8 bar unter Anwendung des Hämmer-Werkzeuges der Firma 3S-Engineering vom Typ FORGEfix Air.
Frequenz bei 8 bar: ca. 275 Hz bei Verwendung des SP-Druckverteilers
Frequenz bei 8 bar: ca. 246 Hz bei Verwendung des HP-Druckverteilers

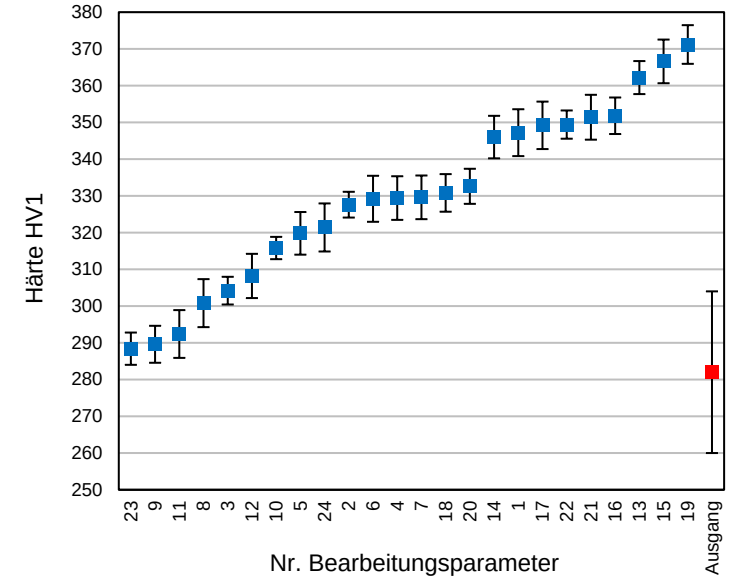
Hammersystem FORGEfix Air



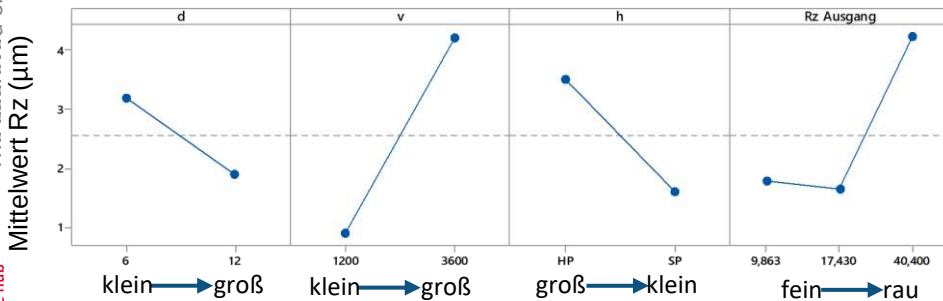
Oberflächenrauheit: Rz (µm)



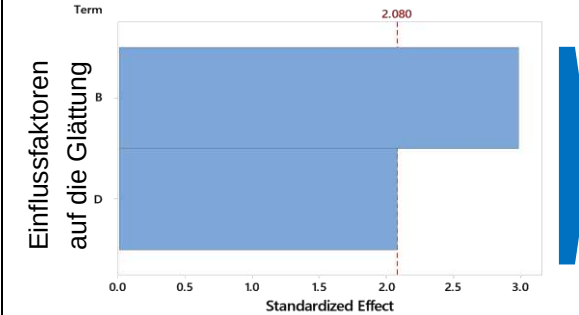
Härte: TIV HV1



Haupteffekte zur Glättung der Oberfläche



Pareto Diagramm - Statistische Signifikanz



Einflussfaktoren

- A: Durchmesser d**
- B: Vorschub v**
- C: Schlageinheit des pneumatischen Aktuators (HP... high pressure; SP... standard pressure)**
- D: Ausgangsrauheit R_z**

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Bearbeitung einer Oberfläche mit geringer Ausgangsrauheit und die Wahl einer geringen Vorschubgeschwindigkeit führen zu einem optimalen Glättungsergebnis.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung mit einem kleinen Hammerkopfdurchmesser bei gleichzeitiger Verwendung des HP-Druckverteilers führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

Die Bearbeitung einer Oberfläche mit geringer Ausgangsrauheit und geringer Vorschubgeschwindigkeit unter Verwendung des HP-Druckverteilers führen zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Werkstoffbezeichnung: X3CrNiMo 13- 4 (1.4313)			
C 0,05 12<Cr<14 3,5<Ni<4,5 0,3<Mo<0,7 N 0,02			
	Rauheit		Härte
Bezeichnung:	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	11,5±1,3	47,4±4,5	282±22
Mittel	5,2±0,2	21,1±0,9	
Fein	3,3±0,1	14±0,5	

Bearbeitungsparameter:					
Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	h (mm)	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	0,3	47,40
2					21,10
3					14,00
4		3600	0,3	0,3	47,40
5					21,10
6					14,00
7	12	1200	0,1	0,7	47,40
8					21,10
9					14,00
10		3600	0,3	0,7	47,40
11					21,10
12					14,00
13	6	1200	0,1	0,3	47,40
14					21,10
15					14,00
16		3600	0,3	0,3	47,40
17					21,10
18					14,00
19	6	1200	0,1	0,7	47,40
20					21,10
21					14,00
22		3600	0,3	0,7	47,40
23					21,10
24					14,00

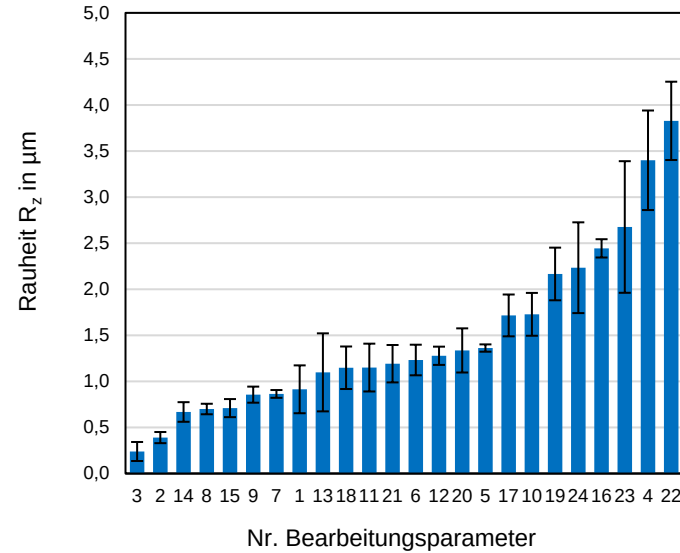
Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Elektromagnetische MHP-Bearbeitung mit konstant eingestellter Hämmerfrequenz durch Verwendung des elektromagnetischen Hämmer-Werkzeuges der Firma accurapuls.
Frequenz: 200 Hz bei einer eingestellten Leistung von 100% an der Bedieneinheit

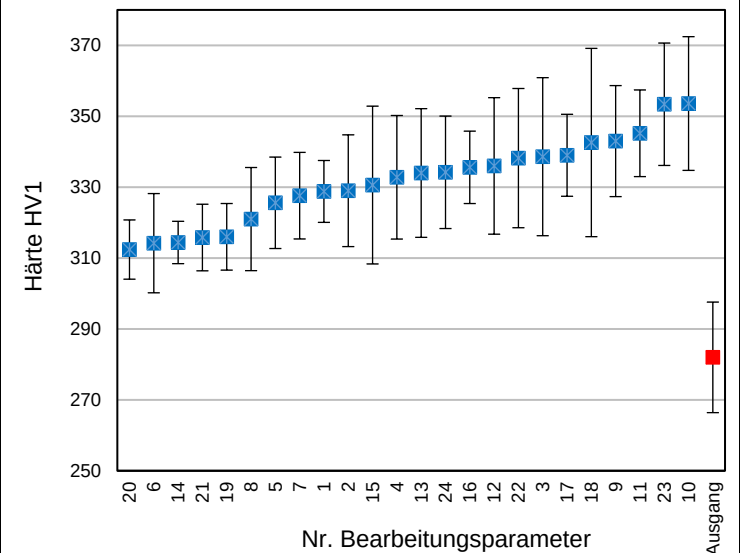
Hammersystem accurapuls



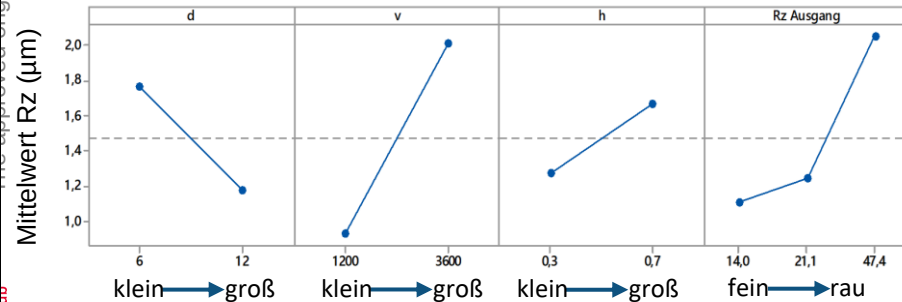
Oberflächenrauheit: Rz (µm)



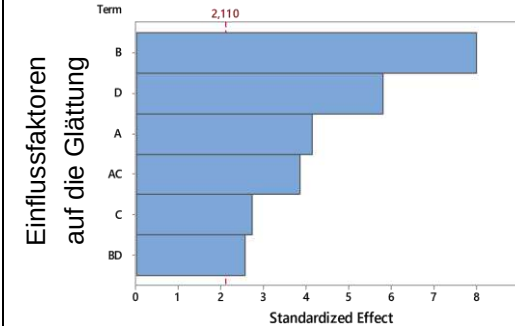
Härte: TIV HV1



Haupteffekte zur Glättung der Oberfläche



Pareto Diagramm - Statistische Signifikanz



Einflussfaktoren

- A: Durchmesser d
- B: Vorschub v
- C: Hub des Stößels h
- D: Ausgangsrauheit R_z

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Wahl eines großen Kugeldurchmessers kombiniert mit einer geringen Ausgangsrauheit und die Bearbeitung bei geringer Vorschubgeschwindigkeit und geringem Hub führen zu einem optimalen Glättungsergebnis.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung mit einer höheren Vorschubgeschwindigkeit nimmt Einfluss auf die Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

Die Wahl eines großen Kugeldurchmessers kombiniert mit einer geringeren Vorschubgeschwindigkeit führen zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Werkstoffbezeichnung: X155CrVMo12 1(1.2379)

C 1,55 Cr12 Mo0,7 V 1

Bezeichnung:	Rauheit		Härte
	Ra (µm)	Rz (µm)	
Grob	12,1 ±0,7	46,3±3,7	221,2±6,7
Mittel	5,8±0,1	26,2±0,2	
Fein	3,8±0,1	17,26±0,3	

Bearbeitungsparameter:

Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	Einsatz	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	HP	46,30
2					26,20
3					17,26
4		3600	0,3	HP	46,30
5					26,20
6					17,26
7	12	1200	0,1	SP	46,30
8					26,20
9					17,26
10		3600	0,3	SP	46,30
11					26,20
12					17,26
13	6	1200	0,1	HP	46,30
14					26,20
15					17,26
16		3600	0,3	HP	46,30
17					26,20
18					17,26
19	6	1200	0,1	SP	46,30
20					26,20
21					17,26
22		3600	0,3	SP	46,30
23					26,20
24					17,26

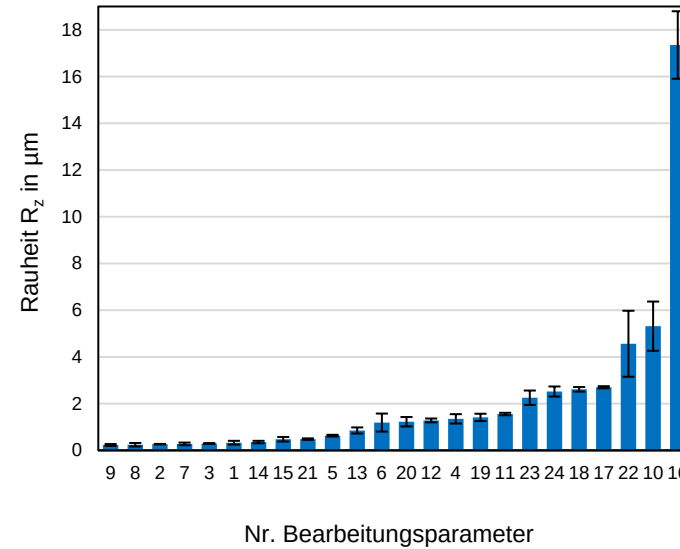
Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Pneumatische MHP-Bearbeitung mit einem konstanten Druck von 8 bar unter Anwendung des Hämmer-Werkzeuges der Firma 3S-Engineering vom Typ Forgefix Air. Frequenz bei 8 bar: ca. 275 Hz bei Verwendung des SP-Druckverteilers Frequenz bei 8 bar: ca. 246 Hz bei Verwendung des HP-Druckverteilers

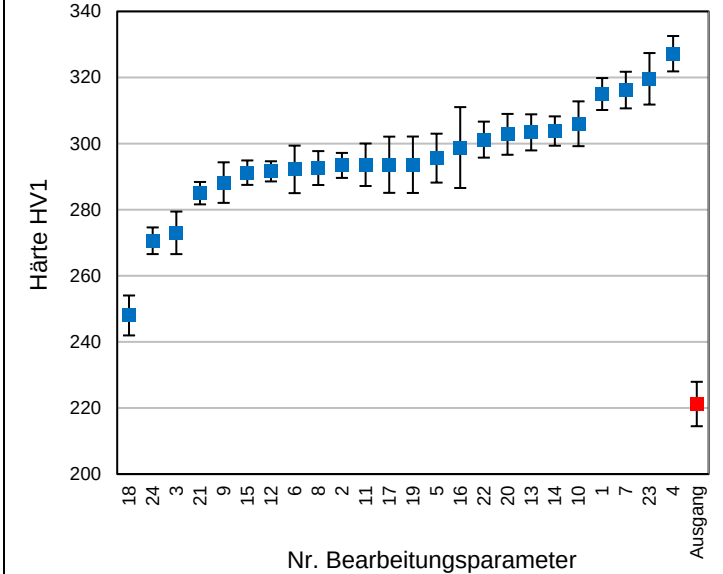
Hammersystem Forgefix



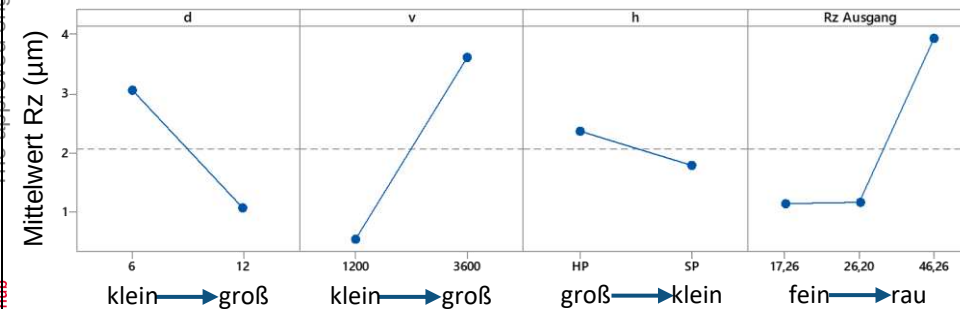
Oberflächenrauheit: Rz (µm)



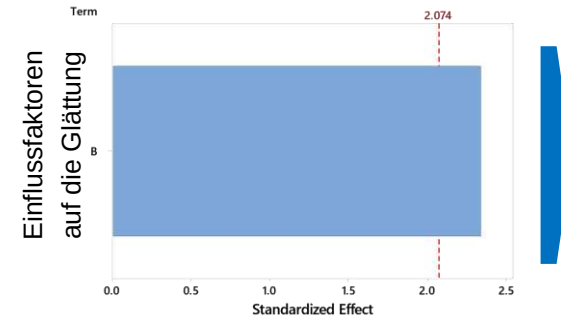
Härte: TIV HV1



Haupteffekte zur Glättung der Oberfläche



Pareto Diagramm - Statistische Signifikanz



Einflussfaktoren

- A: Durchmesser d
- B: Vorschub v
- C: Schlageinheit des pneumatischen Aktuators (HP... high pressure; SP... standard pressure)
- D: Ausgangsrauheit Rz

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Wahl einer geringen Vorschubgeschwindigkeit führt zu einem optimalen Glättungsergebnis.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung einer Oberfläche mit hoher Ausgangsrauheit führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

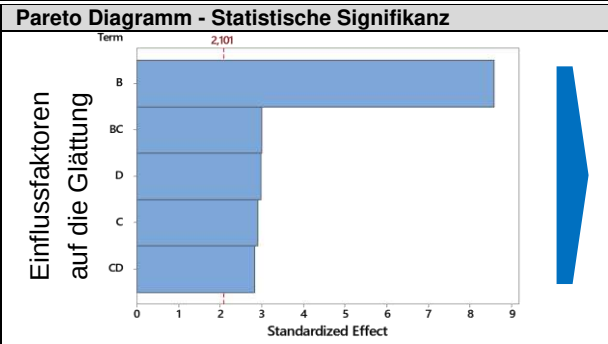
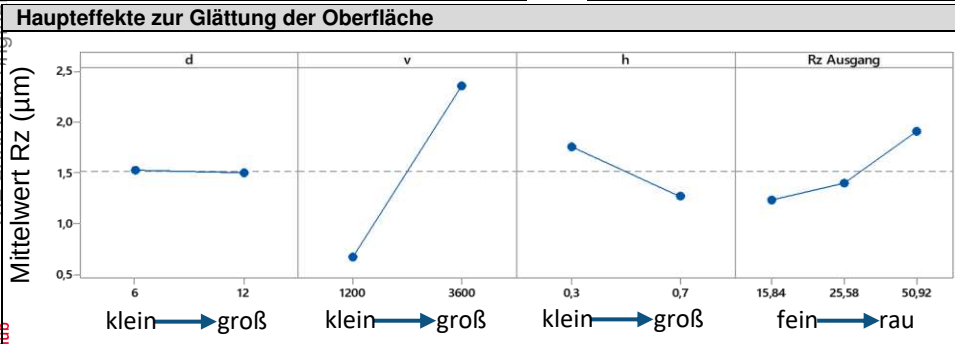
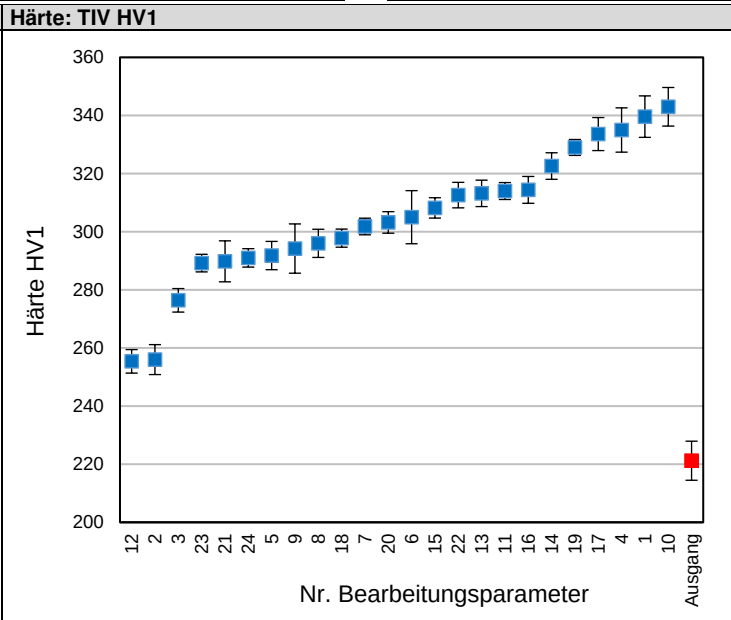
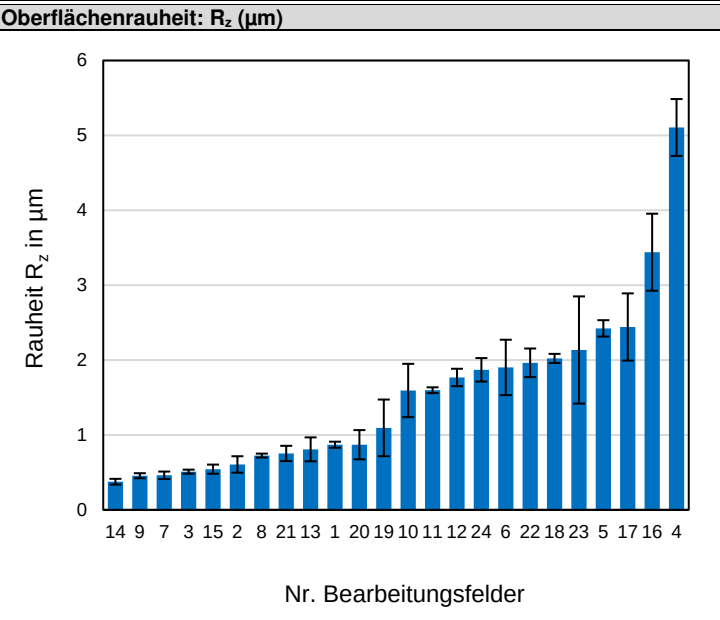
Die Bearbeitung einer Oberfläche mit hoher Ausgangsrauheit sowie die Wahl einer geringen Vorschubgeschwindigkeit führen zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Werkstoffbezeichnung: X155CrVMo12 1(1.2379)			
C 1,55 Cr12 Mo0,7 V 1			
	Rauheit		Härte
Bezeichnung:	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	12,7±0,21	50,9±0,6	221,2±6,7
Mittel	5,6±0,1	25,6±0,8	
Fein	3,6±0,1	15,8±0,3	

Bearbeitungsparameter:					
Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	h (mm)	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	0,3	50,90
2					25,60
3					15,80
4					50,90
5					25,60
6					15,80
7		1200	0,1	0,7	50,90
8					25,60
9					15,80
10					50,90
11					25,60
12					15,80
13	6	1200	0,1	0,3	50,90
14					25,60
15					15,80
16					50,90
17					25,60
18					15,80
19		1200	0,1	0,7	50,90
20					25,60
21					15,80
22					50,90
23					25,60
24					15,80

Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Elektromagnetische MHP-Bearbeitung mit konstant eingestellter Hämmerfrequenz durch Verwendung des elektromagnetischen Hämmer-Werkzeuges der Firma accurapuls.
Frequenz: 200 Hz bei einer eingestellten Leistung von 100% an der Bedieneinheit



Einflussfaktoren

A: Durchmesser d

B: Vorschub v

C: Hub des Stößels h

D: Ausgangsrauheit R_z

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Bearbeitung mit geringer Vorschubgeschwindigkeit bei einer niedrigen Ausgangsrauheit kombiniert mit hohem Hub führt zu einem optimalen Glättungsergebnis.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung einer Oberfläche mit hoher Ausgangsrauheit führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

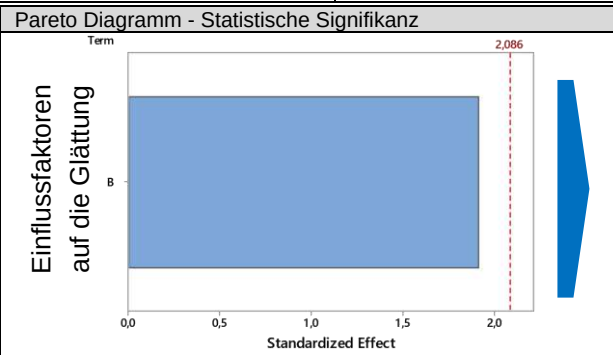
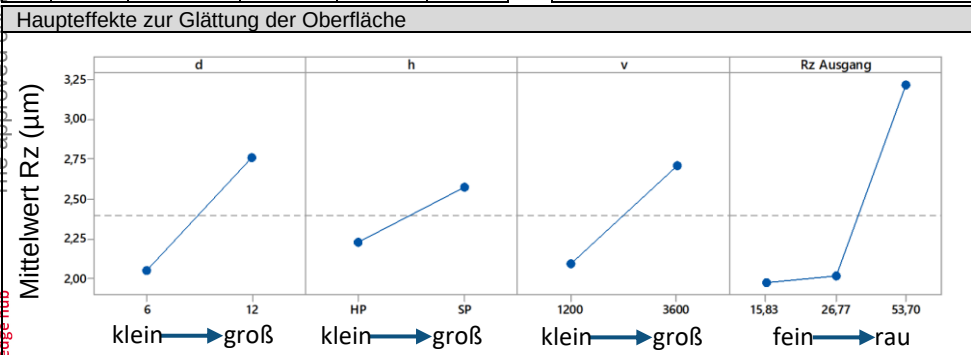
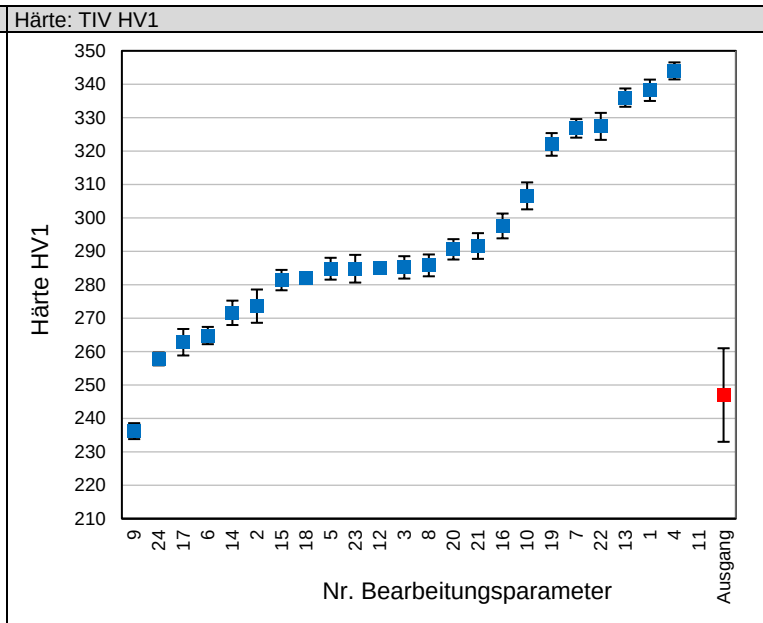
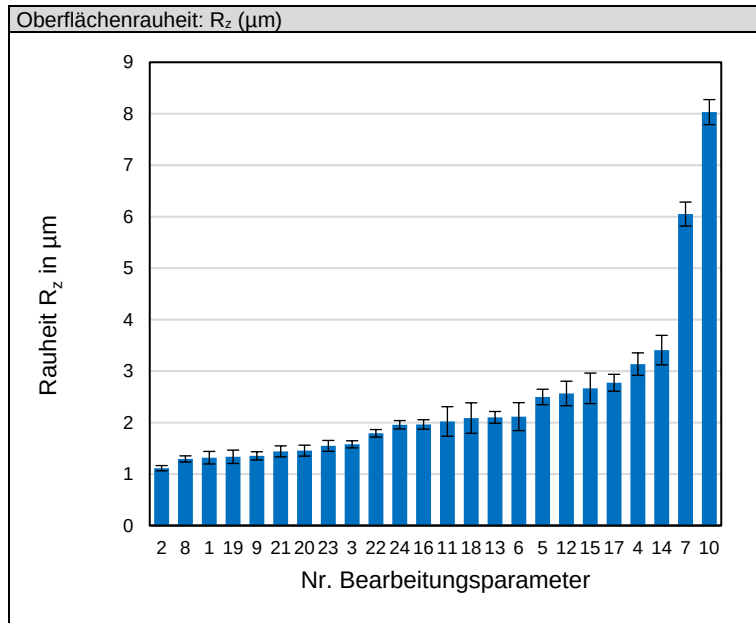
Die Bearbeitung einer Oberfläche mit hoher Ausgangsrauheit sowie die Wahl einer geringen Vorschubgeschwindigkeit und die Wahl eines hohen Hubs führen zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Werkstoffbezeichnung: 42CrMo4 (1.7225)			
C 0,42 Cr 1,10 Mo 0,25			
Bezeichnung:	Rauheit		Härte
	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	11,8±0,8	53,7±3,7	247±14
Mittel	6±0,2	26,8±0,2	
Fein	3,84±0,5	15,8±0,5	

Verfahrensbeschreibung \ Notizen
Pneumatische MHP-Bearbeitung mit einem konstanten Druck von 8 bar unter Anwendung des Hämmer-Werkzeuges der Firma 3S-Engineering vom Typ FORGEfix Air.
Frequenz bei 8 bar: ca. 275 Hz bei Verwendung des SP-Druckverteilers
Frequenz bei 8 bar: ca. 246 Hz bei Verwendung des HP-Druckverteilers



Bearbeitungsparameter:				
Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	Einsatz
1	12	1200	0,1	HP
2				
3				
4		3600	0,3	HP
5				
6				
7	12	1200	0,1	SP
8				
9				
10		3600	0,3	SP
11				
12				
13	6	1200	0,1	HP
14				
15				
16		3600	0,3	HP
17				
18				
19	6	1200	0,1	SP
20				
21				
22		3600	0,3	SP
23				
24				



- Einflussfaktoren
- A: Durchmesser d
 - B: Vorschub v
 - C: Schlageinheit des pneumatischen Aktuators (HP... high pressure; SP... standard pressure)
 - D: Ausgangsrauheit R_z

Bearbeitungsempfehlung: Glättung	Bearbeitungsempfehlung: Härte	Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte
Keine statistische Signifikanz vorhanden. Jedoch ist die Wahl einer geringen Vorschubgeschwindigkeit kombiniert mit dem HP-Druckverteiler empfehlenswert, um eine glatte Oberfläche zu erreichen.	Die Bearbeitung einer Oberfläche mit hoher Ausgangsrauheit führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.	Die Bearbeitung einer Oberfläche mit mittlerer Ausgangsrauheit und geringer Vorschubgeschwindigkeit unter Verwendung des SP-Druckverteilers führen zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Werkstoffbezeichnung: 42CrMo4 (1.7225)			
C 0,42 Cr 1,10 Mo 0,25			
	Rauheit		Härte
Bezeichnung:	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	11,3±0,3	44,7±0,8	247±14
Mittel	5,7±0,2	24,8±0,2	
Fein	3,6±0,1	17,4±0,1	

Bearbeitungsparameter:					
Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	h (mm)	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	0,3	44,70
2					24,80
3					17,40
4					44,70
5		3600	0,3	0,3	24,80
6					17,40
7					44,70
8					24,80
9		1200	0,1	0,7	17,40
10					44,70
11					24,80
12					17,40
13	6	1200	0,1	0,3	44,70
14					24,80
15					17,40
16					44,70
17		3600	0,3	0,3	24,80
18					17,40
19					44,70
20					24,80
21		1200	0,1	0,7	17,40
22					44,70
23					24,80
24					17,40

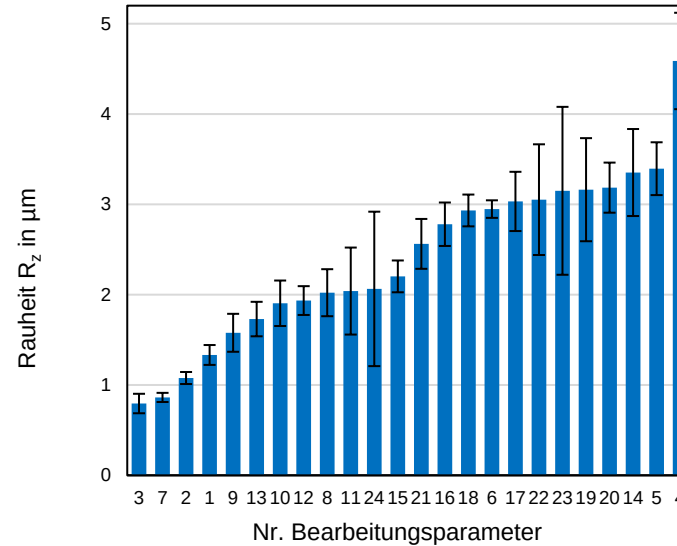
Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Elektromagnetische MHP-Bearbeitung mit konstant eingestellter Hämmerfrequenz durch Verwendung des elektromagnetischen Hämmer-Werkzeuges der Firma accurapuls.
Frequenz: 200 Hz bei einer eingestellten Leistung von 100% an der Bedieneinheit

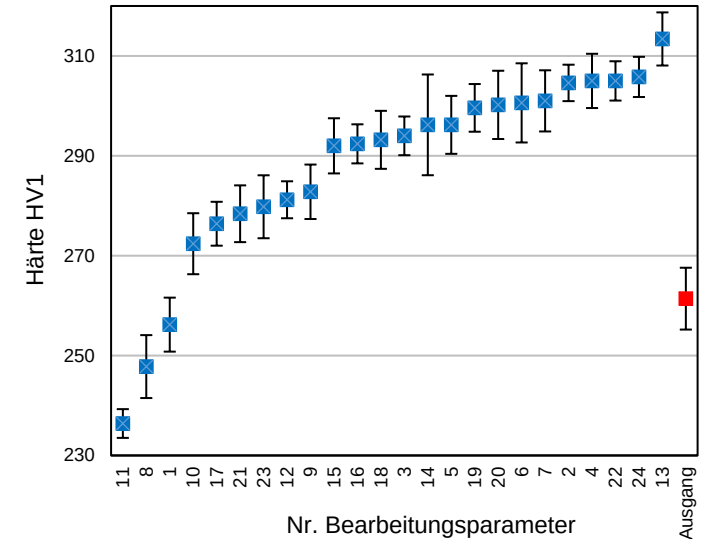
Hammersystem accurapuls



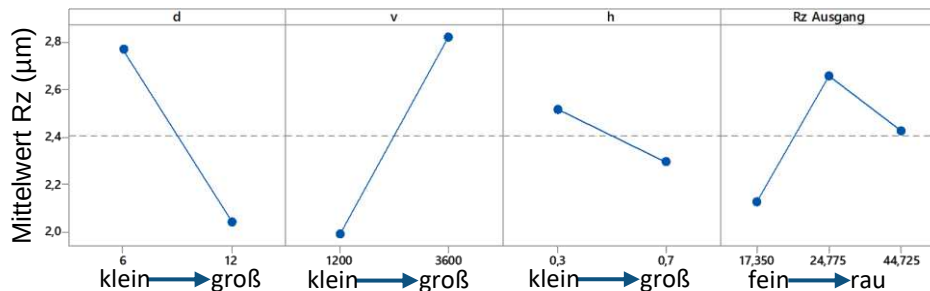
Oberflächenrauheit: Rz (µm)



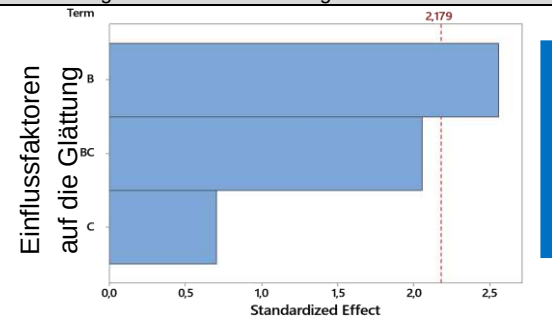
Härte: TIV HV1



Haupteffekte zur Glättung der Oberfläche



Pareto Diagramm - Statistische Signifikanz



Einflussfaktoren

- A: Durchmesser d
- B: Vorschub v
- C: Hub des Stößels h
- D: Ausgangsrauheit R_z

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Wahl einer geringen Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer besseren Glättung der Oberfläche.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung mit einem kleinen Hammerkopfdurchmesser bei gleichzeitiger Bearbeitung mit geringem Hub führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

Die Bearbeitung mit einer geringeren Vorschubgeschwindigkeit unter Verwendung eines kleinen Hammerkopfdurchmessers führt zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Werkstoffbezeichnung: 42CrMo4 Q+T. (1.7225)			
0,38<C<0,45 Si 0,4 0,7<Mn<0,9 0,9<Cr<1,2 P 0,025 0,3<Mo<0,15			
	Rauheit		Härte
Bezeichnung:	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	12,5±0,02	50,67±0,7	301±15
Mittel	5,9±0,4	23,83±2,1	
Fein	3,1±0,9	14,56±3,1	

Bearbeitungsparameter:					
Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	Einsatz	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	HP	50,67
2					23,83
3					14,56
4		3600	0,3	HP	50,67
5					23,83
6					14,56
7		1200	0,1	SP	50,67
8					23,83
9					14,56
10		3600	0,3	SP	50,67
11					23,83
12					14,56
13	6	1200	0,1	HP	50,67
14					23,83
15					14,56
16		3600	0,3	HP	50,67
17					23,83
18					14,56
19		1200	0,1	SP	50,67
20					23,83
21					14,56
22		3600	0,3	SP	50,67
23					23,83
24					14,56

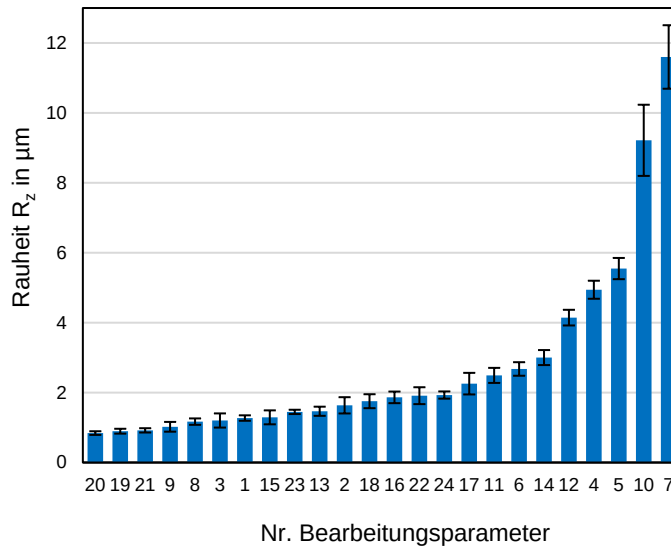
Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Pneumatische MHP-Bearbeitung mit einem konstanten Druck von 8 bar unter Anwendung des Hämmer-Werkzeuges der Firma 3S-Engineering vom Typ FORGEfix Air.
 Frequenz bei 8 bar: ca. 275 Hz bei Verwendung des SP-Druckverteilers
 Frequenz bei 8 bar: ca. 246 Hz bei Verwendung des HP-Druckverteilers

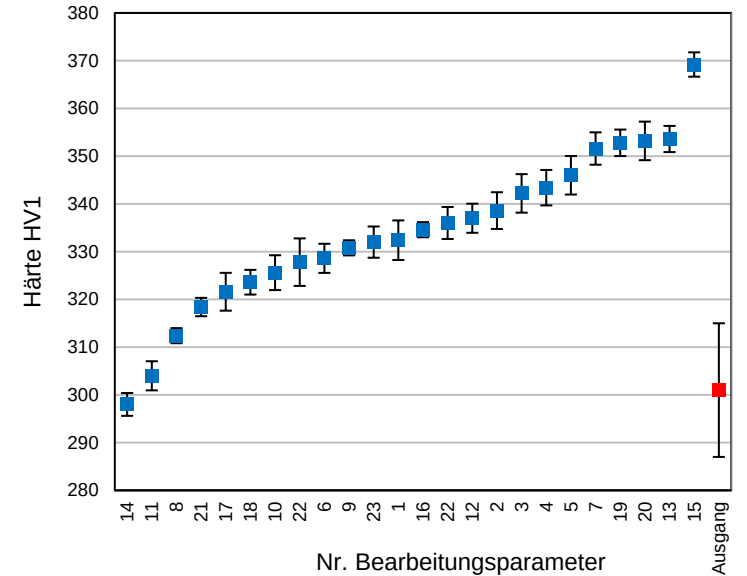
Hammersystem FORGEfix Air



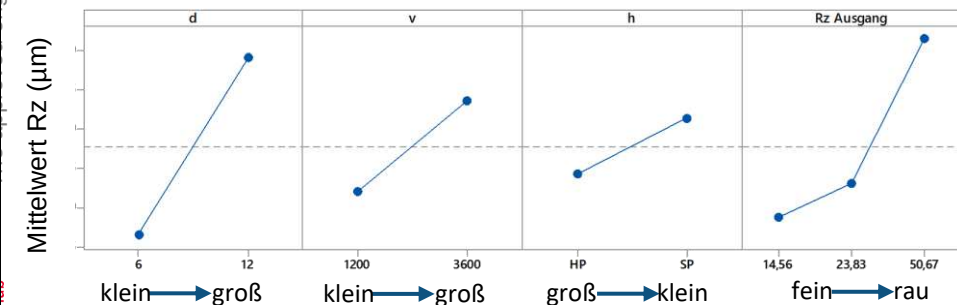
Oberflächenrauheit: Rz (µm)



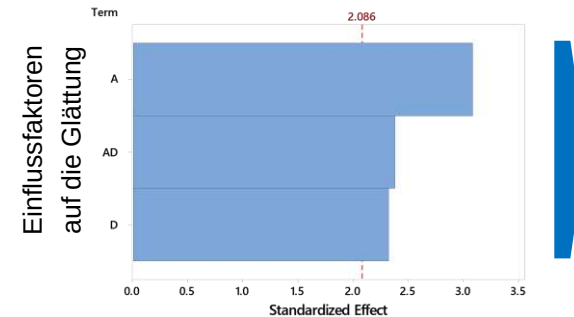
Härte: TIV HV1



Haupteffekte zur Glättung der Oberfläche



Pareto Diagramm - Statistische Signifikanz



Einflussfaktoren

- A: Durchmesser d**
- B: Vorschub v**
- C: Schlageinheit des pneumatischen Aktuators (HP... high pressure; SP... standard pressure)**
- D: Ausgangsrauheit Rz**

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Wahl eines kleinen Kugeldurchmessers kombiniert mit einer geringen Ausgangsrauheit der Oberfläche führt zu einem optimalen Glättungsergebnis.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung einer Oberfläche mit hoher Ausgangsrauheit kombiniert mit dem HP-Druckverteiler sowie geringer Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

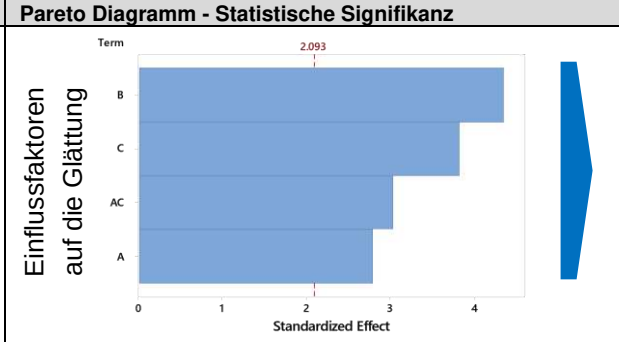
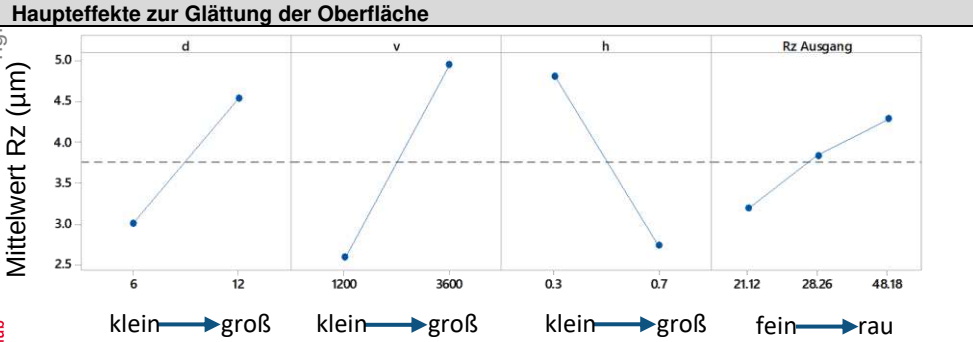
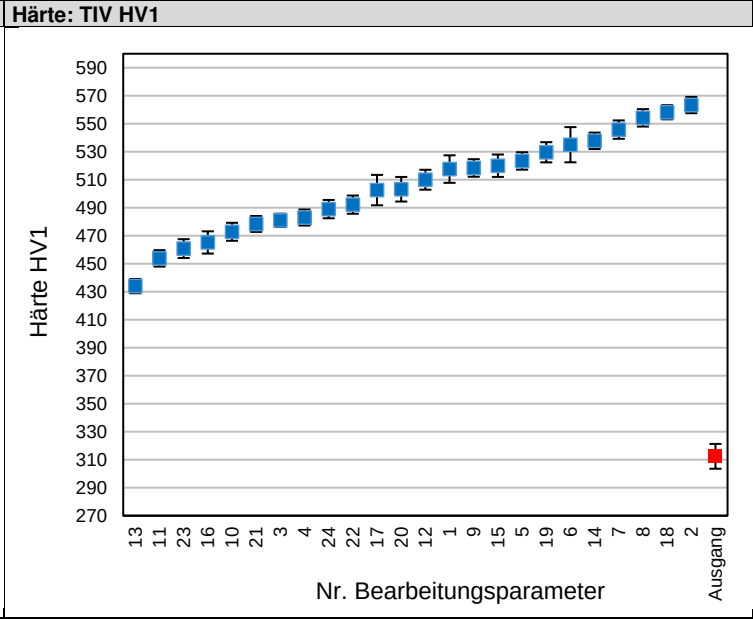
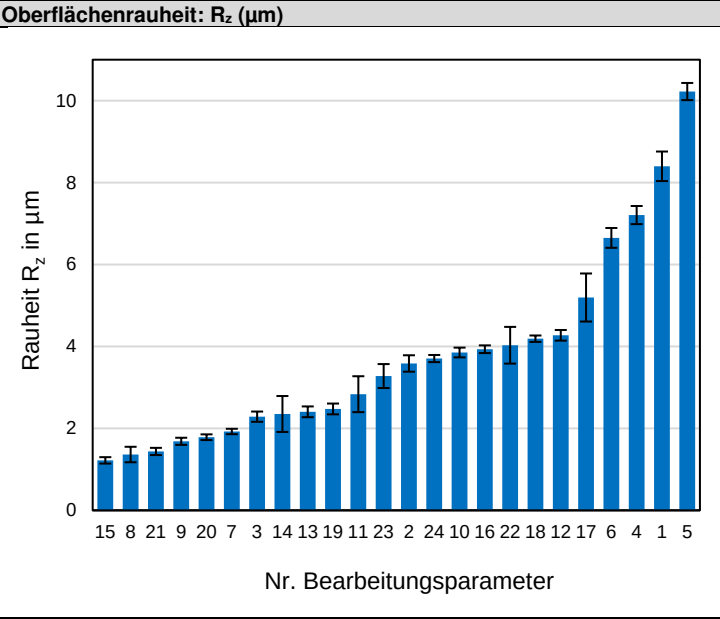
Die Bearbeitung einer Oberfläche mit geringer Ausgangsrauheit und geringer Vorschubgeschwindigkeit unter Verwendung des HP-Druckverteilers führen zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Werkstoffbezeichnung: 42CrMo4 Q+T. (1.7225)			
0,38<C<0,45 Si 0,4 0,7<Mn<0,9 0,9<Cr<1,2 P 0,025 0,3<Mo<0,15			
	Rauheit		Härte
Bezeichnung:	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	12,4±0,6	48,2±2,04	301±15
Mittel	5,6±0,3	28,3±1,7	
Fein	4,4±0,2	21,2±1,04	

Bearbeitungsparameter:					
Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	h (mm)	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	0,3	48,20
2					28,30
3					21,20
4					48,20
5		3600	0,3	0,3	28,30
6					21,20
7					48,20
8					28,30
9		1200	0,1	0,7	21,20
10					48,20
11					28,30
12					21,20
13	6	1200	0,1	0,3	48,20
14					28,30
15					21,20
16					48,20
17		3600	0,3	0,3	28,30
18					21,20
19					48,20
20					28,30
21		1200	0,1	0,7	21,20
22					48,20
23					28,30
24					21,20

Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Elektromagnetische MHP-Bearbeitung mit konstant eingestellter Hämmerfrequenz durch Verwendung des elektromagnetischen Hämmer-Werkzeuges der Firma accurapuls.
Frequenz: 200 Hz bei einer eingestellten Leistung von 100% an der Bedieneinheit



Einflussfaktoren

A: Durchmesser d

B: Vorschub v

C: Hub des Stößels h

D: Ausgangsrauheit R_z

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Wahl einer geringen Vorschubgeschwindigkeit sowie eines kleinen Kugeldurchmessers kombiniert mit einem geringen Hub führen zu einem optimalen Glättungsergebnis.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung mit einem großen Hammerkopfdurchmesser bei gleichzeitiger Bearbeitung mit geringer Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

Die Bearbeitung mit einer geringeren Vorschubgeschwindigkeit unter Verwendung eines kleinen Hammerkopfdurchmessers führen zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Werkstoffbezeichnung: Al-2024 (3.1355, T351)

Si 0,5 3,8<cu<4,9 Fe 0,4 0,3<Mn<0,9 1,2<Mg<1,8 Cr 0,1 Zn 0,25 Ti 0,1 Al Bal

Bezeichnung:	Rauheit		Härte
	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	12,03±0,3	49,4±1,7	161,2±5
Mittel	5,7±0,4	23,8±1,2	
Fein	3,8±0,1	16,5±0,5	

Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Pneumatische MHP-Bearbeitung mit einem konstanten Druck von 8 bar unter Anwendung des Hämmer-Werkzeuges der Firma 3S-Engineering vom Typ FORGEfix Air.

Frequenz bei 8 bar: ca. 275 Hz bei Verwendung des SP-Druckverteilers

Frequenz bei 8 bar: ca. 246 Hz bei Verwendung des HP-Druckverteilers

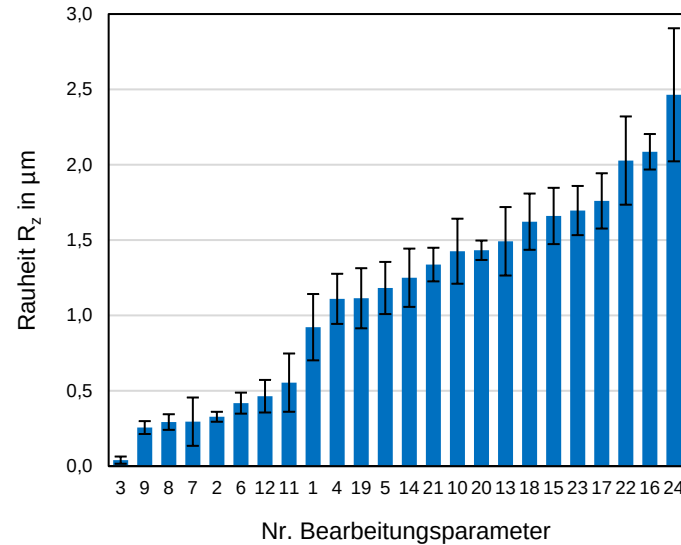
Hammersystem FORGEfix Air



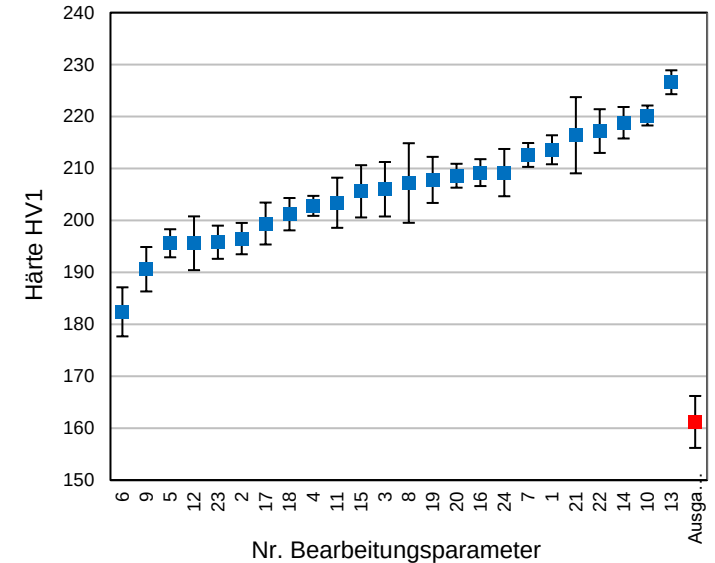
Bearbeitungsparameter:

Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	Einsatz	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	HP	49,40
2					23,80
3					16,50
4		3600	0,3	HP	49,40
5					23,80
6					16,50
7	12	1200	0,1	SP	49,40
8					23,80
9					16,50
10		3600	0,3	SP	49,40
11					23,80
12					16,50
13	6	1200	0,1	HP	49,40
14					23,80
15					16,50
16		3600	0,3	HP	49,40
17					23,80
18					16,50
19	6	1200	0,1	SP	49,40
20					23,80
21					16,50
22		3600	0,3	SP	49,40
23					23,80
24					16,50

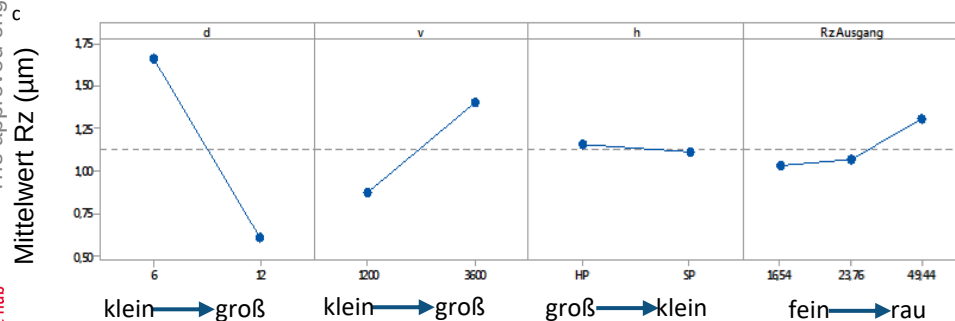
Oberflächenrauheit: Rz (µm)



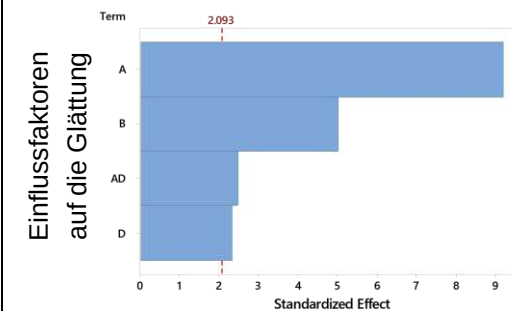
Härte: TIV HV1



Haupteffekte zur Glättung der Oberfläche



Pareto Diagramm - Statistische Signifikanz



Einflussfaktoren

A: Durchmesser d

B: Vorschub v

C: Schlageinheit des pneumatischen Aktuators (HP... high pressure; SP... standard pressure)

D: Ausgangsrauheit R_z

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Wahl eines großen Kugeldurchmessers und die Bearbeitung mit geringer Vorschubgeschwindigkeit führen zu einem optimalen Glättungsergebnis.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung einer Oberfläche mit hoher Ausgangsrauheit führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

Die Wahl eines großen Kugeldurchmessers und die Bearbeitung mit geringer Vorschubgeschwindigkeit bei einer erhöhten Ausgangsrauheit führen zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Werkstoffbezeichnung: Al-2024 (3.1355, T351)

Si 0,5 3,8<cu<4,9 Fe 0,4 0,3<Mn<0,9 1,2<Mg<1,8 Cr 0,1 Zn 0,25 Ti 0,1 Al Bal

	Rauheit		Härte
Bezeichnung:	Ra (µm)	Rz (µm)	HV1
Grob	11,8±0,5	47,8±1,8	161,2±5
Mittel	5,5±0,3	22,8±0,8	
Fein	2,3±0,1	13,3±0,6	

Bearbeitungsparameter:

Nr	d (mm)	v (mm/min)	s = a (mm)	h (mm)	Rz (µm)
1	12	1200	0,1	0,3	47,80
2					22,80
3					13,30
4		3600	0,3	0,3	47,80
5					22,80
6					13,30
7		1200	0,1	0,7	47,80
8					22,80
9					13,30
10	6	3600	0,3	0,3	47,80
11					22,80
12					13,30
13		1200	0,1	0,3	47,80
14					22,80
15					13,30
16		3600	0,3	0,3	47,80
17					22,80
18					13,30
19	6	1200	0,1	0,7	47,80
20					22,80
21					13,30
22		3600	0,3	0,7	47,80
23					22,80
24					13,30

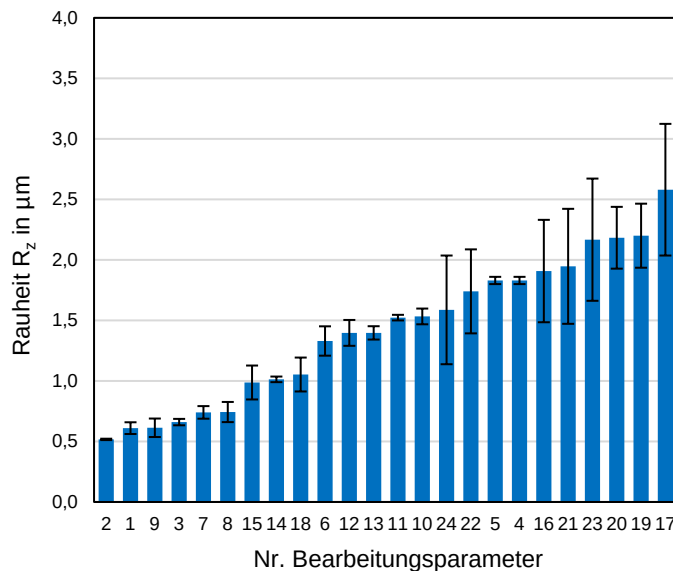
Verfahrensbeschreibung \ Notizen

Elektromagnetische MHP-Bearbeitung mit konstant eingestellter Hämmerfrequenz durch Verwendung des elektromagnetischen Hämmer-Werkzeuges der Firma accurapuls.
Frequenz: 200 Hz bei einer eingestellten Leistung von 100% an der Bedieneinheit

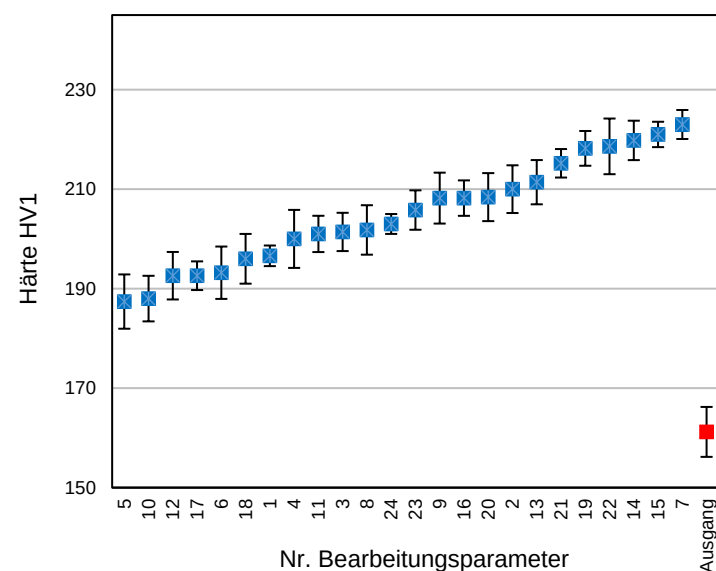
Hammersystem accurapuls



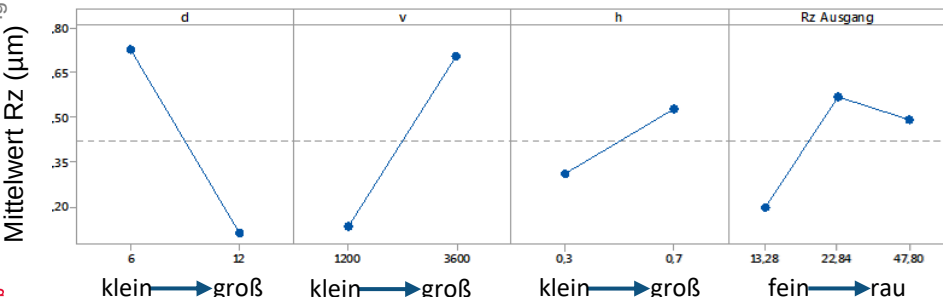
Oberflächenrauheit: Rz (µm)



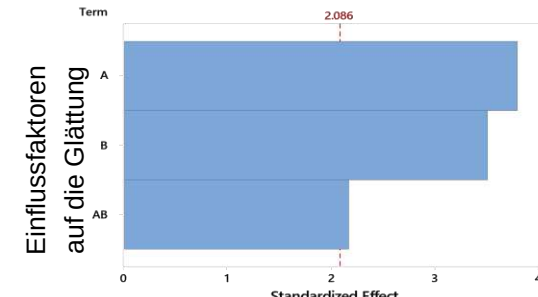
Härte: TIV HV1



Haupteffekte zur Glättung der Oberfläche



Pareto Diagramm - Statistische Signifikanz



Einflussfaktoren

- A: Durchmesser d
- B: Vorschub v
- C: Hub des Stößels h
- D: Ausgangsrauheit R_z

Bearbeitungsempfehlung: Glättung

Die Wahl eines großen Kugeldurchmessers und die Bearbeitung mit geringer Vorschubgeschwindigkeit führen zu einem optimalen Glättungsergebnis.

Bearbeitungsempfehlung: Härte

Die Bearbeitung mit einem kleinen Hammerkopfdurchmesser kombiniert mit geringer Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer Härtesteigerung in den Oberflächenrandschichten.

Bearbeitungsempfehlung: Kombination aus Glättung und Härte

Die Wahl eines großen Kugeldurchmessers und die Bearbeitung mit geringer Vorschubgeschwindigkeit führen zu einem optimalen Bearbeitungsergebnis.

Lagerung und Antriebseinheit der DIP-Aktorik aus Kapitel 2.3.7 und Kapitel 4.3

Für das DIP-System aus Kapitel 4.2 findet eine Entwurfsauslegung der Lagerung statt. Das Lager besteht aus einem monolithischem Aufbau und ist als Festkörperlager ausgeführt. In der ausgeführten Variante des Lagers ist bei einer axialen Auslenkung in den Balkenelementen ausschließlich mit Normalspannungen zu rechnen ist. Somit kann eine Betrachtung eines einzelnen Blattfedergelenks unter Berücksichtigung des ebenen Spannungszustandes erfolgen. Aus diesem Grund bietet sich hier eine Vorabbetrachtung eines einzelnen Lagergelenks durch eine analytische Annäherung über eine Rechteck-Balkenfeder an, welche durch die FEM-Berechnung überprüft werden kann. Die Biegespannung lässt sich einfach über das maximale Biegemoment an der Einspannung bestimmen. Das Balkenmodell und die berechnete Verschiebung ist in Abbildung 104 dargestellt. Als Werkstoff für die Festkörperlagerung im Aktor kommt die Titanlegierung vom Typ Ti6Al4V (3.7165) zum Einsatz. In Tabelle 56 sind die ausgewählte Eigenschaften der Titanlegierung zusammengefasst.

R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	ρ (g/cm ³)	E-Modul (GPa)	α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)
995	880	4,45	114	8,9

Tabelle 56: Werkstoffeigenschaften der Titanlegierung Ti6Al4V [146]

Für die Auslegung des Lagers wird die Schwingfestigkeit des Werkstoffes herangezogen um die Geometrie der Lagerung bei gegebenen maximalen Spannungen zu optimieren.

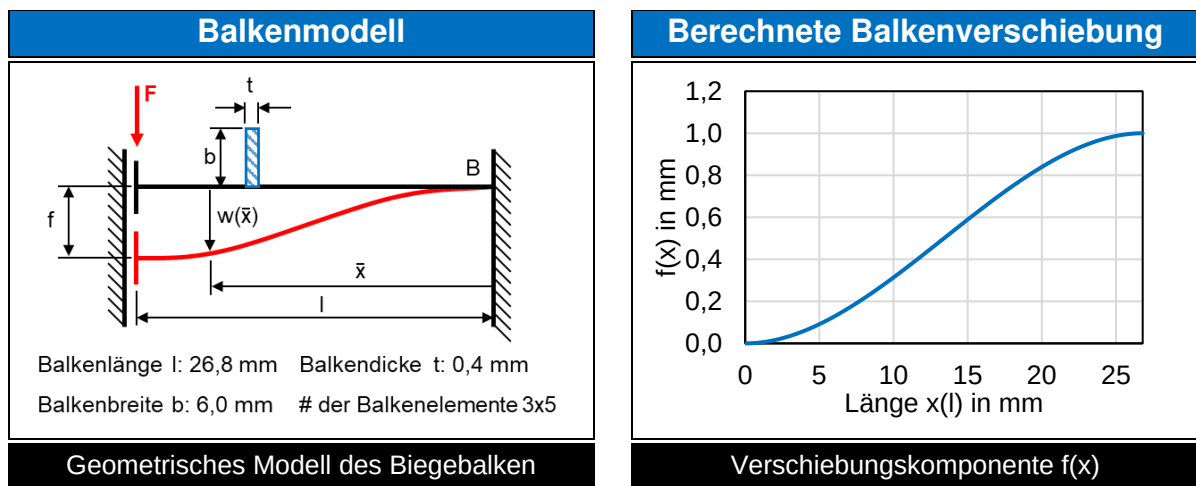


Abbildung 104: Geometrie der Biegebalken der Festkörperlagerung (links) und Balkenverschiebung (rechts)

In [147] ist die Schwingfestigkeit der Titanlegierung Ti6Al4V unter Einfluss verschiedener Mikrostrukturen anhand eines Umlaufbiegeversuches bei 10^8 Lastwechseln zwischen 460 MPa und 640 MPa angegeben.

Die maximale Durchbiegung eines einzelnen Balkenelementes mit fixierter Einspannung und axial gelagerter Gegenseite kann mittels

$$f_{max} = \frac{Fl^3}{12EI} \quad (50)$$

berechnet werden. Zur Beschreibung der Biegeform kann die Gleichung 50 folgendermaßen erweitert werden zu:

$$f(x) = \frac{Fl^3}{12EI} \left[3 \left(\frac{x}{l} \right)^2 - 2 \left(\frac{x}{l} \right)^3 \right] \quad (51)$$

Die maximale Biegespannung ist über:

$$\sigma_{bmax} = \frac{M_b}{W_b} = \frac{36EI f_{max}}{bh^2 l^2} \quad (52)$$

bestimmbar. Für die geometrischen Abmessungen aus Abbildung 104 und bei vorgegebener maximale Durchbiegung f_{max} , können folgende Größen eines einzelnen Biegebalkens mit dem Index 1 sowie einer gesamten Lagereinheit mit in Summe 15 Stegen und dem Index 15 berechnet werden.

f_{max} [mm]	M_{bmax} [Nmm]	σ_b [N/mm ²]	F_1 (N)	F_{15} [N]	k_1 [N/mm]	k_{15} [N/mm]
1,2	36,6	229	2,7	40,9	2,3	34,1

Tabelle 57: Festigkeitseigenschaften der Festkörperlagerung aus Ti6Al4V [146]

Bei einer axialen Auslenkung von 1 mm sinkt die Biegespannung σ_b auf 190,5 N/mm². Selbst bei einer axialen Verschiebung von 1,2 mm liegt der Wert mit 229 N/mm² um den Faktor 2 unter dem Wert der Schwellfestigkeit für den Werkstoff Ti6Al4V [147]. Die axiale Kraft, um das Lager auf 1,2 mm auszulenken, liegt bei rund 41 N. Aus dem Verhältnis von Kraft zu Verschiebung kann die axiale Steifigkeit k ausgedrückt werden. Die bei der Verlagerung des Balkenelementes verrichtete Arbeit wirkt der Bewegungsenergie aus dem Antrieb entgegen und kann über die Federkonstante und der Verformung folgendermaßen bestimmt werden:

$$W = \int_0^t Fv dt = \int_0^t k f v_x dt = \frac{1}{2} k f^2 \quad (53)$$

Für ein einzelnes Lager beträgt die Verlustenergie, bei der Bewegung des Läufers aus seiner Ausgangsposition hin zur Endlage und einem Weg von 1 mm etwa 17,1 mJ. Berücksichtigt man das obere und untere Lager, so muss hier der doppelte Wert von 34,2 mJ herangezogen werden. Bei der Bewegungsumkehrung wirkt diese Energiekomponente hin zur Ausgangslage. Im Folgenden findet eine Betrachtung des DIP-Systems unter Anwendung der Finite-Elemente-Simulation statt. Ziel ist es hierbei, die strukturellen Eigenschaften des Hammersystems zu beschreiben und die Leistungsfähigkeit der Antriebseinheit darzustellen.

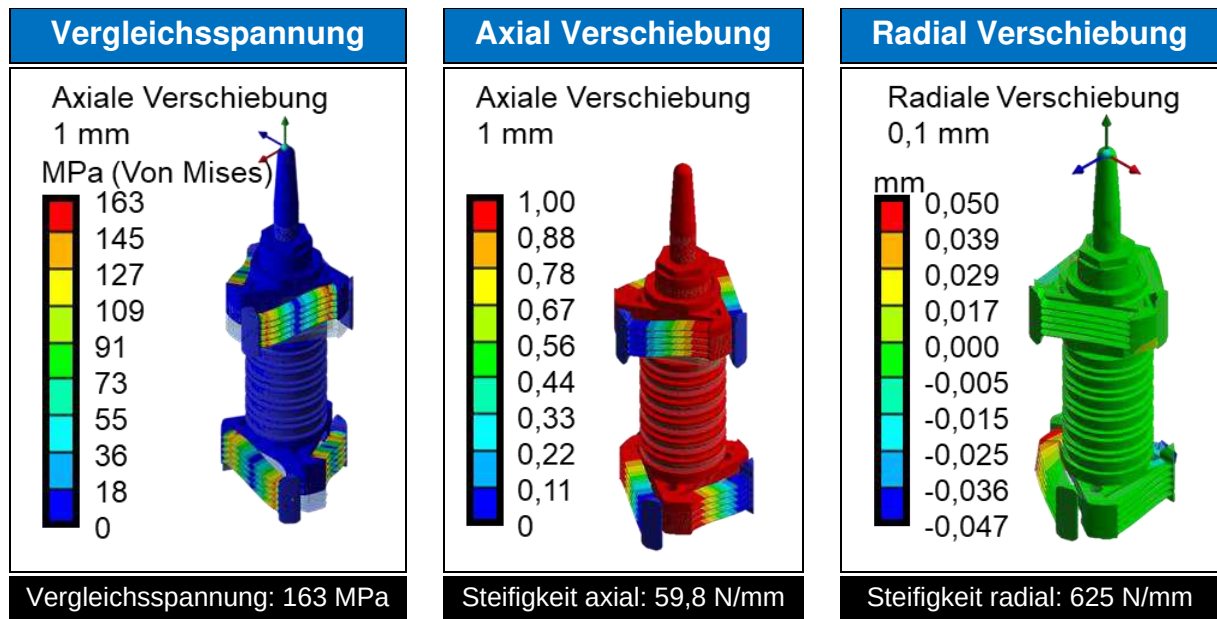


Abbildung 105: Ergebnisse der mechanisch-statischen Simulation

Bei der analytischen Berechnung der Lagerung wurde lediglich die freie Biegelänge eines einzelnen Blattfederelementes herangezogen. Durch die Anbindung mittels Kreissegmenten an die Hauptstruktur ist davon auszugehen, dass die Biegelänge sich somit vergrößert und die Steifigkeit eines Einzelelementes verringert wird. Die Einspannung erfolgt als fixierte Lagerung, gleich dem realen Systemaufbau, über die Lagerstege der Festkörperlager.

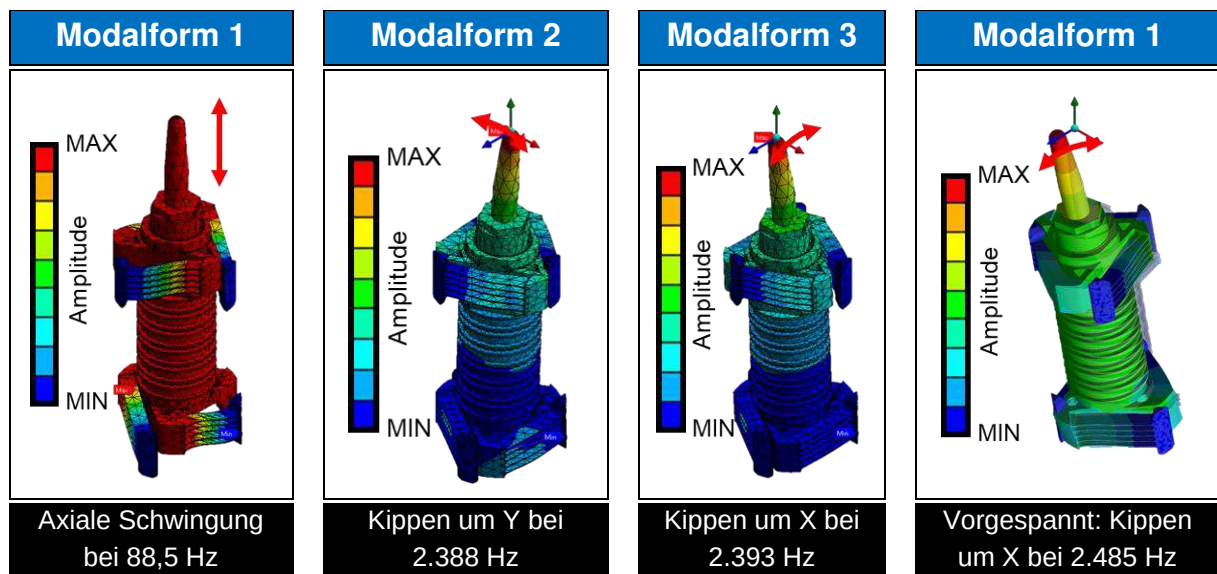


Abbildung 106: Ergebnis der FEM-Modalanalyse der Antriebseinheit

Eine Darstellung der Lagerung ist in Abbildung 45 gegeben. Abbildung 105 zeigt das Ergebnis der statischen Berechnung der Lagereinheit. Neben der Berechnung der axialen sowie der radialen Steifigkeit des Festkörperlagers wird auch die Vergleichsspannung nach VON MIESES ausgewertet. Wie eingangs erwähnt, zeigt

die axiale Steifigkeit des FEM-Modells einen etwas geringeren Wert als die analytische Berechnung. In dieser Analyse ist erkennbar, dass die radiale Steifigkeit des Systems um den Faktor 10 höher als die axiale ist. Neben der Auswertung der Verschiebungen und der Spannungen ist es notwendig, das maximal zulässige Torsionsmoment auf das untere Lager zu bestimmen. Diese Berechnung dient zur Festlegung des maximalen Anzugsmoments der Spannzange, welche in weiterer Folge eingesetzt wird um das Werkzeug (Hammerkopf) mittels Reibung zu fixieren. Eine FEM-Analyse ergab ein maximal zulässiges Moment auf das Lager von 140 Nm, was etwa dem siebenfachen des vorgegebenen Anzugsmoments des eingesetzten Spannelements entspricht. Gleich der strukturdynamischen Analyse des PIEZO-MHP-Aktors, erfolgt eine Betrachtung der Schwingungseigenschaften dieses Systems. In Abbildung 104 sind die Ergebnisse der ersten drei Modalformen und der dazugehörigen Eigenfrequenz dargestellt. Dabei beschreibt die erste Modalform lediglich eine axiale Schwingung der Läufer-Lagereinheit inkl. der Spannzange und Werkzeug. Diese Schwingungsform wird maßgeblich über die axiale Lagersteifigkeit und die bewegte Masse bestimmt. Werden die Massen der Spannzange und des Stößels vernachlässigt, so verschiebt sich die Eigenfrequenz der ersten axialen Schwingungsform nach oben. Da in diesem Fall die axiale Steifigkeit der Antriebseinheit über die Festkörperlagerung definiert wird, kann die Verschiebung der Eigenfrequenz über den Ausdruck der Eigenkreisfrequenz in der Bewegungsgleichung eines Ein-Massen-Schwingers bestimmt werden. Dieser Term ist folgend dargestellt.

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (54)$$

Im Falle der beschriebenen Antriebseinheit steigt somit die Eigenfrequenz auf 103,8 Hz an. Es kann somit festgehalten werden, dass die für die Antriebsregelung entscheidende erste Eigenfrequenz des Systems unter $f = 100$ Hz liegt und diese in Abhängigkeit des eingesetzten Werkzeuges bestimmt werden muss. Die modale Masse des Systems der Antriebseinheit lässt sich aus dem Ergebnis der FEM-Modalanalyse bestimmen. Diese ist für die erste Eigenfrequenz des Systems, bestehend aus dem Läufer und der anteiligen Massen der beiden Festkörperlagerung, in der nachfolgenden Tabelle 58 aufgelistet.

Komponenten	Modale Masse in kg	Eigenfrequenz in Hz	Gesamt Masse in kg
Antriebseinheit	0,179	103,8	0,192

Tabelle 58: Modale Masse der Antriebseinheit als Ergebnis der FEM-Berechnung

Die beiden Modalformen zwei und drei beschreiben zwei symmetrische Kippschwingungen über die Y- und die X-Achse. Neben diesen freien Schwingungsformen ist als weitere Darstellung in Abbildung 106 eine vorgespannte Modalanalyse dargestellt. Dabei erfolgte eine axiale Auslenkung der Lager um 1 mm. Wie sich auch hier darstellt, beeinflusst diese Schwingungsform nicht den

Schlagmechanismus der Einheit. Um in weiterer Folge eine kinetische Energiegröße des Hammersystems vorgeben zu können, ist es notwendig, die bewegte Masse m_{dyn} zu kennen. Auf Basis der Ergebnisse der FEM-Berechnung ist diese für die Antriebseinheit folgendermaßen zu bestimmen.

$$m_{dyn} = m_{Modal} + m_{Spann} + m_{WKZ} \quad (55)$$

Dabei steht m_{dyn} für die vollständig bewegte Masse, m_{Modal} für die bewegte Masse aus der FEM-Simulation, m_{Spann} beschreibt die Masse des Spannelements, welche das Hammerkopfwerkzeug reibschlüssig aufnimmt, sowie m_{WKZ} definiert die Masse des Hammerkopfes. Die Spannbuchse vom Typ TT mit einer Bohrung von 8 mm besitzt eine Masse von m_{Spann} 0,033 kg. Wird als Werkzeug ein 40 mm langer Stift aus Hartmetall mit einem Durchmesser von 8 mm und an den Enden einer Halbkugel als Hammerwerkzeug eingesetzt, so ist für das Werkzeug eine Masse m_{WKZ} von ebenfalls 0,033 kg zu berücksichtigen. Somit kann als dynamische Masse für das schwingungsfähige System m_{dyn} ein Wert von 0,258 kg angenommen werden. Mit dieser Masse ist bei der Annahme einer Hammerkopfgeschwindigkeit von $v_0 = 2$ m/s eine kinetische Energie vor dem Auftreffen auf die Werkstoffoberfläche von 516 mJ realisierbar.

In Abbildung 103 ist abschließend das reale Modell der Antriebseinheit inklusive der beiden Lager aus der TiAl64V Legierung zusehen. Neben dieser ist auch ein Einzellager in einer Fertigungsvorrichtung zur EDM-Bearbeitung abgebildet.

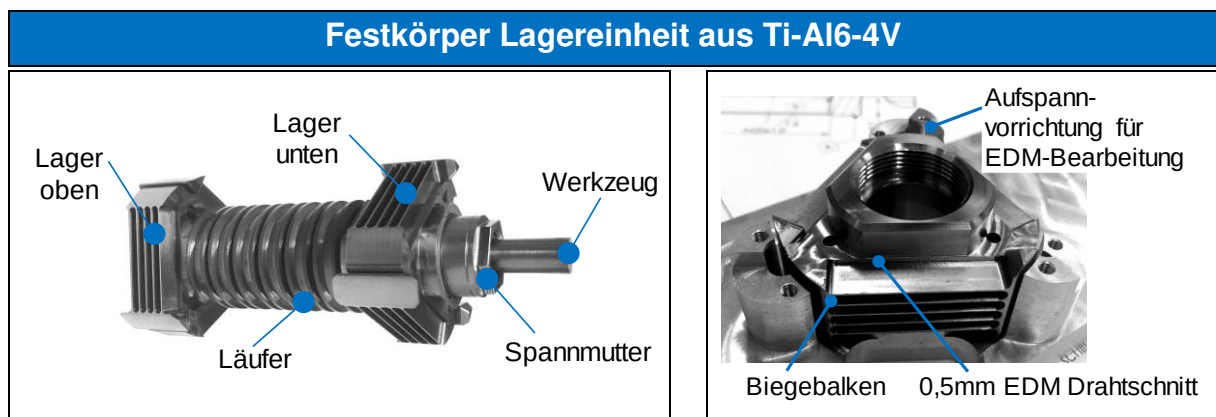


Abbildung 107: Reales Modell der Antriebseinheit des DIP-MHP-Aktors, links: In der Ausführung der bewegten Bauteile, rechts: Lager in der Aufspannvorrichtung für die Fertigung



Anhang B

Persönliche Daten

Name:	Stephan Krall
Geburtsdatum:	11.09.1985
Geburtsort:	Schwarzach im Pongau
Nationalität:	Österreich

Schulbildung

Schule:	HTL Hallein Wirtschaftsingenieurwesen
Hochschulzugang:	Reifeprüfung
Abschlussdatum:	06/2006

Studium

Dauer:	2008-2012
Hochschule:	FH Joanneum Graz
Abschluss:	Dipl.-Ing. (FH)
Titel der Diplomarbeit:	Zustandsüberwachung an Werkzeugmaschinen

Dauer:	2013-2015
Hochschule:	FH Campus Wien
Abschluss:	MSc.
Titel der Masterarbeit:	Vergleich der Werkstoffeigenschaften unterschiedlicher Leichtbau-Prüfkörper

Berufspraxis

Diverse Schulpraktika	2001 - 2006
Atomic Austria GmbH	2007 - 2008
Emco Maier GmbH	2008 - 2012
TU Wien - Institut für Fertigungstechnik und Photonischer Technologien	seit 10/2012 -