

Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

M.Sc. Andrii Zelinko

aus

Drohobytch, Ukraine

Tag der mündlichen Prüfung: 30.03.2022

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Dr. h.c. Bernhard Karpuschewski

Dortmund, 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN: 978-3-8027-8923-6

Danksagung

Meine Forschungsarbeit auf dem Gebiet des magnetabrasiven Polierens wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OvGU) begonnen. Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlicher Tätigkeit in der GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V.. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Wesentlichen im Laufe eines Kooperationsprojektes mit der Firma ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, das im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wurde, generiert. Im Rahmen des Projektes wurde das MAP-Verfahren im Einsatz auf Bearbeitungszentren umfangreich untersucht. An dieser Stelle möchte ich mich bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die Förderung des Projektes und bei OvGU Magdeburg sowie GFE Schmalkalden für die guten Forschungsrahmenbedingungen bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann für die Übernahme der externen Betreuung bei diesem komplexen Fertigungsverfahren und der sehr schnellen, zielführenden Kommunikation; Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. Bernhard Karpuschewski für den guten Einstieg in eine wissenschaftliche Laufbahn an der OvGU Magdeburg und die Übernahme der Koreferats; Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Viktor Maiboroda von der Nationalen Technischen Universität Kiew „KPI“ für das Inspirieren meiner Forschung auf dem Gebiet des magnetabrasiven Polierens. Mein herzlicher Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Florian Welzel für die wissenschaftliche Betreuung während meiner gesamten Forschungstätigkeit und kritische Durchsicht dieser Arbeit sowie wertvolle Kommentare.

Bei meinen ehemaligen und derzeitigen Kolleginnen und Kollegen der OvGU Magdeburg und GFE Schmalkalden möchte ich mich für die sehr freundliche Atmosphäre, Unterstützung bei der Versuchsvorbereitung und -durchführung sowie eine produktive Zusammenarbeit bedanken. Für die besondere Unterstützung von meiner liebevollen Familie, Lebensgefährtin und meinen engen Freunden bedanke ich mich herzlich.

Die vorliegende Arbeit ist meinem verstorbenen Vater, Herrn Ihor Zelinko, gewidmet.

Kurzfassung

Die steigenden Anforderungen an die Oberflächenqualität von Bauteilen verursachen einen hohen Zeit- und Kostenaufwand in der Endbearbeitung von Plan- und Freiformflächen. Obwohl zahlreiche Finishverfahren heutzutage industriell umgesetzt werden, weisen die meisten Technologien eine sehr niedrige Produktivität und prozessspezifische Nachteile auf. Weiterhin werden für die Erzeugung sehr hoher Oberflächengüten häufig komplexe und teure Anlagen des Sondermaschinenbaus benötigt. Eine konkurrenzfähige Alternative kann das magnetabrasive Polieren (MAP) auf Bearbeitungszentren in Form von MAP-Werkzeugen mit standardisierter Schnittstelle bilden, welche wie Standardwerkzeuge in die Werkzeugmaschine integriert werden können. Die Grundidee einer solchen Integration besteht darin, das automatisierte Polieren nach dem Fräsen auf einem BAZ durchzuführen und somit die Anschaffungskosten der Anlage für eine Finishtechnologie oder manuelle, hochaufwändige Handarbeit zu vermeiden.

In der vorliegenden Arbeit werden fünf Branchen mit hohem Bedarf in der Endbearbeitung sowie zwölf Finishtechnologien mit prozessspezifischen Vor-, Nachteilen und Grenzen näher erläutert. Darüber hinaus wird ein grundlegender, ausführlicher und anwendungsbezogener Forschungsbeitrag zum magnetabrasiven Polieren von Planflächen ferromagnetischer Werkstücke auf Bearbeitungszentren gegeben. Eine innovative Lösung zur Verstärkung der Prozessintensität durch Modifikation der mechanischen Pulververdichtung im Arbeitsspalt wird präsentiert. Außerdem werden der Einfluss der Prozessparameter, MAP-Werkzeugtypen, Prozessmodifikationen, Werkstückeigenschaften und Kenngrößen untersucht und die Erkenntnisse auf das magnetabrasive Polieren von Freiformflächen übertragen sowie mit ausführlichen Versuchsreihen statistisch untermauert.

Durch das magnetabrasive Polieren von gefrästen Planflächen ferromagnetischer Werkstücke konnte eine signifikante Oberflächenverbesserung bis zu $R_a = 0,02 \mu\text{m}$ und $R_z = 0,12 \mu\text{m}$ erreicht werden. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine anwendungsbezogene Grundlage des magnetabrasiven Polierens auf Bearbeitungszentren zu generieren, um somit einen Beitrag zum verstärkten Einsatz dieses Verfahrens in der Industrie zu leisten.

Abstract

The increasing requirements on the surface quality cause high expenditure of time and costs for the final machining of flat and freeform surfaces. Although numerous finishing processes are implemented nowadays industrially, most technologies have low productivity and specific disadvantages of the process, as well as reaching the limits of the achieved surface quality and usually require a separate, expensive machine tool. A competitive alternative could be Magnetic Abrasive Finishing (MAF) on machine tools in the form of MAF-tools with standardized interfaces, like a standard cutting tool, that can be integrated into the machine tool. The main idea of such integration is to carry out the automated polishing after milling on a machine tool, to avoid the acquisition costs of the separate finishing machine or highly extensive manual work.

The thesis contains five industrial areas with a high demand for the final machining as well as twelve finishing technologies with specific advantages, disadvantages and process limits. In addition, a fundamental, detailed and applied research contribution on Magnetic Abrasive Finishing of flat surfaces, ferromagnetic workpieces on machining tools is presented. An innovative solution to increase the process intensity by modifying the mechanical powder compaction in the working gap will be presented. Furthermore, the influence of process parameters, MAF-tool types, process modifications, workpiece properties and output parameters are investigated and the findings are transferred to the Magnetic Abrasive Finishing of freeform surfaces as well as referenced with extensive experimental series.

A significant improvement of the surface roughness to $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ and $R_z = 0.12 \mu\text{m}$ was achieved by Magnetic Abrasive Finishing of milled flat surfaces of ferromagnetic workpieces. The aim of this thesis is to generate an application-related basis of magnetic abrasive finishing on machine tool in order to contribute to the use of this process in industry.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Einsatzgebiete der Finishverfahren	3
2.1.1 Oberflächenqualität	3
2.1.2 Werkzeug- und Formenbau	4
2.1.3 Medizintechnik	5
2.1.4 Antriebstechnik	6
2.1.5 Optik	7
2.1.6 Astronomie	8
2.1.7 Anwendungsgebiete – Zusammenfassung	9
2.2 Finishverfahren	10
2.2.1 Ultrapräzisionsverfahren – UP-Schleifen, UP-Drehen, UP-Fräsen	10
2.2.2 Läppen	13
2.2.3 Gleitschleifen	14
2.2.4 Manuelles Polieren	16
2.2.5 Druckfließläppen	17
2.2.6 Elektrochemisches Polieren – ECM	19
2.2.7 Laserpolieren	21
2.2.8 Materialbearbeitung mit Elektronenstrahl – EBM	23
2.2.9 Magnetorheologisches Polieren – MRF	25
2.2.10 Finishverfahren – Zusammenfassung	27

2.3	Magnetabrasives Polieren – MAP	28
2.3.1	Grundlagen	28
2.3.2	Verfahrenskinematik	31
2.3.3	Prozessvor- und -nachteile.....	33
2.3.4	Magnetabrasives Pulver.....	34
2.3.5	Permanentmagnete.....	36
2.3.6	Stand der Technik – Zusammenfassung.....	38
3	Zielsetzung	39
4	Instrumentarium.....	41
4.1	Versuchswerkstoffe	41
4.2	MAP-Werkzeuge.....	42
4.2.1	Zusammenbau des Werkzeugsystems	42
4.2.2	Paramagnetischer Adapter.....	43
4.2.3	Versuchswerkzeug Typ A: D45 Zylinder	44
4.2.4	Versuchswerkzeug Typ B: D60 IKZ	45
4.2.5	Versuchswerkzeug Typ C: D40 Ring	46
4.2.6	Versuchswerkzeug Typ D: D100 1-Kreis	47
4.2.7	Versuchswerkzeug Typ E: D100 2-Kreise.....	49
4.2.8	Versuchswerkzeug Typ F: D45 US	51
4.2.9	Versuchswerkzeug Typ G: D40 Kugel	52
4.2.10	Deckelstruktur	53
4.3	Versuchsstände	54
4.3.1	Werkzeugmaschine.....	54
4.3.2	Versuchsstand für die Fräs- und MAP-Bearbeitung am BAZ	54
4.3.3	Versuchsstände für die Messung der magnetischen Flussdichte.....	55
4.3.4	Versuchsstand für die Messung der Kraftkomponenten.....	58
4.4	Messtechnik.....	59
4.5	Versuchsplanung	64

5	Einfluss der Prozessparameter	65
5.1	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit	65
5.2	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit	68
5.3	Einfluss des Arbeitsabstandes	70
5.4	Untersuchte magnetabrasive Pulverarten	73
5.5	Magnetische Flussdichte.....	76
5.6	Bearbeitungsstrategie	80
6	Deckelstruktur und Werkzeugtypen	81
6.1	Einfluss der Deckelstruktur.....	81
6.2	Deckelstrukturhöhe	84
6.3	Deckelverschleiß	85
6.4	Einfluss des Deckelwerkstoffes.....	86
6.5	Vergleich der Plan-MAP-Werkzeugtypen.....	88
7	Prozessmodifizierung und Werkstückeigenschaften	91
7.1	Einfluss des Schmierstoffes	91
7.2	Einfluss des Zusatzabrasivmittels	93
7.3	Ultraschallunterstütztes MAP	95
7.4	Einfluss der Ausgangsoberfläche	97
7.5	Bearbeitbarkeit unterschiedlicher Stähle	102
8	Kenngößen	103
8.1	Standzeit des magnetabrasiven Pulvers FerroMAP.....	103
8.2	Abtrag und Abtragsleistung	105
8.3	Zerspankraft.....	107
9	Magnetabrasives Polieren der Freiformflächen.....	110
9.1	Werkstoffauswahl und Versuchsbeschreibung.....	110
9.2	Einfluss des Arbeitsabstandes	112
9.3	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit	113
9.4	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit	114

9.5	Einfluss der radialen Zustellung.....	115
9.6	Deckelstruktur.....	116
9.7	Einfluss der Werkstückhöhe	118
9.8	MAP der Freiformflächen.....	119
10	Praxisrelevante Erkenntnisse.....	122
11	Zusammenfassung und Ausblick	124
12	Literaturverzeichnis.....	125
	Bisher erschienene Bände in der Schriftenreihe des ISF.....	142

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
a_e	radiale Zustellung	mm
a_p	axiale Zustellung / Arbeitsabstand beim MAP	mm
a_{po}	optimaler Arbeitsabstand	mm
B	magnetische Flussdichte	T
B_E	Einwirkbreite	mm
D_A	Aussendurchmesser	mm
D_I	Innendurchmesser	mm
f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
F_H	spezifische Haftkraft	N/Stück
H	Höhe	mm
H_c	Koerzitivfeldstärke	A/cm
H_M	Abstand zum Permanentmagnet	mm
KG	Korngröße	μm
k_A	Korrekturfaktor: optimaler Arbeitsabstand	-
L	Einwirklänge	mm
n	Drehzahl	U/min
PM	Pulvermenge	g
R_a	arithmetischer Mittenrauwert	μm
R_q	quadratischer Mittelwert	μm
R_z	gemittelte Rautiefe	μm
S_a	arithmetischer Mittenrauwert (optische Messung)	μm
S_q	quadratischer Mittelwert (optische Messung)	μm
S_z	gemittelte Rautiefe (optische Messung)	μm

t	Bearbeitungszeit	s
t_e	Einwirkzeit	s
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
z	Zähnezahl	-
ψ	Neigungswinkel zur Bearbeitungsoberfläche	°

Abkürzung**Bedeutung**

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AFM	Abrasive Flow Machining = Druckfließläppen
BAZ	Bearbeitungszentrum
CAM	Computer Aided Manufacturing = rechnerunterstützte Fertigung
CBN	Cubic Boron Nitride = kubisches Bornitrid
CMC	Ceramic Matrix Composites = keramischer Verbundwerkstoff
CNC	Computerized Numerical Control = rechnergestützte numerische Steuerung
DC	Direct Current = Gleichstrom
DOE	Diffraction Optical Element = diffraktives optisches Element
DVD	Digital Versatile Disc = Optischer Datenspeicher
E-ELT	European Extremely Large Telescope = Europas extrem großes Teleskop
EBM	Electron Beam Melting = Elektronenstrahlschmelzen
ECM	Electro Chemical Machining = elektrochemisches Abtragen
EDM	Electrical Discharge Machining = Funkenerodieren

EDX	energy dispersive X-ray spectroscopy = energiedispersive Röntgenspektroskopie
ELID	Electrolytic In Process Dressing = elektrolytisches Abrichten im Prozess
EM	Elektromagnet
FDM	Fused Deposition Modeling = Schmelzschichtung
FTS	Fast Tool Servo
GG	Grauguss
GGG	globularer Grauguss
GTL	Gas-to-Liquids = Gas in Flüssigkeit
HM	Hartmetall
HSC	High Speed Cutting = Hochgeschwindigkeitszerspanen
HSS	High Speed Steel = Schnellarbeitsstahl
IKZ	Innenkühlschmierstoffzufuhr
ISO	International Organization for Standardization = Internationale Organisation für Normung
KF	Fräsen mit dem Kugelfräser
KSS	Kühlschmierstoff
LED	Light Emitting Diode = lichtemittierende Diode
MAP	magnetabrasives Polieren
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems = Mikrosystem
MMC	Metal Matrix Composite = Metallmatrix-Verbundwerkstoff
MRF	Magneto Rheological Finishing = Magnetorheologisches Polieren
Nd:YAG	Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat

PECM	Pulsed Electro Chemical Machining = gepulstes elektrochemisches Abtragen
PEEK	Polyether Ether Ketone
PF	Fräsen mit dem Planfräser
PLA	Polylactic Acid
PMC	Polymer Matrix Composite = Polymermatrix-Verbundwerkstoff
POM	Polyoxymethylene
PVD	Physical Vapor Deposition = physikalische Gasphasenabscheidung
S	Schleifen
SF-A	axiales Fräsen mit dem Schafffräser
SF-T	tangentiales Fräsen mit dem Schafffräser
SLA	Stereo Lithography Apparatus = Stereolithografie
SLM	Selective Laser Melting = selektives Laserschmelzen
SLS	Selective Laser Sintering = selektives Lasersintern
STS	Slow Tool Servo
ULE	Ultra Low Expansion = extrem niedrige Wärmeausdehnung
UP	Ultra Precision = ultra Präzision
US	Ultraschall
US-Dollar	United States Dollar
Yb:YAG	Ytterbium dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
WSP	Wendeschneidplatte

1 Einleitung

Die Anforderungen an die Oberflächenqualität von Bauteilen und dementsprechend an die verwendeten Finishverfahren nehmen explizit in den Branchen Werkzeug-, Formenbau, Medizintechnik, Luftfahrt, Optik und Astronomie zu. Mit der Erhöhung der Formkomplexität von ebenen und rotationssymmetrischen Flächen hin zu asymmetrischen Freiformflächen steigt der Fertigungsaufwand signifikant. Heutzutage werden zahlreiche Fertigungsverfahren zur Finishbearbeitung von Plan- und Freiformflächen industriell eingesetzt, welche auch hinlänglich wissenschaftlich betrachtet wurden. Dazu gehören die Ultrapräzisionsverfahren (UP-Schleifen, UP-Drehen, UP-Fräsen), die abrasiven Verfahren (Läppen, Gleitschleifen, Druckfließläppen, manuelles Polieren, magnetorheologisches Polieren), die Strahlverfahren (Polieren mit Laser- oder Elektronenstrahl), elektrochemisches Polieren und viele andere. Allerdings weisen alle Finishtechnologien Grenzen in der erreichten Oberflächengüte (Makrogeometrie, Topographie und Randzoneneigenschaften) sowie prozessspezifische Nachteile auf. Insbesondere stellt neben der Reproduzierbarkeit die niedrige Produktivität der meisten Finishverfahren die größte Einschränkung in der Anwendung dar. Trotzdem werden solche Technologien, teilweise auch mit manuellen Prozessschritten, weiterhin in der Industrie mangels Alternativen eingesetzt.

Das magnetabrasive Polieren (MAP) gehört zu den Sonderfinishverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide bzw. sehr schwach gebundenem Korn und könnte eine konkurrenzfähige Alternative zu vielen Finishtechnologien bilden. Das MAP findet heutzutage als eine Nischentechnologie z.B. in der Vor- und Nachbehandlung von Zerspanwerkzeugen in der Industrie Verwendung und wurde in den zurückliegenden Jahrzehnten vornehmlich in der ehem. Sowjetunion einer wissenschaftlichen Betrachtung unterzogen sowie breit industriell umgesetzt [Baro86, Olik84, Saku81]. Eine essentielle Frage stellt sich der Autor dieser Arbeit:

Kann das magnetabrasive Polieren unter Nutzung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden für bestimmte Anwendungsfälle einen ausreichend hohen Technologiereifegrad für industrielle Anwendung erlangen?

Die vorliegende Arbeit wird einen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage leisten. In der Literatur sind unterschiedlichste und zahlreiche Verfahrenskinetik zum magnetabrasiven Polieren bekannt. In den meisten Anwendungsfällen wird das

Verfahren auf einer separaten Anlage durchgeführt, was in Bezug auf die Flexibilität und Investitionsrandbedingungen häufig nachteilig wirkt. Einen vielversprechenden und perspektivischen Einsatz in der Industrie stellt die Umsetzung der Technologie auf handelsüblichen Bearbeitungszentrum (BAZ) dar. Hierbei kommt ein MAP-Werkzeug mit standardisierter Schnittstelle zum Einsatz, welches z.B. wie ein Standardwerkzeug in die Werkzeugmaschine integriert werden kann. Die Grundidee einer solchen Integration besteht darin, das automatisierte Polieren nach dem Fräsen auf einem BAZ durchzuführen, die Anschaffungskosten der Anlage für eine Finishtechnologie oder manuelle, hochaufwändige Handarbeit zu vermeiden. Dieses Potential erschließt sich aus der stetigen Weiterentwicklung flexibler Bearbeitungszentren, insbesondere in Bezug auf deren Positionsgenauigkeit sowie der kostengünstigen Massenproduktion von sehr starken Neodymeisenborpermanentmagneten ($\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$) kompakter Größe. Die zukünftige Entwicklung neuer Werkstoffe mit stärkerer Dauermagnetisierung könnte unter anderem weiteres Entwicklungspotential für das magnetabrasive Polieren darstellen. Fundierte wissenschaftliche Untersuchungen zu dieser Thematik sind aktuell nur begrenzt vorhanden. Ein grundlegender, ausführlicher und anwendungsbezogener Forschungsbeitrag ist bis dato nicht vorhanden und soll in dieser Arbeit dargelegt werden. Des Weiteren wird eine innovative Lösung zur Verstärkung der Prozessintensität beim magnetabrasiven Polieren der Planflächen ferromagnetischer Werkstücke durch Modifikation der mechanischen Pulververdichtung im Arbeitsspalt präsentiert.

In der vorliegenden Arbeit werden der Einfluss der Prozessparameter, die Deckelstruktur, unterschiedliche MAP-Werkzeugtypen, Prozessmodifikationen, Werkstückeigenschaften und Kenngrößen beim magnetabrasiven Polieren von Planflächen ferromagnetischer Werkstoffe untersucht und die Erkenntnisse auf das magnetabrasive Polieren von Freiformflächen übertragen sowie mit ausführlichen Versuchsreihen referenziert. Dementsprechend soll diese Arbeit als eine Grundlage für die weitere Untersuchung des magnetabrasiven Polieren auf Bearbeitungszentren dienen.

2 Stand der Technik

2.1 Einsatzgebiete der Finishverfahren

2.1.1 Oberflächenqualität

Die Oberflächenqualität des Werkstückes wird durch die Makrogeometrie, Topographie und Oberflächenintegrität beschrieben (Bild 2.1). Zu der Makrogeometrie gehören die Formgenauigkeit (Ebenheit, Parallelität usw.) und die Welligkeit. Die Topographie wird durch 2D-Rauheitsparameter (z.B. arithmetischer Mittelwert R_a , quadratischer Mittelwert R_q , gemittelte Rautiefe R_z) und 3D-Rauheitsparameter (z.B. S_a , S_q und S_z) sowie Mikrostruktur beschrieben. Unter Oberflächenintegrität werden die Defektschicht (Dicke der Oberflächenbeschädigungen), Gefügeveränderungen z.B. in der Wärmeeinflusszone und oberflächennahe Eigenspannungen zusammengefasst.

Oberflächenqualität		
Makrogeometrie	Topographie	Oberflächenintegrität
Formgenauigkeit Welligkeit	2D-Rauheitsparameter 3D-Rauheitsparameter Mikrostruktur	Eigenspannungen Wärmeeinflusszone Defektschicht

Bild 2.1: Kenngrößen zur Definition der Oberflächenqualität [Hash16a]

Die Oberflächenqualität beeinflusst folglich signifikant die Funktionseigenschaften des Bauteiles und hat Auswirkungen auf z.B. Lebensdauer, Reibung, Verschleiß, Wärmeentwicklung, Leistungsdichte, Vibrationen, Geräuschentwicklung, Schmierzustände, Korrosionsbeständigkeit und optische Eigenschaften. Beispielweise übt die Welligkeit einen signifikanten Einfluss auf die Geräuschentwicklung von Zahnräder aus. Die Topographie beeinflusst maßgeblich alle genannten Funktionseigenschaften. Auf die Schmierung, Korrosionsbeständigkeit und optische Eigenschaften wirkt ausschließlich die Topographie. Die Oberflächenintegrität spielt eine große Rolle auf die Lebensdauer z.B. in Form der Rissanfälligkeit [Hash16a].

In der Abhängigkeit vom Einsatzfall werden unterschiedliche Funktionalitäten und entsprechend Oberflächeneigenschaften der Werkstücke gefordert. In den nächsten Kapiteln werden typische Bauteile, Werkstoffe und Anforderungen für einzelne Branchen erläutert.

2.1.2 Werkzeug- und Formenbau

Dem Werkzeug- und Formenbau kommt in aktuellen Fertigungsketten, speziell in Großserien, eine hohe Bedeutung zu, da die meisten Komponenten in der Massenproduktion durch Spritzgießen oder Pressen gefertigt werden [Alta01]. Exemplarisch betrug der globale Umsatz für Spritzgießwerkzeuge im Jahr 2019 ca. 16,4 Mrd. US-Dollar mit einer prognostizierten Steigerung auf 19,5 Mrd. US-Dollar im Jahr 2025 [N.N.20a]. Formwerkzeuge stellen aufgrund der geometrischen Komplexität und qualitativ hochwertigen Oberflächen hohe Investitionsgüter dar. Typischerweise werden hohe Entwicklungszeiten und langwierige Einfahrprozeduren sowie ein hoher Kostenaufwand von mehreren 100.000 Euro benötigt [N.N.21a]. Die Formen werden vielfach durch HSC-Fräsen hergestellt. Zudem kommen weitere Fertigungsverfahren, wie EDM zum Einsatz, welche jedoch in ihrer Produktivität eingeschränkt sind [Klin18].

Im Werkzeug- und Formenbau werden hauptsächlich legierte Stähle, Grauguss und Hartmetall eingesetzt: 1.2379, 1.3344, HM K40 für Stanzwerkzeuge, 1.2311, 1.2343 für Spritzgießformen und GG25, GGG70 für Tiefziehwerkzeuge. Bei Stählen wird die Oberfläche nach dem Schrumpfen gehärtet und danach geschlichtet sowie poliert, um eine entsprechend lange Standzeit sicherzustellen. Die Oberflächenqualität (Rauheit, Topographie, Eigenspannungen und die Mikrohärtigkeit) beeinflussen sehr stark nicht nur die Standzeit der Spritzgießformen, sondern primär den Fertigungsprozess, in Bezug auf die ausgebrachte Qualität [Alta01]. Die finale Oberflächengüte von Spritzgießwerkzeugen, z.B. zur Erzeugung einer ausreichend hohen Transparenz von Kunststoffflaschen, kann nur durch aufwendige Polierverfahren erzeugt werden. Durch das Polieren können hochglänzende Oberflächen von $R_a = 0,01 - 0,03 \mu\text{m}$ generiert werden [Gran15, Rose19]. Ein weiterer anspruchsvoller Anwendungsfall stellt das Spritzgießen der optischen Linsen für kleine Handykameras dar [Alta01].

Bis heute wurde kein automatisiertes Polierverfahren für den Formenbau durchgesetzt, deswegen bleibt das manuelle Polieren häufig der einzige Weg, hohe Oberflächengüte bei komplexen und großen Freiformflächen zu gewährleisten. Für manuelles Polieren werden die Fachkräfte mit langjähriger Erfahrung benötigt, was bis zu 30% des Kosten- und 50% des Zeitaufwandes für die Bearbeitung einnimmt [Rose19, Wang19]. Aus diesen Gründen besteht ein großer Bedarf zur Reduzierung der Fertigungszeit von Formen insbesondere beim Finishen sowie zur Entwicklung einer Technologie zum automatisierten, kosteneffizienten Polieren [Alta01, Rose19].

2.1.3 Medizintechnik

Aufgrund der qualitativen Anforderungen an medizinische Bauteile kommt der Finishbearbeitung z.B. in der Herstellung von Hüftgelenk-, Knieimplantaten oder medizinischen Werkzeugen eine hohe Bedeutung zu [Mits13]. Der Umsatz an medizinischen Implantaten wird voraussichtlich von 3,5 Mrd. US-Dollar in 2015 auf ca. 3,7 Mrd. US-Dollar in 2022 in Europa steigen [N.N.20b].

Die medizinischen Implantate und Werkzeuge werden hauptsächlich aus bioaktiven und korrosionsfreien Metallen und Keramiken gefertigt. Metalle werden sowohl für Hüftgelenk- und Knieimplantate als auch für Fixierungen von Knochen in Form von Stiften, Platten und Schrauben eingesetzt. Zu den am häufigsten verwendeten metallischen Werkstoffen gehören reines Titan und Ti-Legierungen, Kobaltchrom-, Nickeltitanlegierungen und rostfreie Stähle (meistens 1.4404). Im Bereich der keramischen Werkstoffen werden häufig metallische Oxide, wie Al_2O_3 , MgO , ZiO , Glaskeramiken, Calcium-, Tricalcium- und Oktacalciumphosphate verwendet [Bart12]. Wegen niedriger Reibungskoeffizienten, hoher Verschleißbeständigkeit, guter Biokompatibilität und Benetzungsfähigkeit werden Aluminium- und Zirkoniumoxide bei Hüftgelenk- und Knieimplantaten verwendet [Axi19].

Für die Herstellung von Implantaten komplexer Form kommt die additive Fertigung, wie SLM, SLS oder EBM zum Einsatz [Bart12]. Im Anschluss werden die Halbzeuge 5-Achs gefräst bzw. geschliffen. Als Finishtechnologien kommen elektrochemisches Polieren, Gleitschleifen, manuelles Polieren oder magnetorheologisches Polieren zum Einsatz. Implantate aus Keramik werden primär durch Schleifen hergestellt [Mits13].

Eine geringe Oberflächenrauheit bei Implantaten wirkt sich positiv auf das Adhäsionsverhalten, Gewebswucherungen, die Lebensfähigkeit der Zellen und auf die Verschleißbeständigkeit sowie das tribologische Verhalten aus [Bart12]. Bei Kobaltchromlegierungen wird eine Oberflächenqualität von $R_a < 0,02 \mu\text{m}$ gefordert. Druckeigenspannungen erhöhen dabei die Lebensdauer von Implantaten, welche einer zyklischen Belastung unterliegen und reduzieren demnach die Ausfallwahrscheinlichkeit und somit Revisionsoperationen [Axi19].

Nach wie vor besteht ein großer Bedarf in der Reduzierung von Fertigungskosten und zur Erhöhung der Sicherheit, Qualität und Effizienz medizintechnischer Produkte [Mits13]. Ein besonderes Anwendungsfeld stellt dabei die Finishbearbeitung komplexer Knie- und Hüftgelenkimplantaten aus Kobaltchrom dar [Axi19].

2.1.4 Antriebstechnik

Zu den typischen Produktvertretern der Antriebstechnik gehören Gasturbinen für Flugzeuge, Dampfturbinen für Energieumwandlung und Turbolader für Kraftfahrzeuge. Der Markt wächst: Rolls-Royce erwartet ca. 68.000 Flugzeugantriebe im Zeitraum zwischen 2012 und 2031 [Kloc14]. Aktuell wird eine Steigerung des Gesamtmarktumsatzes von 1,2 Mrd. US-Dollar im Jahr 2021 auf 1,5 Mrd. US-Dollar in 2026 prognostiziert [N.N.21b]. Die eingesetzten Werkstoffe sind durch hohe Temperaturbeständigkeit, spezifische Festigkeit und Verschleißbeständigkeit gekennzeichnet. Dazu gehören folgende schwer zerspanbare Materialien: hochlegierte korrosionsbeständige Stähle, Titanaluminide, Titan- und Nickelbasissuperlegierungen entsprechend dem heutigen Stand der Technik, sowie PMC, MMC und CMC bzw. Polymer-, Metall- und Keramikverbundwerkstoffe, welche sich aktuell in Entwicklung befinden [Kloc14, Kloc15]. In der Antriebstechnik im Luftfahrtbereich haben Nickellegierungen den größten Einsatzanteil (40-50%), gefolgt von Titanlegierungen mit ca. 30% Anteil. Verbundwerkstoffe weisen ein hohes Potenzial auf und können zur Gewichtsreduktion von bis zu 40% beitragen [Kloc15].

Die Herstellung der Antriebskomponenten aus hochwarmfesten Werkstoffen wird durch einen hohen Zeit- und Kostenaufwand gekennzeichnet. Für die Vorbearbeitung werden das klassische 5-Achssimultanfräsen, EDM oder ECM eingesetzt. Beim Finishen kommen unterschiedliche Technologien wie PECM, Gleitschleifen, Sandstrahlen oder Druckfließläppen (AFM) zum Einsatz [Kloc14]. Unterschiedlichste Schleifenoperationen werden häufig in der Industrie sowohl zum Schruppen als auch zum Schlichten verwendet [Kloc15].

Die Anforderungen an die Bauteiloberflächen in der Antriebstechnik sind durch Maßtoleranzen unter 10 μm und Ra unter 0,5 μm gekennzeichnet [Kloc15]. Allgemein erhöhen Druckeigenstressungen und beschädigungsfreie Oberfläche die Leistungsfähigkeit der Bauteile. Die sog. „Weiße Schicht“, welche häufig durch die thermische Wirkung von Schleifprozessen erzeugt wird, reduziert die Dauerfestigkeit bis zu 90% und stellt demnach ein kritisches Qualitätsmerkmal dar [Saou15]. Mit dem Marktwachstum steigen auch die Anforderungen an die Antriebe. Bis 2050 soll in der Luftfahrt 75% der CO₂-, 90% der NO_x-Emissionen und 65% der Lärmbelastung reduziert werden. Aus diesen Gründen besteht ein großer Bedarf an neuen wirtschaftlichen Technologien der Endbearbeitung [Kloc14, Saou15].

2.1.5 Optik

Optische Komponenten wie Linsen und Spiegel werden z.B. in Kameras, Smartphones und Teleskopen für die Erzeugung von Bildern als auch für die Energieumwandlung von Sonnenstrahlung in Elektrizität durch Strahlbündelung oder Fokussierung des LED-Strahls an Projektoren und Autoscheinwerfern eingesetzt. Außerdem werden optische Elemente für hochdynamische Laserstrahlmaschinen verwendet [Fang13]. Der Markt für Kameralinsen wies im Jahr 2019 z.B. ein Volumen von 3.4 Mrd. US-Dollar auf. Im gleichen Jahr betrug der Umsatz bei sekundären LED-Optiken (Reflektoren, Linsen) ca. 0,7 Mrd. US-Dollar. Die Steigerung der beiden Märkte wird für das Jahr 2025 entsprechend auf 8,3 und 2,4 Mrd. US-Dollar prognostiziert [N.N.20c, N.N.20d].

Die finale Qualität optischer Elemente aus Glas oder Kunststoff wird entweder durch Ultrapräzisionsverfahren oder Polieren sichergestellt. Das UP-Schleifen wird vorzugsweise für die Bearbeitung spröder Werkstoffe mit hoher Härte wie z.B. Glas, Silizium und Stahl eingesetzt. Durch UP-Fräsen kann eine funktionelle Mikrostrukturierung erzeugt werden. Weiterhin werden optische Elemente durch das UP-Drehen hergestellt [Fang13]. Für die Massenfertigung von optischen Linsen für z.B. Handys, digitale Kameras, DVD- und Blue-Ray-Player oder Hochleistungsdioden wird das Heißprägen oder heißisostatische Pressen bei hohen Temperaturen von 400-800°C und hohem Druck bis zu 25 kN eingesetzt. Dafür werden hochpräzise und beschädigungsfreie Formen aus hochharten, warmfesten und korrosionsbeständigen Werkstoffen wie Wolframkarbid, Siliziumkarbid oder Siliziumnitrid benötigt [Brin10].

Die Entwicklung von optischen Elementen geht von flachen und asymmetrischen Flächen bis hin zu komplexen Freiformgeometrien, welche viele Vorteile liefern, wie z.B. Minimierung von Streulicht, höhere Flexibilität und geringere Abmessungen in der Konstruktion. Darüber hinaus kann eine freigeformte Linse mehrere flache Linsen ersetzen und spezifische Aufgaben wie Ultrabreitbilder erfüllen [Fang13]. Dabei sind die Anforderungen sehr hoch und gekennzeichnet durch eine hohe Oberflächengüte (R_a und R_q bis $0,001 \mu\text{m}$), Formgenauigkeit im nm-Bereich, hohe Transparenz, keine Oberflächenbeschädigungen, hoher Index der Refraktion und Isotropie [Brin10, Owen17]. Ein stark wachsendes Anwendungsfeld bildet aktuell die „New Space“-Branche, welche einen hohen Bedarf an kostengünstigen, kompakten und komplex geformten optischen Komponenten aufweist.

2.1.6 Astronomie

Großflächige Hochganzoberflächen spielen in der Astronomie eine große Rolle. Für Teleskope und Spektrometer werden optische Bestandteile wie Glaslinsen und Spiegel sehr großer Dimension für die Lichtreflektion benötigt. Als Werkstoff wurde früher Borsilikat mit geringem Wärmeausdehnungskoeffizient verwendet. Heutzutage kommen spezielle Werkstoffe wie Titansilikat (ULE[®] Ultra Low Expansion der Fa. Corning GmbH) oder Glaskeramiken (Zerodur[®] der Fa. Schott AG) mit sehr geringer Wärmeausdehnung zum Einsatz.

Die Leistungsfähigkeit eines Teleskops hängt hauptsächlich von zwei Faktoren ab, der Oberflächengüte und der Fläche der Detektoren. Durch moderne Fertigungsverfahren kann das Reflektionsvermögen von technischen Oberflächen fast vollständig ausgeschöpft werden, daher wurden in den letzten Dekaden ständig größere Spiegel, von 1 bis zu 10 m in Durchmesser, für Teleskope entwickelt. Die Anforderungen an die Oberflächengüte sind extrem hoch. Die max. Formabweichung beträgt ca. 0,01 μm , Ra unter 0,001 μm , Rq bis 0,001 μm bezogen auf Oberflächen mit einer Länge von mehreren Metern.

Ab 10 m Spiegeldurchmesser beträgt das Gewicht der Bauteile mehr als 10 t, was die Fertigung, Messung und das Handling an die Grenzen des technisch Möglichen bringt. Aus diesem Grund werden die Spiegel moderner Teleskope modular konzipiert [Brin10, Shor10]. Für das größte Teleskop E-ELT (European Extremely Large Telescope) werden ca. 800 sechseckige asymmetrische Spiegelemente vom Durchmesser 1,45 m benötigt, die gemeinsam einen Hauptspiegel mit 39 m Durchmesser bilden. Die Fertigung gestaltet sich demnach sehr aufwendig (über 1,1 Mrd. Euro, über 10 Jahre Bauzeit) [N.N.20e].

Für die Fertigung der Spiegel wird heutzutage das Ultrapräzisionsschleifen, mit anschließendem automatisierten Planpolieren und einer Ionenstrahlbearbeitung eingesetzt. Die erreichte Formgenauigkeit liegt entsprechend bei 1 μm , 0,01 μm und 0,001 μm für die oben genannten Verfahren. Die Herstellung einzelner Spiegel benötigt extrem viel Zeit, was für zukünftige, in der Dimension steigende Teleskope zunehmend kritischer wird. Daher besteht auch in dieser Branche ein großer Bedarf für Entwicklungen neuer Verfahren [Brin10, Shor10].

2.1.7 Anwendungsgebiete – Zusammenfassung

Die Literaturrecherche aus den Kapiteln 2.1.2 bis 2.1.6 wird in einem Diagramm zusammengefasst, wobei die Anwendungsgebiete polierter Oberflächen nach Werkstückgröße und den entsprechenden Anforderungen an die Oberflächengüte zugeordnet werden (Bild 2.2). Die anspruchsvollsten Bauteilanforderungen werden in der Astronomie abgebildet, da hier die bestmögliche, beschädigungsfreie Oberfläche in großdimensionalen Werkstücken erzeugt werden muss. In der Optik werden sehr ähnliche Anforderungen an die Oberflächenqualität gestellt. Allerdings sind die Bauteildimensionen deutlich geringer, was den sehr hohen Fertigungsaufwand reduziert. Eine vergleichsweise niedrigere Oberflächengüte wird in der Medizintechnik und im Werkzeug- und Formenbau benötigt. Einerseits werden in der Medizintechnik schwer zerspanbare Ti-, Ni- und CoCr-Legierungen eingesetzt und ein großes Augenmerk auf die Biokompatibilität gelegt. Auf der anderen Seite werden großdimensionale Bauteile im Werkzeug- und Formenbau eingesetzt. Daher wird der Fertigungsaufwand in beiden Industriezweigen als hoch eingeordnet. Obwohl die niedrigsten Anforderungen an die Oberflächenqualität in der Antriebstechnik im Vergleich zu anderen Industriezweigen gestellt werden, treiben große Bauteildimensionen, sehr hohe Zuverlässigkeit der Komponente und die Bearbeitung von hochwarmfesten Ni-, Ti-Superlegierungen sowie Verbundwerkstoffen den Fertigungsaufwand relativ hoch.

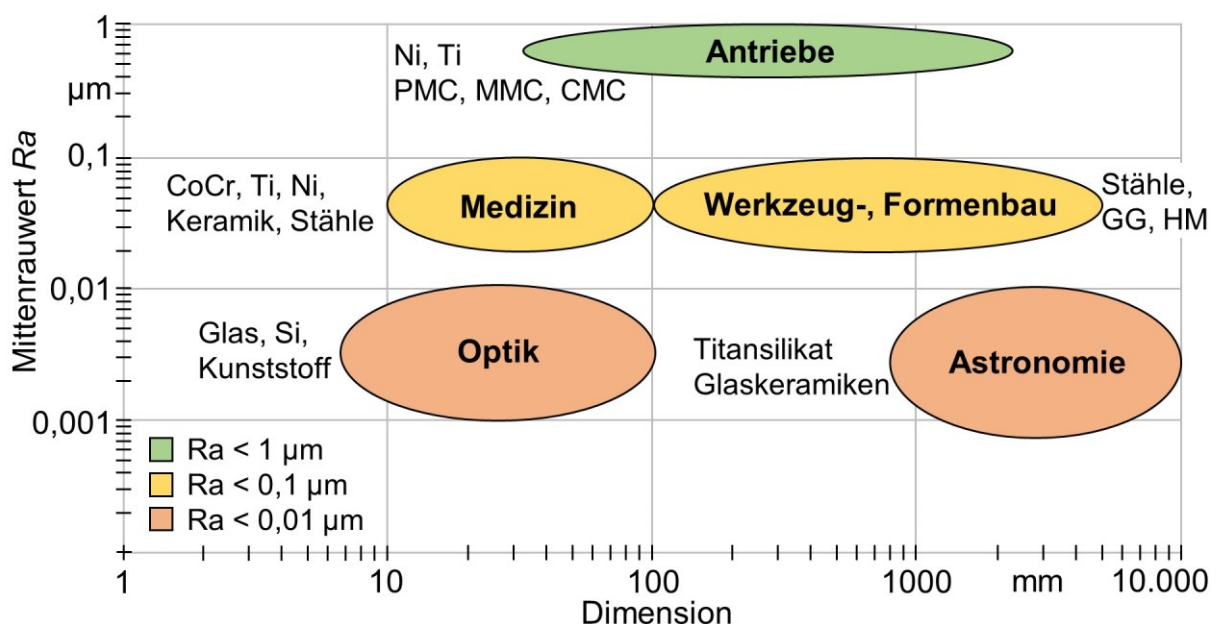


Bild 2.2: Zuordnung der Anwendungsgebiete polierter Oberflächen nach Dimension und Mittenrauwert

2.2 Finishverfahren

2.2.1 Ultrapräzisionsverfahren – UP-Schleifen, UP-Drehen, UP-Fräsen

Das **Ultrapräzisionsschleifen** unterscheidet sich vom konventionellen Schleifprozess durch viel geringere Prozessparameter (Tabelle 2.1). Als Schneidstoff werden ausschließlich spezielle Typen von Diamant und CBN eingesetzt. Die Abrasivkörner werden in einer Metall-, Kunstharz- (Polyester-, Polyethan-), Gummi- oder Keramikbindung gebunden. Beim UP-Schleifen werden ausschließlich wasserbasierte KSS verwendet, da diese eine bessere Oberflächengüte als Öl gewährleisten. Der Abtragsmechanismus des UP-Schleifens besteht aus der Mikro-Zerspannung und im größten Teil aus plastischem Verformen des Werkstoffes. Obwohl sehr niedrige Rauheitswerte erreicht werden, treten geringe Oberflächenbeschädigungen wegen hoher Schnittgeschwindigkeit im Vergleich zu anderen abrasiven Finishverfahren immer auf. Deswegen wird ein weiterer Fertigungsschritt wie z.B. klassisches Polieren oder magnetorheologisches Polieren im Nachgang notwendig, um die höchsten Anforderungen zur Oberfläche (wie bei den optischen Linsen) zu erreichen [Brin10, Fang13].

Tabelle 2.1: Prozessparameter beim UP-Schleifen [Brin10, Kaki19, Suet18, Xing18]

Prozessparameter	UP-Schleifen	UP-Drehen
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	bis zu 2400	30 – 90
Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	0,5 – 7	0,5 – 4
Schnitttiefe [μm]	0,5 – 5	2 – 5
Schleifscheibendurchmesser [mm]	50 – 400	–
Korngröße [μm]	0,125 – 200	–

Das Entwicklungsziel des UP-Schleifens besteht in der Reduzierung oder Vermeidung des Polieraufwandes [Brin10, Fang13]. Beispielweise konnte der Einsatz einer Suspension aus Wasser und 5% Abrasivpartikel bestehend aus Lanthan (La) und Ceroxid (CeO_2) anstelle von Emulsion bei der Bearbeitung des Glaswerkstoffes BK7 die Produktivität bei gleicher Oberflächenqualität ($R_a \leq 0,01 \mu\text{m}$) durch eine Erhöhung des Vorschubes verfünffachen (von $f = 1 \text{ mm/min}$ auf $f = 5 \text{ mm/min}$) und Oberflächenbeschädigungen vermeiden [Kaki19].

Vorteile des Verfahrens: UP-Schleifen ermöglicht die Herstellung von Bauteilen mit einer Oberflächenrauheit bis zu $R_a = 0,001 \mu\text{m}$ und einer Formgenauigkeit bis $0,5 \mu\text{m}$ [Brin10]. Außerdem können durch das Verfahren Druckeigenstressungen durch

plastisches Verformen in der Randzone eingebracht und die Härte des Werkstücks im oberflächennahen Bereich bis in eine Tiefe von ca. 1 μm erhöht werden [Kloc18a].

Nachteile des Verfahrens: Das Verfahren stellt sehr hohe Anforderungen an das Schleifwerkzeug wie z.B. hohe bzw. prognostizierte Verschleißbeständigkeit, genaue Abmessungen, niedriger Rundlauffehler, hohe statische und dynamische Steifigkeit und an die Schleifmaschine wie z.B. sehr geringe Spindelunwucht, Synchronfehler bei 0,025 – 0,05 μm , Asynchronfehler bei 0,005 – 0,01 μm , hochpräzise Verfahrengenauigkeit der Führungsachsen insbesondere bei langzeitigem Betrieb. Dafür wird die Schleifscheibe zuerst durch ein EDM-Verfahren mit Draht, Block oder mit einer Scheibe makrokonditioniert und im Anschluss optional im Prozess durch ein ECM-Verfahren kontinuierlich mikrokonditioniert. Dieses Verfahren wird als ELID-Schleifen bezeichnet und benötigt spezielle KSS als Elektrolyt, einen zusätzlichen Stromgenerator und optional eine separate Elektrode. Diese Anforderungen steigern die Investitionskosten der Ultrapräzisionsschleifmaschine drastisch. Die Fertigung von asymmetrischen Freiformflächen wird nur zum Teil durch einen Punktkontakt möglich, da die Kinematik und der große Scheibendurchmesser hier die Restriktion darstellen und zudem die Produktivität des Verfahrens senken [Brin10].

Das **Ultrapräzisionsdrehen** von nicht rotationssymmetrischen Teilen unterscheidet sich vom konventionellen Drehen durch eine Oszillation der Z-Achse, hochpräzisen Linearmotoren, den Einsatz einer Diamantschneide und einer komplexeren Steuerung für die Achsensynchronisierung sowie Werkzeugradiuskompensation. Beim UP-Drehen werden zwei Verfahrensvarianten wie slow tool servo (STS) und fast tool servo (FTS) unterschieden. STS wird als „slow“ gekennzeichnet, da die komplette und schwere Z-Achse oszilliert wird, was das Beschleunigungsvermögen stark begrenzt und die Produktivität des Verfahrens einschränkt. Dieses Verfahren ermöglicht die effiziente Fertigung von asymmetrischen Spiegeloberflächen und mikrostrukturierten Oberflächen. FTS wird als „fast“ wegen der sehr hohen Frequenz (2 – 20 kHz) und einer geringen Amplitude (0,35 – 800 μm) der Oszillation bezeichnet. Dabei kommen hochdynamische und präzise Aktoren zur Bewegung ausschließlich des Werkzeuges zum Einsatz, wie Schwingspulenmotoren, maxwellelektromagnetische Motoren, Servomotoren und magnetostriktive Motoren. Die Steuerung solcher Aktoren wird auf die originale Steuerung der Z-Achse einer UP-Drehmaschine gekoppelt, was bei der überlagerten Bewegung unter anderem leistungsfähige Rechentechnik nötig macht. FTS wird für die Mikrostrukturierung von Oberflächen wie Mikroprismen,

Linsenanordnungen, torischen und asymmetrischen Linsen geringer Vertiefung (bis hunderte μm) eingesetzt [Fang13, Gong19].

Für das klassische **Ultrapräzisionsfräsen** werden eine Hochgeschwindigkeitsspindel und mindestens drei Achsen wie beim konventionellen Fräsen benötigt. Die Bewegung erfolgt durch das Werkstück oder Werkzeug üblicherweise in einer Rasterbahn. Als Werkzeug wird ein einschneidiger Diamantfräser verwendet. Häufig wird eine UP-Drehmaschine für das UP-Fräsen eingesetzt und nur leicht modifiziert. Dabei wird das Werkzeug mit dem Werkstück getauscht, sodass das Werkzeug in der Spindel eingespannt wird und das Bauteil durch die X- und Z-Achse der Drehmaschine verfahren wird. Die optionale Rotationsachse (B) wird bei der Bearbeitung von Freiformflächen eingesetzt. Eine derartige Kinematik des UP-Fräsens heißt fly-cutting und wird hauptsächlich eingesetzt, um Mikrorillen bzw. -nuten herzustellen. Diese Strukturen werden häufig bei der passiven Beleuchtung wie z.B. in Verkehrsampeln benötigt. Allgemein wird das UP-Fräsen zur Mikrostrukturierung von optischen Elementen in Bild- und Lichtsystemen sowie zur Herstellung kontinuierlicher, z.B. parabolischer, Oberflächen eingesetzt, wenn die Anforderungen an den Freiwinkel des Werkzeuges durch andere Verfahren nicht gewährleistet werden können [Fang13].

Vorteile: Durch das UP-Drehen und UP-Fräsen werden sehr hohe Oberflächengüten mit $R_a = 0,005 \mu\text{m}$ und hohe Formgenauigkeiten von bis zu $0,1 \mu\text{m}$ sowie gezielte Mikrostrukturierungen erzeugt [Buhm20, Fang13, Schö20, ZhaX18]. Dabei wird durch STS die höchste Oberflächenqualität erreicht. Darüber hinaus wird eine azimutale Höhenvariation über 25 mm ermöglicht, was eine große Herausforderung bei Freiformflächen darstellt.

Nachteile: Das UP-Fräsen zeichnet sich durch eine vergleichsweise niedrige Produktivität und besonders hohe Anfälligkeit für äußere Beeinträchtigungen, wie z.B. umgebungsbedingte Temperaturschwankungen, aus. Ein großer Nachteil dieses Verfahrens besteht wie beim konventionellen Fräsen in der Gratbildung. Das UP-Drehen (STS) wird durch die niedrigste Produktivität aller UP-Verfahren gekennzeichnet. Die Fertigung von freiformflächigen Prismen mit hoher Positionsgenauigkeit zwischen unterschiedlichen Freiformflächen stellt sich als anspruchsvoll dar [Fang13]. Der Einsatz ausschließlich von Diamantwerkzeugen gewährleistet nur die Bearbeitung der Buntmetalle, da bei den Stahlsorten intensiver Verschleiß stattfindet [Schö20].

2.2.2 Läppen

Das Läppen wird mit losem Korn in einer Flüssigkeit oder Paste im Mischungsverhältnis 1:10 bis 1:2 durchgeführt [N.N.20f]. Als Schneidstoff werden sowohl hochharte Werkstoffe, wie Diamant oder CBN als auch konventionelle Werkstoffe, wie Korund und Siliziumkarbid im Korngrößenbereich von 1 bis 250 μm eingesetzt [N.N.20g]. Die Schneidstoffe bewegen sich frei in einer Flüssigkeit wie Öl, Paraffin, Vaseline oder Petroleum. Das Lappmittel wird kontinuierlich dem Prozess in einer Dosierung von 1 bis 10 l/h zugeführt. Die Bauteile werden zwischen Abrichtring und Läppscheibe bearbeitet. Sowohl die Läppscheibe als auch der Abrichtring mit den Bauteilen werden analog zur Kinematik eines Planetengetriebes gegeneinander gedreht. Die summierte Schnittgeschwindigkeit beträgt 50 bis 500 m/min und ist durch die Fliehkraft begrenzt. Das Lappmittel wird entweder durch die Schwerkraft der Bauteile oder für kleinere Werkstücke zusätzlich durch die Belastungsplatte oder pneumatische Antriebe in die Läppscheibe gedrückt. Die Lappscheibenebenheit übt einen hohen Einfluss auf die Formgenauigkeit des Bauteiles aus und besteht abhängig vom notwendigen Härtegrad aus Gusswerkstoffen, gehärtetem Stahl, Keramik, Kupfer, Kunststoff oder Filz. Die Abrichtringe gewährleisten die hohe Formgenauigkeit der Läppscheibe, gleichmäßige Verteilung des Lappmittels und der Wärmeabfuhr.

Beim Planparallellappen werden die Werkstücke gleichzeitig von zwei Seiten bearbeitet. Dabei werden zwei Lappscheiben verwendet, was zur Steigerung der Maschinenkosten aber auch zur Erzeugung sehr enger Toleranzen beiträgt. Neben dem Planlappen existieren Auenrund-, Innenrund-, Schraub-, Wälz- und Profillappen. Durch das Läppen werden ebene, zylindrische und rotationssymmetrische Flächen bearbeitet. Komplexe Freiformflächen lassen sich durch das Läppen aus kinematischen Gründen nicht bearbeiten. Typischer Einsatz für das Läppen ist die Bearbeitung von Stanzteilen, Parallelendmaen, Teilen für Messgeräte, Dichtungs-, Kolben- und Kupplungsringen, Bohrungen von Buchsen und Hülsen [Boge14, Evan03, Frit18, Kloc18b]. Bei der Bearbeitung von zylindrischen Laufrollen aus Stahl 1.3505 wurden die Einflussfaktoren auf die erzeugte Oberflachengute entsprechend der Signifikanz bewertet: Einpressdruck, Konzentration der Abrasivkörner im Lappmittel und Schnittgeschwindigkeit [Su18]. Die Prozesstemperatur wirkt sich auf die Schichtdicke der beschädigten Randzone aus und konnte z.B. auf 20% bei der Bearbeitung von Germanium bei einer Temperaturreduzierung von 40°C auf -10°C reduziert werden [Suya18].

Vorteile des Verfahrens: Das Läppen ermöglicht die Erzeugung sehr hoher Oberflächengüte (bis $R_z = 0,05 \mu\text{m}$ [N.N.20g]) und sehr enger Formtoleranzen (Ebenheit bis $0,1 \mu\text{m}$, Parallelität bis $0,5 \mu\text{m}$ [Pauc08]). Ähnlich wie beim Honen werden die Spitzen im letzten Schritt durch sehr kleine Körner abgetragen, was zu einem erhöhten Traganteil der Oberfläche führt. Durch den Druck der Partikel auf die Oberfläche wird die Randzone in einer Tiefe von $4 - 24 \mu\text{m}$ verfestigt [Frit18]. Trotzdem wird eine beschädigungs- und spanungsfreie Oberfläche ohne gerichtete Bearbeitungsspuren bei sehr niedriger Prozesstemperatur erzeugt. Dadurch, dass die Bauteile nicht eingespannt werden müssen, ermöglicht das Läppen die Bearbeitung dünner Werkstücke auch unter $0,1 \text{ mm}$ Dicke [N.N.20h, N.N.20i, N.N.20j].

Nachteile des Verfahrens: Das Läppen zeichnet sich durch hohe Abnutzung bzw. Zersplitterung der Körner in Folge der wirkenden Reibkraft aus. Um eine kontinuierliche und gleichmäßige Bearbeitung durchzuführen und einen hohen Kornverbrauch auszugleichen, werden neue Körner kontinuierlich dem Prozess zugeführt. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Oberfläche durch starke Reibung mit abrasiven Körnern verschmutzt wird. Dabei entsteht ein fester Schlamm, der durch gründliches Reinigen entfernt und als Sondermüll entsorgt werden muss. Außerdem lassen sich Freiformflächen durch das Läppen nicht bearbeiten [Böge14, Kloc18b, Pauc08, N.N.20f].

2.2.3 Gleitschleifen

Das Gleitschleifen ist ähnlich wie Läppen durch die Bearbeitung mit losem Korn aber ohne feste Kornführung gekennzeichnet. Die Schleifpartikel (Chips) bewegen sich relativ zum Werkstück durch die Schwer-, Fliehkraft oder äußere Anregung in einem Arbeitsbehälter mit einem wasserlöslichen chemischen Mittel (Compound). Compoundflüssigkeit sorgt für die Verbesserung des Abtragsverhaltens, den Korrosionsschutz des Werkstückes und soll eine einfache Reinigung des Bauteiles gewährleisten. Als Schneidstoff werden gebrochene Natursteine und synthetische Schleifkörner unterschiedlicher Form (Kugeln, Zylinder, Pyramiden usw.) in keramischer, metallischer oder organischer Bindung und Größenordnung von $0,2$ bis 15 mm eingesetzt [Frit18, Kloc18b, N.N.20k]. Der Mischungsquotient beschreibt das Verhältnis zwischen Chips- und Werkstückvolumen und übt somit einen großen Einfluss auf das Zeitspannvolumen und die erzeugte Oberflächengüte aus. Der Quotient

nimmt abhängig vom Einsatzfall Größenordnungen von 3:1 bis 10:1 an [Frit18, Kloc18b]. Der Abtragsmechanismus wird primär durch plastisches Verformen bestimmt. Nur 1 bis 5 % der spezifischen Energie werden dabei für die Mikrozerspanung verwendet [Hash16b].

Folgende Gleitschleifverfahren werden abhängig von der Kinematik unterschieden: Trommel-, Vibrations-, Fliehkraft- und Schleppscheifen. Am häufigsten wird dabei das Vibrationsschleifen aufgrund niedriger Anlagenkosten und der Integrationsfähigkeit in automatisierte Fertigungsstraßen eingesetzt. Eine zunehmende Bedeutung erfuhr das Schleppscheifen in den letzten Jahren durch das Erreichen hoher Oberflächengüten [Frit18, Hash15, Kloc18b, Malk20]. Typische Prozessparameter für einzelne Verfahren sind in der Tabelle 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.2: Prozessparameter beim Gleitschleifen [Malk20, Uhl14, Uhl18a]

Parameter	Vibrationsschleifen	Schleppscheifen
Frequenz	15 – 50 Hz	–
Rotationsgeschwindigkeit	–	30 – 60 m/min
Prozesszeit	30 – 300 min	
Partikelgröße	0,2 – 15 mm	

Vorteile des Verfahrens: Das Gleitschleifen ist durch das Erreichen hoher Oberflächengüte (bis $R_a = 0,01 \mu\text{m}$), die Bearbeitung komplexer Werkstückformen ohne Bauteileinspannung (außer Schleppscheifen), niedrige Investitionskosten für die Anlage, die Möglichkeit zur gleichzeitigen Bearbeitung mehrerer Werkstücke und die Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Funktionsflächen sowie die Einbringung von Druckeigenspannungen gekennzeichnet [Hash15, Hash16b, Malk20, Mull17].

Nachteile des Verfahrens: Mit dem Gleitschleifen wird keine Verbesserung der Form- und Maßgenauigkeit erzielt. Scharfe Kanten werden teilweise stark verrundet, da die Ecken am meisten mit den Schleifkörnern in Berührung kommen [Maki19]. Das Compound sammelt gelöste Metalle, emulgiertes Öl sowie die Abriebpartikel der Werkstücke und Chips während der Bearbeitung. Die Reinigung dieses Gemisches ist mit sehr hohem Aufwand verbunden und kann nicht durch das Absetzen, Filtrieren oder Zentrifugieren gewährleistet werden. Durch die Bearbeitung mit Flockungsmitteln bilden die Schwermetalle und Mineralöl eine Schlammschicht, die von dem Wasser getrennt werden muss [Frit18, Kloc18b]. Weiterhin besteht eine Restriktion in der Bauteilgröße, dem Bauteilgewicht bzw. -volumen (max. bis 1 Liter) [Maki19].

2.2.4 Manuelles Polieren

Beim manuellen Polieren werden lose, in einer Flüssigkeit dispergierte Körner über eine Oberfläche geführt (Bild 2.3). Durch unterschiedliche Mechanismen, wie mechanisches Abtragen, plastisches Verformen und chemische Reaktion wird das Material in μm -Bereich abgetragen. Zu den typischen Schneidstoffen gehören Tonerde ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), Chromoxide (Cr_2O_3), kolloidales Siliziumoxid (SiO_2), Eisenoxide ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) und Diamant (C) mit einer Korngröße von 0,1 bis 50 μm . Die Polierflüssigkeit soll eine Wasserlöslichkeit aufweisen und folgende Aufgaben erfüllen: Verteilung und Transport der Körner, Wärmeabfuhr, Adhäsionsminderung sowie chemische Reaktion mit der Werkstückoberfläche. Der Poliermittelträger dient der Aufnahme der Schneidkörner und zur Unterstützung der Bearbeitung und ist durch die strukturierte Oberfläche, hohe Elastizität, Formstabilität und Beständigkeit gegen die Polierflüssigkeit gekennzeichnet. Die Polierträger werden in drei Gruppen unterteilt: plastisch verformbar (z.B. Pech, Polyurethan), weich (z.B. Tücher, Filz) und hart (z.B. Vlies, Laminat). Das manuelle Polieren liegt sehr verfahrensnah zum Läppen mit den Unterschieden, dass die Korngrößen beim Polieren viel kleinere Dimensionen aufweisen und der Prozess hauptsächlich manuell durchgeführt wird [Kloc18b].

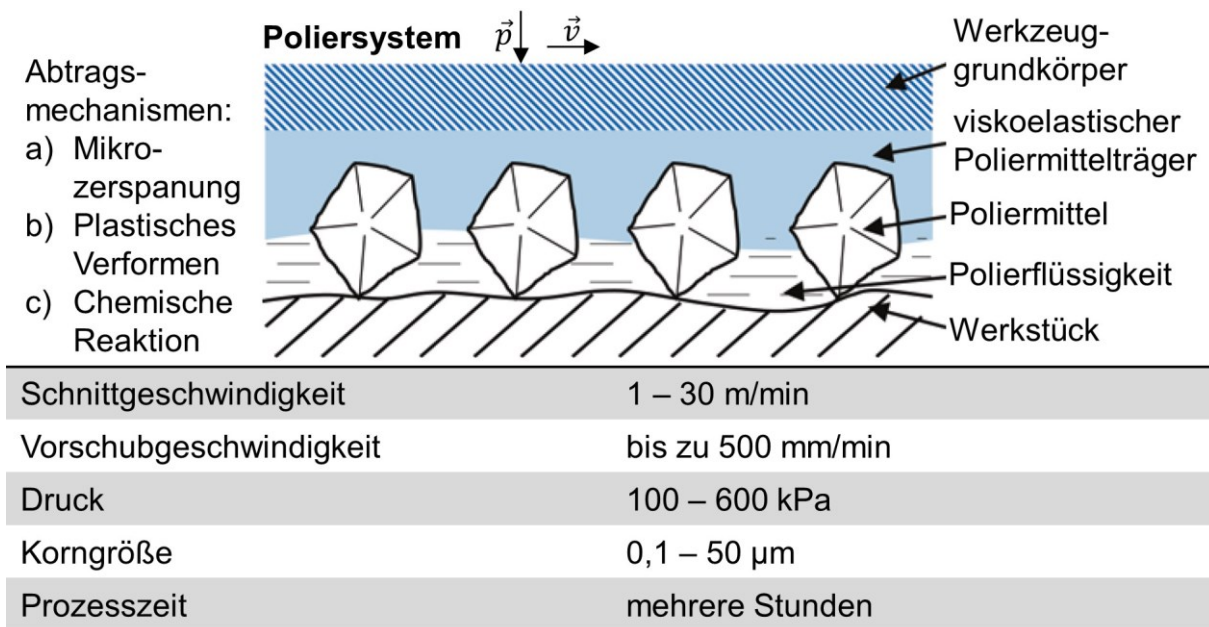


Bild 2.3: Funktionsprinzip und die Prozessparameter des Polierens [Beau11, Kloc18b, Namb08, Suzu06]

Zwei Verfahrensvarianten werden beim Polieren unterschieden: zonales (manuell) und flächiges (mechanisiert, zum Teil automatisiert) Polieren. Beim flächigen Polieren werden einfache, symmetrische Formelemente oder ebene Flächen in einer Anlage

bearbeitet. Dabei weist das Werkzeug die gleiche Form wie das Werkstück auf und liegt in einer größeren Dimension vor, was wiederum zur Größenrestriktion bei polierten Bauteilen führt [Kloc18b]. Beim Polieren asymmetrischer Werkstücke bzw. Freiformflächen wird zonales Polieren eingesetzt. Dabei wird die komplexe Oberfläche mit einem kleinen, meistens kegelförmigen Werkzeug manuell bearbeitet.

Vorteile: Durch das manuelle Polieren werden sehr hohe Oberflächenqualitäten (bis zu $R_a = 0,005 \mu\text{m}$ [Deng20]) erreicht, Oberflächenbeschädigungen, wie Kratzer und periodische Mikrorauigkeit beseitigt sowie ein optisches Glänzen erzeugt. Das flächige Polieren von Plan- und Zylinderoberflächen ermöglicht extrem hohe Oberflächengüten von ca. $R_a < 0,001 \mu\text{m}$ [Beau13, Namb08].

Nachteile: Das manuelle Polieren ist durch sehr geringe Prozessproduktivität ($10 - 30 \text{ min/cm}^2$) [Hild11], den Bedarf an qualifiziertem und erfahrenem Fachpersonal und einer hohen Verfahrenskomplexität gekennzeichnet, was zu sehr hohem Kostenaufwand führt [Erik12, Kums15, Piln15, Rose19]. Außerdem wurde die Prozessautomatisierung für die Bearbeitung komplexer Freiformflächen mittels Industrieroboter bis dato nicht industriell umgesetzt. Dafür sind mehrere Gründe anzuführen wie ungleichmäßiger Werkstoffabtrag, das Verrunden der funktionsrelevanten Kanten, die Verfahrenskomplexität, Kinematik- und Zugänglichkeitsbeschränkungen sowie sehr hoher Programmieraufwand für die Erzeugung einer kollisionsfreien Werkzeugbahn bei Gewährleistung konstanter Druckverhältnisse [Kloc18b, Suzu06, Ukar13].

2.2.5 Druckfließläppen

Beim Druckfließläppen, international als abrasive flow machining (AFM) bezeichnet, wird eine Mischung aus viskoelastischem Polymer und abrasiven Partikeln in einem geschlossenen Arbeitsraum, welcher die Innenkontur des Werkstückes bildet oder durch die Außenkontur mit der Werkzeugform begrenzt ist, in eine oder beide Richtungen hydraulisch bewegt. Als Polymer werden häufig Polyborosilikongel oder Silikonkautschuk und als Abrasivmittel klassische Schleifkörner wie Siliziumkarbid, Aluminiumoxid, kubisches Bornitrid und polykristalliner Diamant eingesetzt. Der Abtragsmechanismus ist in Abhängigkeit vom erzeugten Druck mehr durch die Mikrozerspanung oder plastisches Verformen gekennzeichnet [Kuma16], da die Viskosität der viskoelastischen, abrasiven Mischung durch den Druck variiert wird.

Weiterhin wird die Viskosität durch den Abrasivpartikelanteil, die Korngröße und Temperatur maßgeblich beeinflusst [Jain09]. Um eine Erhöhung der bei klassischen AFM oft niedrigen Abtragsleistung zu erzielen, werden unterschiedliche Maßnahmen (Schwingungserregung oder Rotation des Werkstückes) bzw. Verfahrenskombinationen (mit MRF, MAP oder ECM) unternommen [Kuma16]. Ursprünglich wurde das Druckfließläppen für das Entgraten und Finishen von Bohrungen beliebiger Form und Komplexität bei Hydraulik- und Kraftstoffkomponenten von Flugzeugen entwickelt [Jain09]. Heutzutage werden durch das AFM z.B. Bohrungen kleiner Durchmesser (bis zu 0,3 mm) in MEMS-Sensoren, Kraftstoffinjektoren, Printerdüsen oder auch Außenflächen, wie die Zähne von Kegelzahnradern sowie Turbinenschaufeln endbearbeitet [Kuma16]. Typische Prozessparameter beim AFM sind in der Tabelle 2.3 dargestellt.

Tabelle 2.3: Prozessparameter bei AFM [Duva18, Peng18, Swat14, Wang18]

Druck	5 – 80 MPa
Zyklusanzahl	bis zu 400
Zyklusdauer	einige Minuten
Abrasivpartikelanteil	50 – 60 %

Eine Verfahrenskombination mit magnetorheologischem Polieren (MRF) wurde in den letzten Jahren intensiv untersucht [Jain09, Jain11, Jha04, Kuma15, Nagd16, Shar21], um die isotrope Oberflächenstruktur beim AFM zu vermeiden und eine kontrollierte Prozessführung zu gewährleisten. Dabei wird die magnetorheologische Flüssigkeit durch Rotation von außen positionierten Magneten und dem linearen Hydraulikdruck in eine Helikalbewegung versetzt. Dadurch kann eine polierte Oberfläche von $R_a = 0,02 \mu\text{m}$ erzeugt werden [Jain11].

Vorteile: AFM ermöglicht eine effektive Bearbeitung (bis zu $R_a = 0,04 \mu\text{m}$) schwer zugänglicher und komplexer Innenkonturen [Uhl18b]. Dadurch, dass die abrasive Mischung mit hohem Druck in einem geschlossenen Raum fließt, werden Druckeigenstressungen bis zu 700 MPa [Uhl18b] in der Randzone bis zu 10 μm Tiefe erzeugt [Han20, Kend11]. Weiterhin werden Oberflächenbeschädigungen aus dem vorangegangenen Bearbeitungsschritt (z.B. EDM) bzw. nach additiver Fertigung entfernt [Kend11, Kend14, Swat14].

Nachteile: Das Druckfließläppen ist durch eine sehr niedrige Produktivität bzw. Bedarf an hoher Zyklusanzahl gekennzeichnet [Kuma16], wobei ein Zyklus einige Minuten

dauern kann [Han20]. Außerdem kann die Makroform nicht korrigiert werden [Jain11]. Die viskoelastische, abrasive Mischung stellt eine große Kostenposition dar [Wang18], besonders wenn ein großes Volumen gefüllt werden muss bzw. eine hohe Zyklusanzahl benötigt wird. Während der klassischen AFM-Bearbeitung entsteht eine anisotrope Oberfläche, sodass die Rauheit orthogonal zur Flussrichtung der Körner erhöhte Werte im Vergleich mit der Flussrichtung aufweisen kann [Kend11].

2.2.6 Elektrochemisches Polieren – ECM

Beim ECM wird das Material durch eine chemische Reaktion (Elektrolyse) abgetragen. Die Elektronen in Form der Metallionen werden im Elektrolyt vom Werkstoff gelöst oder treten in die Reaktion mit den Elektrolyten und bilden Metallhydroxide, die als Abtragsprodukte abfallen. Der Elektrolytkreislauf wird ständig von den Abtragsprodukten durch die Separatoren, Zentrifugen oder Filterpressen gereinigt, um das Wirkmedium nicht einzudicken. Als Elektrolyt kommen häufig Kochsalz- (NaCl), Nitratlösungen (NaNO_3) oder Säuren zum Einsatz [Döbb20, Hash15, Kloc07].

Tabelle 2.4: Prozessparameter beim ECM und PECM [Döbb20, Kloc14]

Parameter	ECM	PECM
Spannung	bis 20 V	bis 20 V
Stromstärke	bis 20 A	bis 40 kA
Stromart	DC	DC pulsiert
Arbeitsspalt	mehrere mm	10 – 100 μm
Vorschubgeschwindigkeit	–	0,1 – 3 mm/min
Kathodenschwingungen	–	bis 10 kHz
Elektrolytzufuhr	–	bis 1000 l/min
Elektrolytdruck	–	bis 40 bar

Zwei ECM-Verfahrensvarianten werden unterschieden (Tabelle 2.4): ECM mit Gleichstrom und unter mechanischen Schwingungen bzw. elektrischen Pulsen (PECM). In der ersten Variante wird das komplette Werkstück in die Elektrolytwanne getaucht und von der gegenüberstehenden Kathode beeinflusst. Die Anode und Kathode werden statisch fixiert sowie alle Oberflächen des Bauteiles gleichzeitig bearbeitet [Döbb20]. Beim PECM wird eine Kathode mit komplexer Form unter Schwingungen geringer Frequenz eingesetzt. Die Gleichstromversorgung findet in Impulsen statt und ist an das Schwingungsverhalten gekoppelt. In den stromlosen

Prozessphasen wird der Elektrolyt ersetzt. In einer PECM-Anlage wird eine Flüssigkeitszufuhr bis zu 1000 l/min unter einem Druck von bis zu 40 bar erzeugt. Der Arbeitsspalt wird dabei im Vergleich zum konventionellen ECM (100 bis 1000 µm) um Faktor 10 reduziert. Jedoch wird dadurch der Prozess stabiler gestaltet und sehr hohe Oberflächengüten werden erreicht. Moderne PECM-Anlagen verfügen über 7-8 Maschinenachsen und ermöglichen das Schruppen, Schlichten und Polieren des Bauteiles ohne Umspannung [Kloc14].

Vorteile des Verfahrens: ECM ist durch keinen Werkzeugverschleiß und die Vermeidung der Weißschichten bzw. Wärmeeinflusszone gekennzeichnet [Kloc14]. Die Bearbeitbarkeit des Werkstoffes hängt nicht von mechanischen, sondern primär von den elektrochemischen Bauteileigenschaften ab. Daher lassen sich hochwarmfeste Werkstoffe wie Titan-, Kobalt- und Nickelbasislegierungen gut bearbeiten. Außerdem übt das ECM-Verfahren keinen thermischen Einfluss auf die Oberfläche aus und das oberflächennahe Gefüge bleibt unverändert. Die Bauteile sind nach der Bearbeitung gratfrei und weisen hohe Oberflächengüte bis zu $R_a = 0,02 \mu\text{m}$ auf [Diet16, Frit18, Jain19, Kloc07].

Nachteile des Verfahrens: Sehr hohe Anforderungen werden an die Ausgangsoberfläche gestellt. Diese darf keine Oberflächenbeschädigungen aufweisen, sollte möglichst homogen und glatt sein, um eine gleichmäßige Bearbeitung zu ermöglichen. Die Oberflächenqualität wird sowohl durch die lokalen elektrisch nichtleitenden Einschlüsse (z.B. Karbide) als auch Mikrobeschädigungen (z.B. Poren, Risse) sowie unterschiedliche Phase der Gefüge signifikant reduziert [Jain19]. Das komplette Bauteil soll beim konventionellen ECM in einem Behälter mit gefülltem Elektrolyt platziert werden, dass den Einsatz des Verfahrens bei großen Abmessungen des Werkstückes stark begrenzt [Deng20]. Außerdem können keine elektrisch nichtleitenden Werkstoffe wie Keramik, Glas, Kunststoff mit dem Verfahren bearbeitet werden. Dazu stellen der Elektrolyt und die Abtragsprodukte (z.B. Ammoniak, Nitrit) eine Umweltbelastung dar und müssen in Einzelfällen analysiert werden, um entsprechend entsorgt zu werden [Kloc07]. Der Kostenaufwand für Werkzeuge und Anlagentechnik des PECM-Verfahrens sind entsprechend hoch und daher nur für die Großserienfertigung rentabel [Kloc14]. Außerdem werden aufwändige Prozessanfahrversuche benötigt, da der Prozess durch viele Variablen, komplexe chemische Reaktionen, starke Flüssigkeitsbewegung und präzise Einhaltung des Arbeitsspaltens gekennzeichnet ist [Kloc14, Rama02].

2.2.7 Laserpolieren

Beim Laserpolieren wird der Werkstoff nicht abgetragen, sondern entweder durch sehr starke Erhitzung evaporiert oder durch das Umschmelzen einer dünnen Randschicht umverteilt, sodass die Oberfläche infolge der Oberflächenspannung in der schmelzflüssigen Phase geglättet wird. Ein Laserstrahl hinterlässt auf der Oberfläche eine geschmolzene Spur. In der Praxis wird ein Spurenversatz verwendet, der kleiner als der Fokusbereich ist, sodass die Laserstrahlung mehrmals die gleiche Fläche beeinflusst. Ausgehend von der Ausgangsrauheit und dem erwarteten Ergebnis wird die gleiche Kontur mehrmals bestrahlt [Kums15].

Als Laserquelle wird heutzutage wegen des hohen Wirkungsgrades ein Yb:YAG Scheibenfestkörper- (25%) anstatt Rubin- (1%), Nd:YAG- (25%), Dioden- (10%) oder CO₂-Laser (10-20%) verwendet [Kloc07, Kums15, Schm18]. Die weitere Entwicklung geht in die Richtung höherer Strahlqualität bei Glasfaserlasern (Wirkungsgrad 40%) und direktem Diodenlaser (60%) [Schm18] sowie kürzerer Impulsdauer, sodass die lokale Wärmeentwicklung und somit die Oberflächenbeschädigungen reduziert werden. Dabei wird eine bessere Oberflächengüte erreicht, allerdings steigen die Fertigungszeit und -kosten [Meij02]. Die Wärmeaufnahme und Bearbeitbarkeit des Werkstoffes hängt ausschließlich von der Wellenlänge der Laserstrahlung ab. Deswegen werden abweichende Wellenlängen für unterschiedliche Werkstoffgruppen benötigt (für Metalle unter 1 µm, für Glas über 1 µm) [Schm18].

Zwei Verfahrensvarianten werden unterschieden: Makro-Polieren mit kontinuierlicher Laserstrahlung und Mikro-Polieren mit gepulster Laserstrahlung (Bild 2.4). Das Makro-Laserpolieren wird zur Glättung rauer Oberflächen nach dem Drehen, Fräsen oder SLM-Fertigung angewendet. Eine typische Rauheitsreduzierung beträgt in mehreren Überfahrten der gleichen Kontur von $R_a = 1 - 20 \mu\text{m}$ auf $R_a = 0,1 - 0,2 \mu\text{m}$. Die Stärke der Umschmelzschicht liegt bei 20 bis 200 µm [Kums13]. Das Mikro-Laserpolieren wird nach der Mikrozerspanung, dem Schleifen oder Makro-Polieren eingesetzt, um die Oberflächengüte und den Glanzgrad zu verbessern. Dabei werden im Vergleich zum Makro-Laserpolieren entweder die Laserleistung reduziert oder die Scangeschwindigkeit erhöht, um ausschließlich die Rauheitsspitzen umzuschmelzen. Die Pulsdauer beträgt von 20 bis 1000 ns und die Stärke der Umschmelzschicht liegt bei 0,5 bis 5 µm [Kums13, Kums15, Pfef14, Temm20]. Nach vier Prozessschritten konnte die Rauheit bis auf $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ reduziert werden [Temm20].

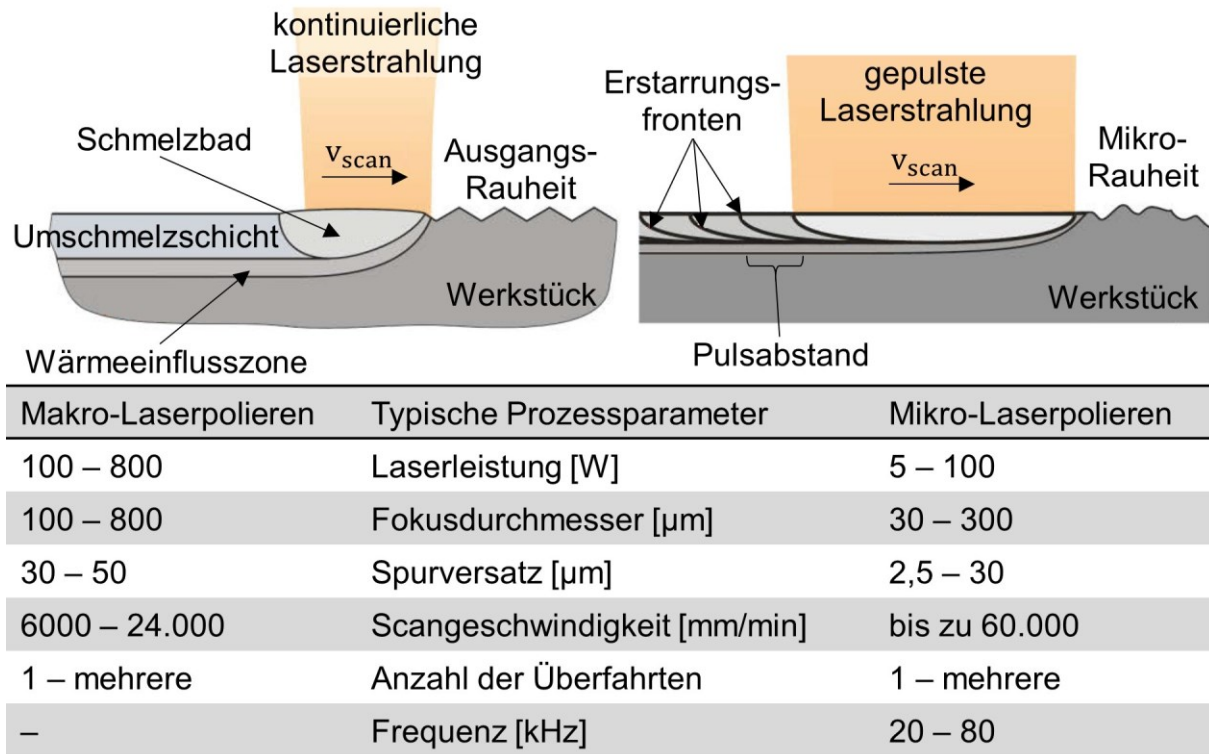


Bild 2.4: Darstellung des Laserpolierens, links: Makro-Laserpolieren, rechts: Mikro-Laserpolieren [GioL15, GioC16, Kums13, Kums15, Pfef14, Solh18, Temm20, Zhih18]

Vorteile des Verfahrens: Das Laserpolieren wird durch eine sehr hohe Prozessgeschwindigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gekennzeichnet. Dabei wird die selektive Politur verschiedener Bereiche am Bauteil ermöglicht. Außerdem können Verunreinigungen der Randschicht durch Schleif- und Polierrückstände im Vergleich zu abrasiven Polierverfahren sowie die Oxidbildung durch den reduzierten Sauerstoffgehalt beim Einsatz von Schutzgas vermieden werden [Kums15]. Die Lasertechnologie wird als weitestgehend verschleißfrei im Vergleich zu abrasiven Prozessen definiert und benötigt keine Pulverpräparation, kein Abrichten sowie Werkzeugwechsel [GioL15]. Das Makro-Laserpolieren ermöglicht eine Rauheitsreduzierung relativ grober Ausgangsoberflächen ($R_a = 10 - 40 \mu\text{m}$), die besonders bei den additiv gefertigten Bauteilen auftreten [Kums15].

Nachteile des Verfahrens: Für das Verfahren wird eine separate, kostenintensive Anlage (im Bereich von 1. Mio. Euro) mit einer oder mehreren Laserquellen, komplexer 5-Achs-Kinematik, hochdynamischen Führungssachsen und einer Inertgasatmosphäre bzw. unterschiedlichen Schutzgasen (z.B. Argon [GioC16, Kums13, Zhih18], Stickstoff [GioL15, GioC16] oder Helium [Temm20]) benötigt. Dabei ist die Programmierung sehr aufwendig, da konventionelle CAM-Software, die z.B. auch für die 5-Achs-

Fräsbearbeitung eingesetzt wird, nicht in der Lage ist, eine simultane Nutzung von fünf mechanischen Maschinenachsen und vom 3D Laserscanner zu gewährleisten. Dafür wird ein zusätzlicher Postprozessor benötigt, der neben dem NC-Programm für die Verfahrbewegungen auch die Befehle zur Steuerung des Laserscanners erzeugt. Darüber hinaus gelingt nicht immer, den Strahlengang senkrecht zur Oberfläche zu positionieren. Daher koppelt die Laserstrahlung nicht kreisrund, sondern elliptisch in die Oberfläche ein und schmilzt diese ungleichmäßig um. Das führt zur Reduzierung der Intensität sowie starken Abweichung der Oberflächengüte bei komplexen Konturen (bis zu 40% Abweichung bei dem Winkel 60° zwischen dem Laserstrahl und der Werkstückoberfläche). Mit einer Leistungserhöhung des Lasers kann dieser Effekt nur zum Teil ausgeglichen werden. Einerseits verursachen mehrere Überfahrten beim Makro-Laserpolieren unterschiedliche kristallographische Ausrichtung der Gefüge. Die Härte der Wiederaufschmelzschicht sinkt dabei im Vergleich zum Grundwerkstoff [Kums15]. Andererseits kann die Härte in der Randschicht durch enorm schnelle Rekristallisation und Abkühlung der Schmelze (Abkühlrate bei 10^4 bis zu 10^9 K/s) erhöht werden [Kums13, Temm20, Zhih18]. Hohe Laserleistung und geringer Fokussdurchmesser führen zu sehr hohen Temperaturgradienten und zur Bildung feinerer Körnung des Rohmaterials. Allerdings treten dabei sehr hohe Zugeigenspannungen bis zu 900 MPa auf, die zu einer erhöhten Neigung zur Rissbildung führen [Temm20].

2.2.8 Materialbearbeitung mit Elektronenstrahl – EBM

Beim EBM-Polieren ist der Bearbeitungsmechanismus analog wie beim Laserpolieren. Der Unterschied zwischen beiden Strahlverfahren liegt darin, dass das fokussierte Licht (Photonen) beim Laserpolieren und die starkbeschleunigten Elektronen beim EBM-Polieren die Bearbeitungsoberfläche thermisch beeinflussen. Photonen sind im Vergleich zu Elektronen durch geringere Abmessungen, elektrische Neutralität und Abwesenheit der Abstoßkräfte gekennzeichnet, deswegen können die Photonen in sehr geringem Strahldurchmesser konzentriert werden [Meij02]. Beim EBM-Polieren wird der Elektronenstrahl nicht fokussiert, sondern das Werkstück großflächig (Durchmesser bis 60 mm) beeinflusst. Ähnlich wie beim Mikro-Laserpolieren wird die Strahlung beim EBM-Polieren impulsartig in die Oberfläche eingekoppelt. Die Impulsdauer ist dabei länger und die Impulsfrequenz deutlich langsamer (Tabelle 2.5).

Allerdings wird eine kleine Anzahl an Impulsen (bis zu 50) benötigt, sodass das Verfahren eine mittlere Produktivität aufweist und die Bearbeitung einer Kreisfläche des Strahldurchmessers einige Minuten in Anspruch nimmt [Deng20, Misu13, Murr13, Okad08]. Bei einer Spannung von 50 kV wird eine Oberflächenschichtdicke von 10 μm bei Aluminium thermisch beeinflusst [Meij02]. Die max. erreichte Oberflächengüte liegt bei Ra bis 0,1 μm [Deng20].

Tabelle 2.5: Prozessparameter bei EBM [Deng20, Misu13, Murr13, Okad08, Okad11]

Strahlendurchmesser	60 mm
Impulsdauer	2 – 3 μs
Frequenz	0,12 – 0,2 Hz
Impulsanzahl	5 – 50
Spannung	30 – 50 kV

Vorteile des Verfahrens: Durch eine niedrige Strahlfrequenz wird die Korrosionsbeständigkeit erhöht und der thermische Einfluss reduziert. Wegen der Arbeit im technischen Vakuum ($p = 10^{-2}$ bis 10^{-4} Pa) bildet sich keine Oxidschicht. Weiterhin ist die Bearbeitung von Mikrostrukturen möglich [Murr13, Okad08].

Nachteile des Verfahrens: Damit das Verfahren überhaupt funktioniert und die Elektronen die zu bearbeitende Oberfläche beeinflussen können, wird die Luft aus der Arbeitskammer komplett evakuiert [Deng20]. Die Anlage zum EBM-Polieren ist sehr komplex, besteht aus mehreren Kammern, die ein technisches Vakuum benötigen, deswegen ist die Anschaffung der Maschine mit hohen Investitionskosten verbunden und die Werkstückabmessungen sind begrenzt. Der Prozess benötigt eine sehr hohe elektrische Spannung und erhöht dementsprechend stark den Energiebedarf [Kloc07, Murr13, Okad08]. Große verfahrenstechnische Restriktion liegen in der Bearbeitung der Werkstoffe mit nicht-metallischen Einschlüssen wie Karbide, Sulfide und Nitride (z.B. 1.4404, manche NiTi- und AlSi-Legierungen), da diese wegen unterschiedlichen thermischen Eigenschaften im Vergleich zum Metallgrundwerkstoff schneller verdampfen und eine sogenannte „Kraterbildung“ auf der Oberfläche verursachen [Murr13]. Außerdem ist die Bearbeitung von Freiformflächen durch Ungleichmäßigkeit gekennzeichnet, da die Elektronen mit unterschiedlichen Winkeln die Oberfläche beeinflussen. Obwohl die Bearbeitungszeit nur wenige Minuten beträgt, dauert das Erzeugen des Vakuums ca. 15. Minuten, was die Produktivität stark reduziert [Deng20].

2.2.9 Magnetorheologisches Polieren – MRF

Beim magnetorheologischen Polieren wird eine spezielle Flüssigkeit für die Bearbeitung verwendet, die aus deionisiertem Wasser, oberflächlich-aktiven Mitteln, abrasiven Schneidkörnern (Diamant, SiC, Al₂O₃ oder CeO₂) und ferromagnetischen Partikeln (Eisen oder Karbonyleisen) besteht. Die MR-Flüssigkeiten gehören zu den nicht-newtonschen Flüssigkeiten, deren Viskosität unter einem äußeren Magnetfeld signifikant gesteigert werden kann (von 0,1 – 1 auf 10 – 20 Pa x s) [Chom06, Jain09, Jain10, Klim17, Sidp11]. Das magnetorheologische Polieren hat sich in den letzten Dekaden beim Finishen von optischen Elementen und z.B. von spröden Gläser bis zu harten Monokristallwerkstoffen weltweit durchgesetzt [Jain11].

Magnetorheologisches Polieren gehört zu den Sonderverfahren, daher wird der Prozess und dessen Kinematik näher erläutert (Bild 2.5). Das Führungswerkzeug enthält einen Permanent- oder Elektromagnet, erzeugt das inhomogene Magnetfeld und führt die magnetorheologische Flüssigkeit zum Bauteil. Durch die kontinuierliche Relativbewegung des Werkzeuges und die Drehung des Werkstückes wird die Vorschubgeschwindigkeit realisiert. Die MR-Flüssigkeit weist eine hohe Homogenität und gleichmäßige Verteilung aller Bestandteile auf, wenn kein Magnetfeld wirkt (Bild 2.5b). In der Arbeitszone hingegen bilden sich Ketten aus ferromagnetischen Körnern in Richtung des Werkstückes und drücken die paramagnetischen Schneidkörner ins Bauteil (Bild 2.5c). Durch die Drehung des Führungswerkzeuges wird die Schnittgeschwindigkeit und Mikrozerspanung sowie das plastische Verformen erzeugt [Jain09, Klim17].

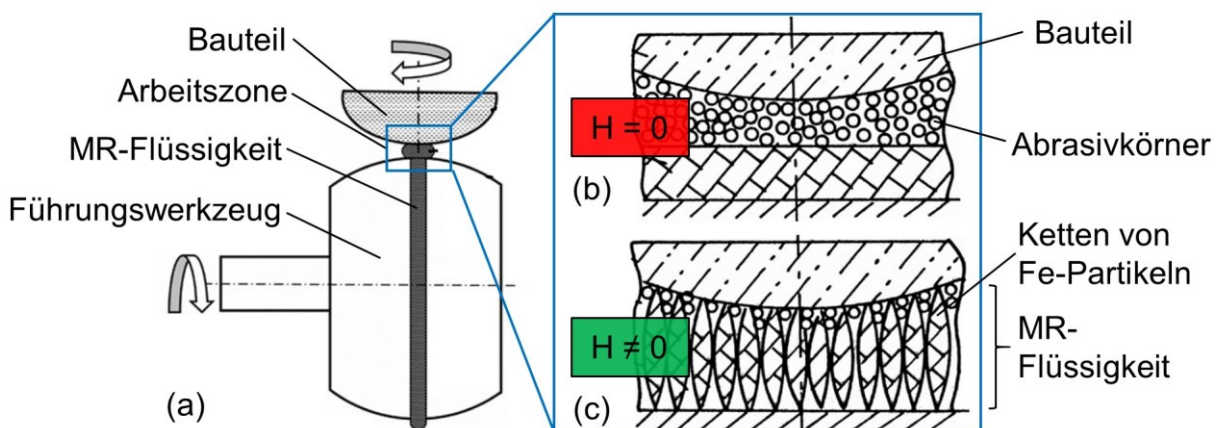


Bild 2.5: Funktionsprinzip des magnetorheologischen Polierens: (a) typisches Arbeitsschema, (b) Arbeitszone ohne Magnetfeld, (c) Arbeitszone mit Magnetfeld [Klim17]

Die Mikrospäne werden im Prozess durch die MR-Flüssigkeit mitgenommen, was allerdings zur Erhöhung der Viskosität sowie Prozessinstabilität führt. Aus diesem Grund wird die MR-Flüssigkeit kontinuierlich im Prozess während des kompletten Fertigungszyklus zugeführt [Jain11]. Typische Prozessparameter sind in der Tabelle 2.6 dargestellt. Die Einflussgrößen auf die Zerspankraft sind entsprechend ihrer Signifikanz gegliedert in: Arbeitsabstand, Anteil ferromagnetischer Körner und Anteil der Schneidkörner. Die Schnittgeschwindigkeit spielt dabei eine vernachlässigbare Rolle [Sidp11]. In der Forschung wurden auch alternative Prozesskinematiken untersucht, wie der Einsatz des Elektromagneten mit einem konischen Kern auf einem BAZ [Khan16] und der Einsatz eines zylindrischen Permanentmagneten im Planwerkzeug auf einem BAZ [Barm17, Kans18], welche jedoch industriell keine Umsetzung erfuhren.

Tabelle 2.6: Prozessparameter beim MRF [Jain10, Klim17, Sidp11, Zhao18]

Schnittgeschwindigkeit	60 – 180 m/min
Vorschubgeschwindigkeit	200 – 350 mm/min
Arbeitsabstand	1 – 2 mm
Schneidkorngröße	0,2 – 6 μm (Anteil 5 – 10%)
Größe ferromagnetischer Körner	1 – 10 μm (Anteil 30 – 40%)

Vorteile des Verfahrens: Magnetorheologisches Polieren gewährleistet eine Ultrapräzisionsbearbeitung ohne Randzonenbeschädigung und erzeugt eine Oberflächengüte im nm-Bereich ($R_a < 0,001 \mu\text{m}$) [Chom06, Chou16, Jain09, Jain10]. Außerdem können die Welligkeit verbessert werden sowie die lokalen Oberflächenbeschädigungen wie Kratzer, Pittings usw. aus dem vorherigen Fertigungsschritt (z.B. UP-Drehen) behoben werden [Zhao18, ZhaY18].

Nachteile des Verfahrens: Die MR-Flüssigkeit ist durch eine leichtzerstörbare Struktur und komplexe Zusammensetzung gekennzeichnet. Während des Prozesses muss ständig ein bestimmtes Mischungsverhältnis zwischen den Anteilen der MR-Flüssigkeit gewährleistet werden. Diese darf nicht mehr als zwei Monate wegen der Segregation gelagert werden. Die Funktionsfähigkeit der MR-Flüssigkeit wird nur bei einem geringen Anteil an abrasiven Körnern (bis zu 5 %) und geringer Korngröße (bis zu 6 μm) gewährleistet, was die Abtragsleistung signifikant einschränkt. Es werden hohe Investitionskosten für die Anlage im Bereich von über eine Mio. Euro benötigt [Chom06]. MRF weist eine sehr geringe Produktivität auf [ZhaY18].

2.2.10 Finishverfahren – Zusammenfassung

Die Literaturrecherche aus den Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.9 wurde in das Diagramm aus dem Kap. 2.1.7 integriert und Finishtechnologien den relevanten Industriezweigen zugeordnet (Bild 2.6). Die Oberflächengüte, welche aktuell in der Astronomie und Optik gefordert wird ($R_a < 0,01 \mu\text{m}$ bis hin zu $R_a < 0,001 \mu\text{m}$) kann nur durch die beschriebenen Finishtechnologien bzw. Ultrapräzisionsverfahren (UP-Schleifen, UP-Drehen, UP-Fräsen) und durch magnetorheologisches Polieren gewährleistet werden. Das Gleitschleifen, elektrochemisches und manuelles Polieren werden in der Antriebs- und Medizintechnik eingesetzt. Das Druckfließläppen findet momentan den Einsatz bei der Antriebsfertigung, wobei die Übertragung des Verfahrens auf die zweite Ebene entsprechend Bild 2.6 erforscht wird. Sehr kritisch bleibt die Finishbearbeitung im Werkzeug- und Formenbau, da das manuelle Polieren nach wie vor in der Industrie überwiegend verwendet wird. Das Polieren mit dem Laser- oder Elektronenstrahl (EBM) wurde in den letzten Dekaden intensiv untersucht und die Technologieeinführung in die zweite und dritte Ebene angestrebt. Allerdings sind noch viele Prozessrestriktionen gegeben und die Anforderungen an die Oberflächengüte konnten besonders bei Freiformflächen nicht vollständig erreicht werden. Obwohl das magnetabrasive Polieren heutzutage fast ausschließlich in der Industrie für die Vor- und Nachbehandlung von Zerspanwerkzeugen eingesetzt wird, sollten die Vorteile des Verfahrens auch für andere Industriezweige und Einsatzgebiete erschlossen werden.

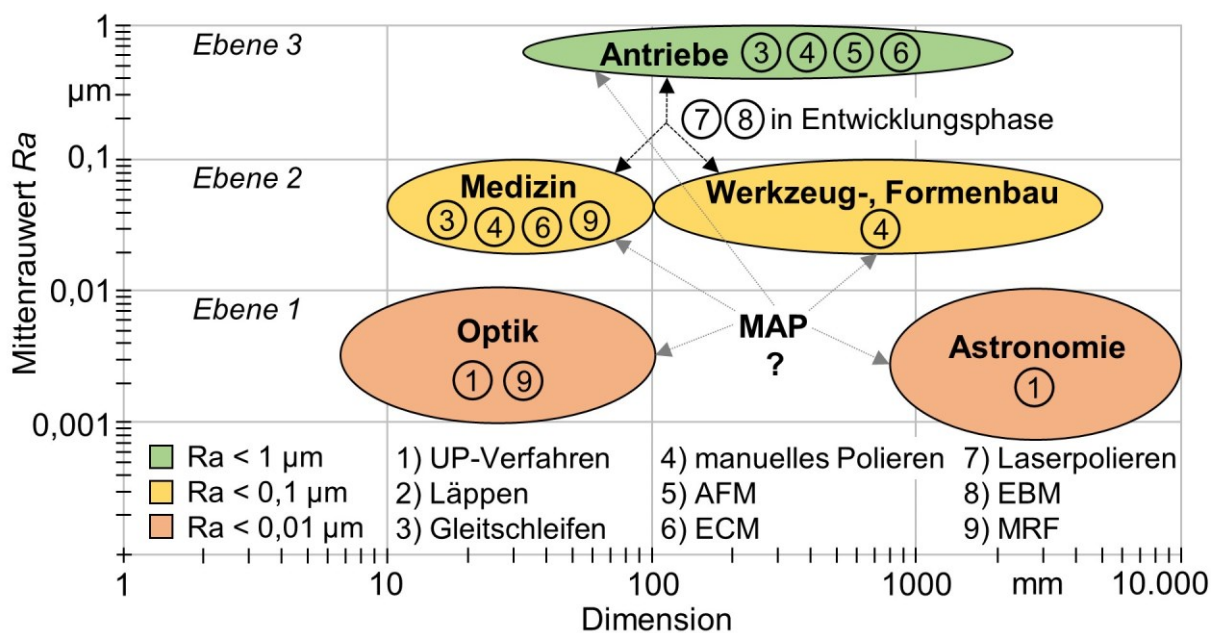


Bild 2.6: Einsatz der Finishverfahren in der Industrie

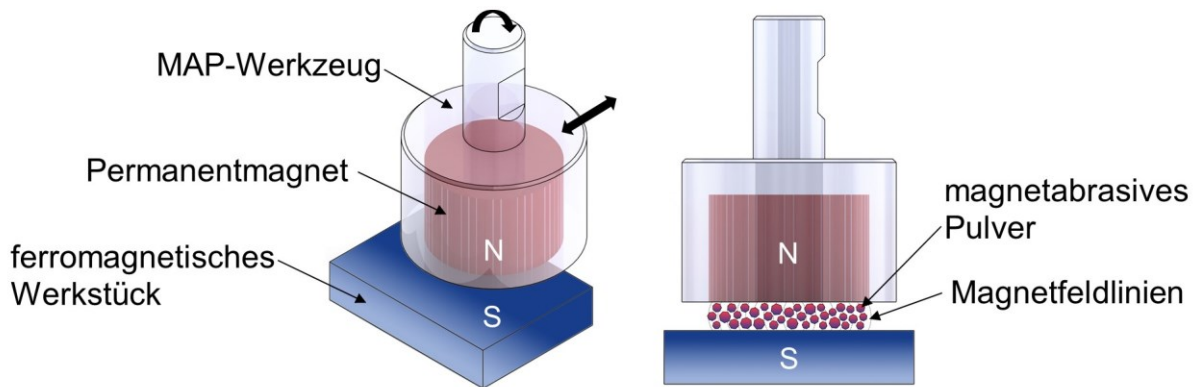
2.3 Magnetabrasives Polieren – MAP

2.3.1 Grundlagen

Die Funktionsweise des magnetabrasiven Polierens wird am Beispiel der Planbearbeitung eines ferromagnetischen Werkstückes näher erläutert (Bild 2.7). Das Bauteil wird meistens zwischen den Permanent- oder Elektromagneten positioniert, sodass die Magnetfeldlinien durch das Werkstück verlaufen. Im vorliegenden Fall wird das Bauteil durch das äußere Magnetfeld magnetisiert und die Feldlinien werden vom Permanentmagnet auf dem Werkstück geschlossen. Der Raum zwischen dem Magnet und Bauteil wird mit einem spezifischen magnetabrasiven Pulver gefüllt. Durch das Magnetfeld wird das Pulver in Richtung des Werkstücks gepresst und durch die Rotation des Werkzeuges bewegt. Somit wird entsprechend die Zerspankraft und die Schnittgeschwindigkeit erzeugt. Durch die Vorschubbewegung des Werkzeuges wird die komplette Oberfläche bearbeitet. Der Abtragsmechanismus ist durch Mikrozerspanung (Spänegröße von 8 bis 60 μm) und durch plastisches Verformen gekennzeichnet. Das Magnetfeld erfüllt die Funktion der Bindung einzelner Körner und bestimmt deren normal und tangential wirkende Prozesskraft. Da es sich nicht um eine starre Bindung handelt, werden die einzelnen Körner durch den Einfluss des Magnetfeldes, der Schnittgeschwindigkeit und den Kontakt zur Werkstückoberfläche ständig umorientiert. Eine sog. Umwälzung der Körner im Arbeitsraum findet statt, was zum Einsatz neuer Schneidkanten führt und den Selbstschärfeffekt unterstützt [Saku81]. Durch die Änderung der Magnetfeldstärke wird die Bindungshärte der Körner variiert. Bei hoher magnetischer Flussdichte ähnelt der MAP-Prozess der Bearbeitung mit starrer Kornbindung und bei niedriger Flussdichte der Bearbeitung mit losem Korn. Somit kann das MAP sehr flexibel gestaltet werden. Bei Erhöhung der magnetischen Flussdichte von 0,4 bis 1,4 T nimmt die Zerspankraft und die Abtragsleistung beim MAP zu. Eine weitere Steigerung der Flussdichte im Arbeitsspalt führt oft zur magnetischen Sättigung des Pulvers und zu einer Reduzierung der Prozessintensität [Baro86, Chom06, Klim17, Olik84].

Magnetabrasives Polieren ermöglicht in 10 bis 120 s Prozesszeit den Werkstoffabtrag bis in eine Tiefe von 0,002 bis 0,5 mm, bei einer Abtraggeschwindigkeit bis zu 2 $\mu\text{m/s}$, wobei die Rauheitsreduzierung bis zu $R_a = 0,01 \mu\text{m}$ in einem Fertigungsschritt betragen kann und eine Erhöhung des Materialanteils bis zu 75% – 85% erreicht wird. Die Prozess Temperatur beträgt ohne Kühlschmierstoffzufuhr bis zu 160 °C [Chom06]

und mit KSS 30 – 40 °C [Saku81]. Der Kühlschmierstoff wird in der Regel mit sehr niedrigem Druck (unter 5 bar) zugeführt [Chom06]. Bei der Bearbeitung ohne KSS sollte die Werkstückoberfläche bzw. das MAP-Werkzeug eingeölt werden. Die komplett trockene Bearbeitung führt zu ungünstigen Prozessbedingungen [Baro86].



Schnittgeschwindigkeit	10 – 300 m/min
Vorschubgeschwindigkeit	10 – 60 mm/min
Arbeitsabstand	1 – 3 mm
magnetische Flussdichte	0,2 – 1,6 T
Prozesszeit	0,5 – 3 min

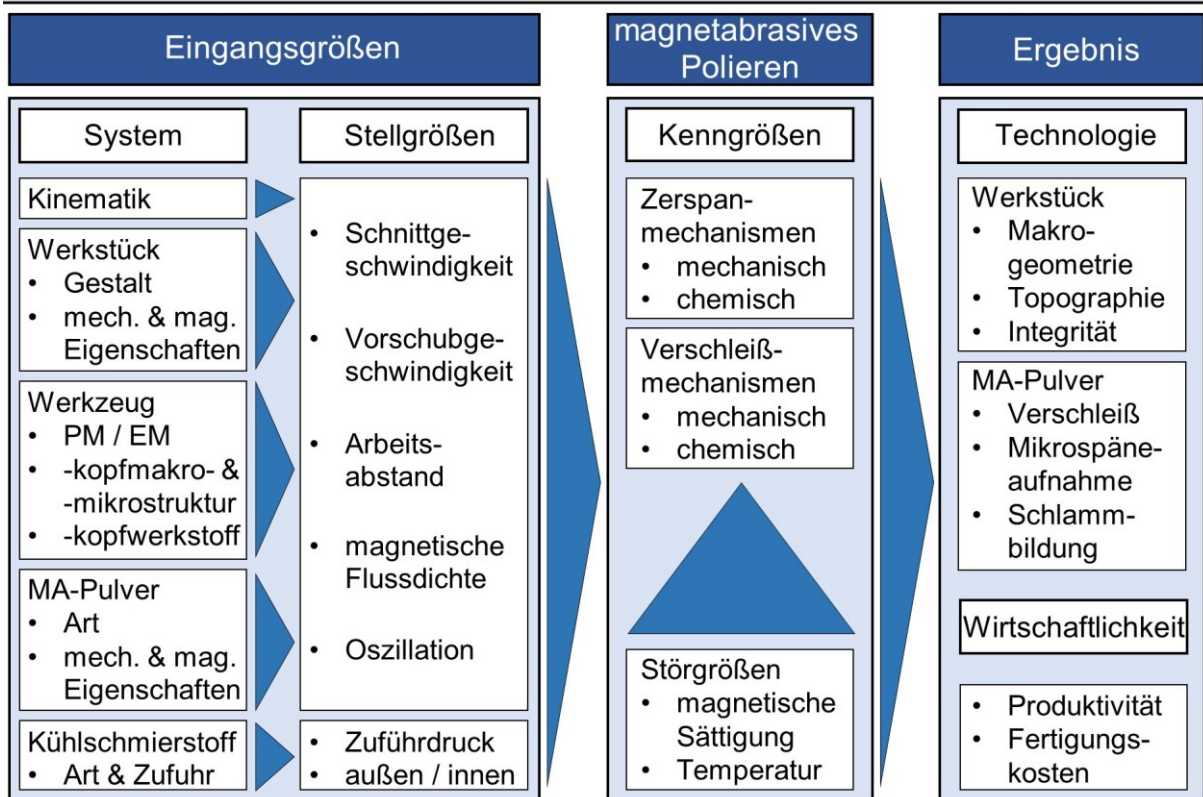


Bild 2.7: Funktionsweise des magnetabrasiven Polierens, typische Prozessparameter sowie Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Arbeitsergebnis [Chan02, Fox94, Hung10, Juda13, Kala14, Kang12a, Kang12b, Karp09, Kloc18b, Liu14, Muli11, Ntez14, Shin90, Siha17, Sun18, Vahd16, Wu18, Yama05, Yama07, Yama11, Yama12, Yama14b, Yama17]

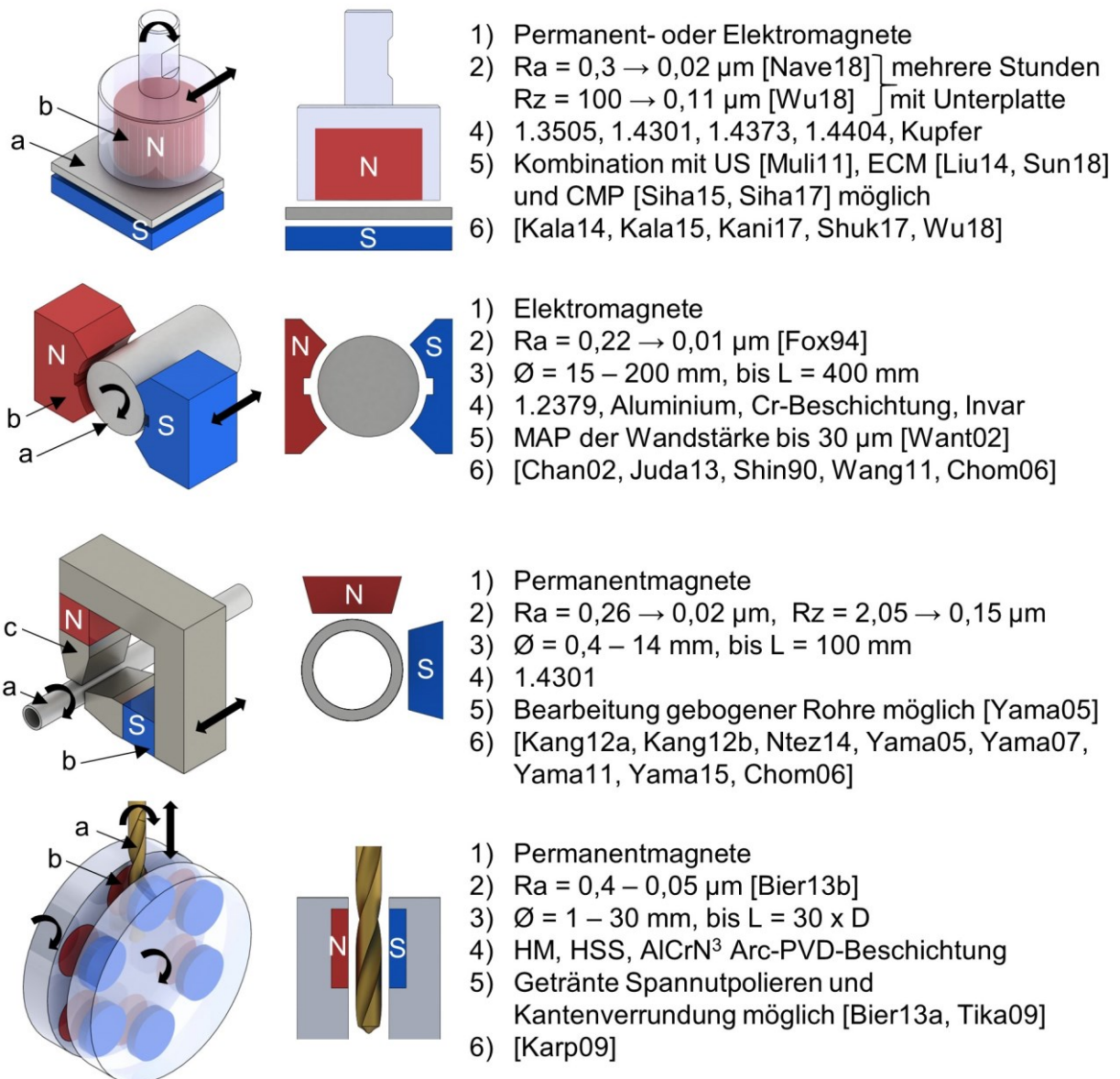
Mögliche Einsatzgebiete: Das magnetabrasive Polieren ermöglicht:

- a) Polieren der Plan-, Außenrund- [Fox94, Shin90], Innenrund- [Ntez14, Yama15] und Freiformflächen [Hung10, Karp09, Vahd16, Yama14a], insbesondere Kontaktflächen, die unter hoher mechanischer, zyklischer Belastung arbeiten und einen hohen Verschleißwiderstand aufweisen sollen [Chom06];
- b) Bearbeitung dünnwandiger Bleche [Hung10], Platten bis zu 0,05 mm Stärke [Saku81], Wellen, Rohre bis zu 0,4 mm Innendurchmesser [Yama07], Kugeln [Shin90], Innenlagerringe [Want02], Resonator für Messapparatur [Want02], V-förmige Mikrostrukturen und Fresnel-Linsen [Guo16, Guo18];
- c) Polieren komplexer DOE Linsen (diffractive optical element) [Suzu14], asymmetrischer optischer Linsen [Saku81] und Hüftgelenkimplantaten [Yama14a];
- d) Zerspanwerkzeugvor- und Schichtnachbehandlung sowie Verrundung scharfer Kanten und Oberflächenverfestigung von Zerspanwerkzeugen einschließlich Wendeschneidplatten [Baro86, Bier13a, Bier13b, Karp09, Klim17, Yama12];
- e) Nachbehandlung von SLM-gefertigten Bauteilen zur signifikanten Reduzierung der Oberflächenrauheit [Wu18, Yama17];
- f) Gratentfernung bei Bohrungen von 5 mm Durchmesser in Ni-Legierung [Jiao19];
- g) Oxidschichtentfernung [Baro86] und Vorbearbeitung von Blechen sowie anderer Bauteile vor dem Schweißen [Chom06].

Bearbeitbare Werkstoffe: Durch das MAP werden sowohl ferromagnetische Stähle [Böge14] und Nickellegierungen [Jiao19] als auch para- und diamagnetische Werkstoffe, wie die Aluminium- [Juda13, Liu14, Muli11, Vahd16], Kupfer- [Kala14], Kobaltchromlegierungen [Yama14a] sowie Keramik [Shin90], Glas [Baro86], HSS [Karp09], HM [Yama12, Yama14b] und Arc-PVD-Beschichtung [Bier13a, Bier13b] bearbeitet. Dabei wird am häufigsten das MAP der Edelstähle untersucht [Fox94, Guo16, Guo18, Hung10, Kala15, Kang12a, Kang12b, Kani17, Nave18, Ntez14, Shuk17, Sun18, Verm17, Wu18, Yama05, Yama07, Yama11, Yama15, Yama17]. Generell wird das Magnetfeld durch die ferromagnetischen Werkstücke verstärkt, günstige Prozessbedingungen erzeugt und die Abtragsleistung intensiviert. Para- und diamagnetische Werkstoffe beeinflussen vernachlässigbar das äußere Magnetfeld, deswegen werden höhere magnetische Flussdichten oder ein zusätzlicher Magnet bzw. ferromagnetisches Bauteil hinter dem Werkstück benötigt, um die äquivalente Prozessfähigkeit bzw. Abtragsleistung zu gewährleisten [Baro86, Saku81].

2.3.2 Verfahrenskinetik

Im letzten Jahrhundert wurden über 250 Kinematikvariationen für den Einsatz des magnetabrasiven Polierens entwickelt, welche häufig als eine separate Anlage für die Bearbeitung der Plan-, Außenrund-, Innenrund- oder Freiformflächen unter Einsatz von Permanent- oder Elektromagneten unterschiedlicher Form, Anzahl und Anordnung konzipiert wurden [Baro86]. Heutzutage werden nur wenige Kinematiken weiterentwickelt und eingesetzt. Dazu gehören das Polieren von Planflächen, Wellen, dünnwandigen Rohren und unterschiedlichen Zerspanwerkzeugen, wie Bohrer, Fräser, Gewindebohrer. Deren detaillierte Beschreibung mit relevanten Eckdaten ist im Bild 2.8 dargestellt.



- 1) Am meisten verwendete Magnete. 2) Erzielte Oberflächengüte. 3) Wst.-Abmessungen.
 4) Wst.-Werkstoff. 5) Besonderheit. 6) Publikationen. a) Werkstück. b) PM / EM. c) Kern.

Bild 2.8: Typische Kinematikvariationen beim magnetabrasiven Polieren

Zudem wurden in den letzten Jahren weitere Einsatzfälle bzw. Kinematiken des magnetabrasiven Polierens zum Teil untersucht:

- a) Polieren von Hüftgelenken aus Kobalt-Chrom mittels eines Elektromagneten mit konischem Kern, wobei das Werkstück in einem Arm des 6-Achs-Roboters auf dem ferromagnetischen Unterteil eingespannt wurde [Yama14a];
- b) Rohrbearbeitung (Durchmesser 22 mm) mit einem Werkzeug aus zwei entgegengerichteten Permanentmagneten und einem Eisenkern dazwischen, wobei ein Magnet manuell verstellbar ist (1.4301, $R_a = 0,54 \mu\text{m} \rightarrow R_a = 0,056 \mu\text{m}$) [Verm17];
- c) Bearbeitung einer Platte durch die Kombination von einem Plan-MAP-Werkzeug mit Permanentmagneten und ECM-Verfahren in einer Elektrolytwanne (1.4301, $R_a = 0,18 \mu\text{m} \rightarrow R_a = 0,02 \mu\text{m}$) [Liu14, Sun18];
- d) Bearbeitung einer Platte durch die Kombination von zwei gegenüberstehenden Plan-MAP-Werkzeuge mit Permanentmagneten und chemo mechanical polishing (Wolfram, $R_a = 0,33 \mu\text{m} \rightarrow R_a = 0,068 \mu\text{m}$) [Siha15], sowie mittels Ultraschallanregung des Bauteiles bei gleichem Versuchsaufbau (Wolframkarbid, $R_a = 0,33 \mu\text{m} \rightarrow R_a = 0,046 \mu\text{m}$) [Siha17];
- e) Bearbeitung von V-förmigen Mikrostrukturen und einer Fresnel-Linse durch lineare Bewegung der Körner entlang der Strukturen, welche durch Ultraschallanregung des Permanentmagneten unter dem Bauteil realisiert wurde (1.4401, $R_a = 2,23 \mu\text{m} \rightarrow R_a = 0,32 \mu\text{m}$) [Guo16, Guo18];
- f) Polieren von komplexen Linsen (DOE – diffractive optical element) mittels einer Vorrichtung mit Planetenbewegung, wobei das Magnetfeld und die ferromagnetischen Partikel als Unterstützung genutzt wurden, um die abrasiven Körner (Ceriumoxid) mit einer Scheibe gleichmäßig an die Linsenoberfläche zu drücken und das Eindringen der Körner zu gewährleisten (Silizium, BK7 Glas, $R_z = 100 - 300 \text{ nm} \rightarrow R_z = 7 - 10 \text{ nm}$) [Suzu14];
- g) Polieren unbeschichteter HM-Wendeschnidplatten auf einer CNC-Maschine mittels eines Werkzeuges mit Permanentmagnet und Eisenkern sowie einer ferromagnetischen Unterlage (Standzeiterhöhung der WSP bis zu 100% bei der Bearbeitung von Ti6Al4V) [Yama12, Yama14b];
- h) Gezielte Schneidkantenverrundung (auf $12 - 18 \mu\text{m}$) und Spannutpolieren (bis zu $R_z = 1 \mu\text{m}$) von HSS-Bohrern vom Durchmesser $d = 6,8 \text{ mm}$ in einer Ringbadanlage (Standzeiterhöhung bis zu 80% beim Bohren von 1.0570) [Karp09].

2.3.3 Prozessvor- und -nachteile

Vorteile: Das magnetabrasive Polieren ermöglicht die Erzeugung sehr hoher Oberflächengüten [Fox94, Muli11, Nave18, Yama14a] bis zu $R_a = 0,003 \mu\text{m}$, $R_z = 0,03 \mu\text{m}$ [Hash16a] und Reduzierung der Mikrowelligkeit bis zu 50% [Want02]. Durch die Einbringung von Druckeigenspannungen [Yama17] in Höhe bis zu 1400 MPa in der Schichtdicke bis zu $5 \mu\text{m}$ [Chom06], Glättung der Oberfläche und Vermeidung von Oberflächenbeschädigungen [Shin90] wird die Korrosions- [Klim17] und Verschleißbeständigkeit erhöht, z.B. Reduzierung des Oberflächenverschleißes der untersuchten Wellen um 300% im Vergleich zu geschliffenen Proben [Yama14b]. Darüber hinaus ist MAP für die Zerspanwerkzeugvor- und Schichtnachbehandlung geeignet, reduziert die Rauheit (bis $R_a = 0,025 \mu\text{m}$) [Yama12], Reibung und Adhäsion, vermeidet Gratbildung, stellt einen definierten Werkzeugradius ($3 - 50 \mu\text{m}$) ein, entfernt die Droplets nach der Arc-PVD-Beschichtung sowie erhöht die Standzeit bis zu 200% [Bier13a, Bier13b, Karp09, Tika09, Yama12, Yama14b]. Außerdem wird eine Verfahrenskombination mit ECM [Liu14, Sun18], CMP [Siha15, Siha17] oder US [Muli11, Siha17] für die Erhöhung der Oberflächengüte oder Abtragsleistung besonders für die Zerspanung harter Werkstoffe ermöglicht. Das magnetabrasive Pulver passt sich zu der Oberfläche an, kopiert die Kontur aus vorherigem Bearbeitungsschritt [Chan02, Juda13, Saku81] und ist durch hohe Pulverumwälzung bzw. Selbstschärfung, fehlende Notwendigkeit des Abrichtens, sehr niedrige Prozesstemperatur und präzise Kraftsteuerung sowie „Bindungshärte“ durch das Magnetfeld gekennzeichnet. Darüber hinaus setzen sich keine Späne para- und diamagnetischer Werkstoffe auf dem magnetabrasiven Pulver ab [Chan02, Chom06, Jain09, Juda13].

Nachteile: Durch die Abriebpartikel, Zersplitterung der Körner und Öl bzw. KSS bildet sich Schlamm auf der Werkstückoberfläche, welcher in zusätzlichen Arbeitsschritten entfernt werden muss. Im ungünstigsten Fall bzw. bei der Inkompatibilität im chemischen System Werkstoff-Schneidstoff-KSS führt eine solche Schlammbildung zur Prozessstörung und signifikanten Reduzierung der erreichten Oberflächengüte. Für das MAP wird eine spezielle magnetabrasive Pulverart benötigt, die ausschließlich für dieses Verfahren geeignet ist und heutzutage am Markt von einzelnen Anbietern zur Verfügung gestellt wird. Eine intensive Bearbeitung von para- und diamagnetischen Werkstoffen kann ohne magnetische Unterlage bzw. zusätzlichen Gegenmagnet nur schwierig realisiert werden [Chom06, Jain09, Juda13, Saku81].

2.3.4 Magnetabrasives Pulver

Der Schneidstoff für das magnetabrasive Polieren soll neben abrasiven auch über gute magnetische Eigenschaften verfügen. In der Kombination dieser Anforderungen liegt die Verwendung eines einzigartigen Pulvers im Vergleich zu allen anderen Zerspanverfahren mit undefinierten Schneidkanten begründet. Magnetabrasives Pulver wird nach dem Herstellungsverfahren und der historischen Entwicklung in drei Gruppen (Tabelle 2.7) unterteilt [Saku81]:

- 1) mechanisches Gemisch – mechanische Vermischung der magnetischen und abrasiven Partikeln zu einer homogenen Masse;
- 2) Cermets – pulvermetallurgische Herstellung durch Pressen, Sintern, Mahlen und anschließendes Sieben in definierte Fraktionen;
- 3) Schmelzezerstäubungspulver – die Schmelze wird in Luft, Wasser oder Schutzgas zerstäubt, sodass die Pulverpartikel mit starken magnetischen und abrasiven Eigenschaften kristallisiert werden.

Tabelle 2.7: Vergleich der magnetabrasiven Pulverarten [Olik90, Saku81]

Parameter	mechanisches Gemisch	Cermets	Schmelzezerstäubung
magnetischer Grundwerkstoff	Fe, FeNiAl-, FeNiAlCo-Legierungen		
abrasiver Schneidstoff	Al ₂ O ₃ , SiC, CBN, Diamant	Karbide (TiC, WC, ZrC, Cr ₃ C ₂ , W ₂ B ₅), Oxide (Al ₂ O ₃ , SiO ₂), Boride (TiB ₂ , ZrB ₂)	
abrasiver Anteil [%]	20 – 50	10 – 30	10 – 30
Korngröße [µm]	5 – 1000	5 – 1000	5 – 1000
Abtragsleistung	hoch	sehr hoch	mittel
Standzeit [min]	1 – 2	3 – 5	40

Das mechanische Gemisch gehört zu einer der ersten Entwicklungen von magnetabrasivem Pulver und wird durch niedrige Herstellungskosten, dem möglichen Diamanteinsatz aber auch durch sehr geringe Standzeit, schnelle Segregation im Einsatz und während der Lagerung sowie insgesamt schlechte magnetische Eigenschaften in Kombination mit einer begrenzten Auswahl an MAP-Kinematik gekennzeichnet [Olik90, Saku81]. Trotzdem wird diese Pulverart bis heute in den meisten wissenschaftlichen Arbeiten aufgrund der einfachen Herstellung durch das Vermischen von Eisenkörnern mit Aluminiumoxid [Juda13, Kala14, Kala15, Kang12b, Ntez14, Siha17, Sun18, Vahd16, Wu18, Yama07, Yama11, Yama14a, Yama15],

Siliziumkarbid [Chan02, Fox94, Kani17, Liu14, Muli11] und Diamant [Kang12a, Nave18, Yama12, Yama14b] eingesetzt. Die Korngröße beträgt dabei von 5 μm bis zu 1 mm in Abhängigkeit vom Bearbeitungsziel, z.B. ob viel Werkstoff abgetragen werden muss oder die Oberfläche poliert wird. Die Korngröße der magnetischen Partikel wird meistens größer als die der abrasiven Partikel gewählt [Olik90].

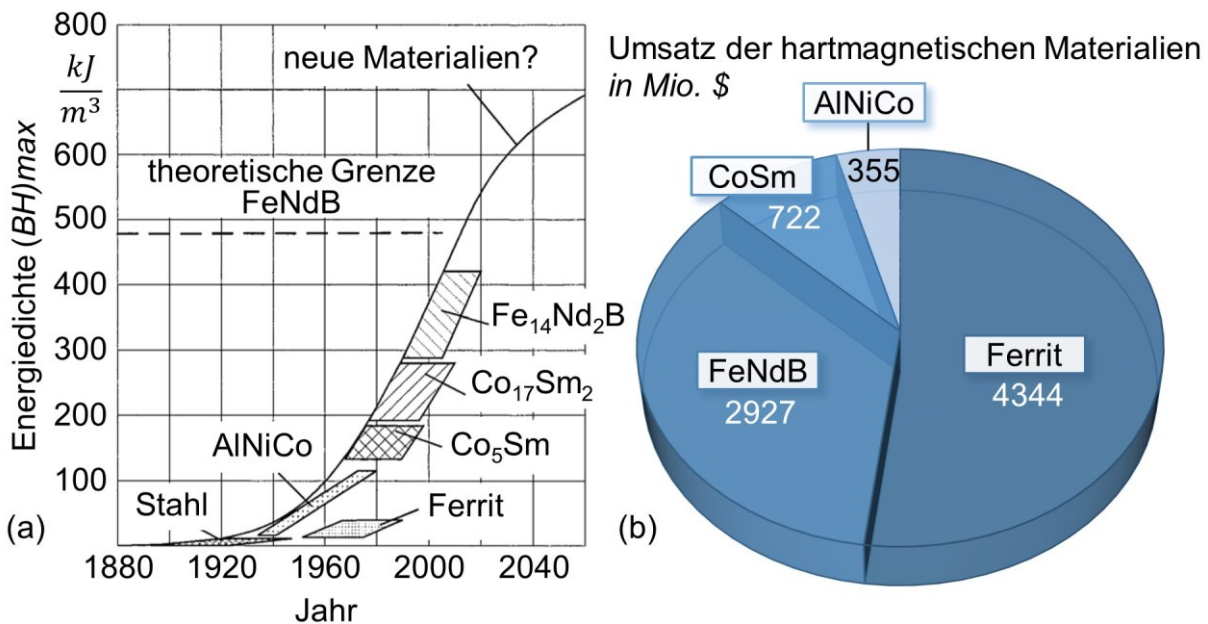
Pulver bestehend aus Cermets weisen magnetische und abrasive Eigenschaften in jedem Korn auf. Trotz sehr hoher Anfangsabtraggeschwindigkeit verlieren Cermets ihre Schneidfähigkeit durch das Ausbrechen der Abrasivpartikel aus der magnetischen Matrix sehr schnell. Außerdem werden bis zu 50% der Körner bei der Pulverherstellung als Ausschuss produziert [Saku81]. Pulvermetallurgisch hergestellte Abrasivpulver werden heutzutage in der Forschung oft untersucht [Fox94, Hung10, Karp09, Shin90, Shuk17, Yama17].

Die erfolgreichste Herstellungstechnologie von magnetabrasiven Pulvern basiert auf der Schmelzezerstäubung. Durch die Variation von Legierungselementen, Zerstäubungs-, Abkühlparametern und der thermischen Nachbehandlung können die Struktur, Form und Korngröße des Pulvers eingestellt werden. Dabei können unterschiedliche, hochharte Karbide, Oxide und Boride in die ferromagnetische Matrix fest eingebunden werden, sodass der Verschleiß ausschließlich durch die Kantenverrundung und die Vermeidung des Kornbruches gekennzeichnet ist. Aus diesem Grund weist das schmelzezerstäubte Pulver die mit Abstand höchste Standzeit von allen magnetabrasiven Pulverarten auf [Saku81]. Diese Pulverart wurde im letzten Jahrhundert in der ehemaligen Sowjetunion intensiv erforscht und eingesetzt. Heutzutage sind kaum Publikationen zu dieser Pulverart im englischsprachigen Raum verfügbar.

Die maximal mittels einer Pulverart erreichbare Oberflächengüte hängt zum größten Teil von der chemischen Kompatibilität des Werkstoffes und Schneidstoffes ab. Chemische Reaktionen und das Zusetzen des Pulvers soll daher vermieden werden [Baro86, Chom06]. Als eine Alternative zum magnetabrasiven Pulver wurde der Einsatz von magnetabrasiven Gels beim MAP von Wellen untersucht, welches aus Silikon als Medium, Eisenpartikeln und Siliziumkarbid als Schneidkörner bestand. Allerdings wurden in dieser Konstellation sehr geringe Abtragsleistungen erzielt sowie viel Zeit für das Erreichen hoher Oberflächengüte benötigt [Chou16, Wang11].

2.3.5 Permanentmagnete

Hartmagnetische Werkstoffe oder Dauermagnete besitzen eine sehr hohe Koerzitivfeldstärke $100 < H_c < 30.000 \text{ A/cm}$ und breite Hystereseurve. Die Haupteigenschaft dieser Werkstoffe besteht darin, ihr eigenes Magnetfeld aufrecht zu erhalten und einen starken Widerstand gegen Entmagnetisierung zu gewährleisten. Dauermagnete werden einmal aufmagnetisiert und behalten ihr starkes Remanenzfeld über einen sehr langen Zeitraum [Horn18]. Eine typische Herstellungsreihenfolge für Permanentmagnete besteht aus drei Schritten: Pulverpräparation, Sintern und Nachbehandlung bzw. Beschichtung. Aktuelle Entwicklungen nutzen die Möglichkeiten der additiven Fertigung. Diverse additive Fertigungsverfahren (FDM, SLA, SLM und EBM) werden für die Herstellung von Permanentmagneten komplexer Form untersucht [Popo18]. Die wichtigsten hartmagnetischen Werkstoffe, deren Eigenschaften, Marktanteile und historische Entwicklung sind im Bild 2.9 dargestellt.



Werkstoff	Zusammensetzung bzw. Zusätze [%]	Remanenz [T]	Koerzitivfeldstärke [kA/m]	Preis [\$/kg]
$Fe_{14}Nd_2B$	Fe, 30 – 34 Nd, 1 B	1,3 – 1,33	2000	60
$Co_{17}Sm_2$	Co, 24 – 27 Sm, 12 – 18 Fe	1,12 – 1,18	1500	128
AlNiCo	Fe, 24 – 35 Co, ≤ 15 Ni, ≤ 10 Al	1,05	140	71
Ferrit	Fe, 10 – 26 Co, 28 – 32 Cr	0,4	300	4

Bild 2.9: Hartmagnetische Werkstoffe: (a) historische Entwicklung, (b) Anteile am Markt [Cui18, Horn18, Kall08]

Den größten Marktanteil nehmen die Ferrite ein. Dank sehr niedriger Anschaffungskosten werden diese insbesondere in großen Motoren verwendet, wenn Motorgewicht und -dimensionen keine Rolle spielen. Ferrite weisen aber auch die niedrigste Remanenz und Energiedichte $\leq 50 \text{ kJ/m}^3$ auf. Die Permanentmagnete auf Basis von AlNiCo-Legierungen sind mit der Zeit unwirtschaftlicher geworden, da die $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ -Magnete über höhere Remanenz und signifikant höhere Koerzitivfeldstärke verfügen [Cui18]. Die Permanentmagneten aus Co_2Sm und $\text{Co}_{17}\text{Sm}_2$ wurden lange Zeit wegen einer hohen magnetischen Sättigung und Koerzitivfeldstärke eingesetzt. Dank einer sehr hohen Curie-Temperatur werden diese Legierungen bis heute in den meisten Hochtemperaturanwendungen verwendet [Horn18].

Weitere Werkstoffentwicklungen brachten am Markt noch stärkere und entmagnetisierungsbeständigere Materialien, wie $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ hervor. Die Weiterentwicklung von Herstellungstechnologien reduzierte die Kosten, sodass die Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete den heutigen Stand der Technik repräsentieren und sehr breiten Einsatz in der Industrie gefunden haben [Horn18]. Vor allem in Windkraftanlagen und Elektromotoren für die Automobilindustrie werden ausschließlich $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ -Legierungen aufgrund der höchsten Energiedichte $\geq 300 \text{ kJ/m}^3$ eingesetzt [Cui18]. In über 20% der modernen Windkraftanlagen werden Hochleistungssynchronmotoren mit starken Permanentmagneten eingesetzt. Die Anzahl der Windkraftanlagen steigt stetig. In Abhängigkeit vom Generatortyp werden von 80 bis 650 kg der hartmagnetischen Werkstoffe pro MW Leistung benötigt. Dazu gehören die Materialien der seltenen Erde wie Neodym (Nd), Praseodym (Pr), Dysprosium (Dy) und Terbium (Tb), deren Preis in der Zukunft nach Prognosen weiter steigen wird [Pave17].

Aktuell werden ca. 140.000 t pro Jahr an seltenen Erde produziert, davon 80% in China [Coey20]. Eine große Leistungslücke zwischen den Ferriten und $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ könnte in der Zukunft mit Legierungen ohne Verwendung von seltenen Erden besetzt werden. Dazu zählen MnAl, MnBi, FeNi, FeCo, HfCo, ZrCo, Fe-Co-Karbide und Eisennitride [Cui18]. Eine höhere Energiedichte von $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ hingegen ermöglicht z.B. die Reduzierung der Abmessungen von magnetischen Bandlaufwerken und Festplatten [Tren20]. Der Markt von Festplatten wächst heutzutage schnell und wird in der Zukunft mit Fokus auf die Digitalisierung weiter zunehmen. Allein Google benötigt ca. 300.000 Festplatten pro Monat [Cong15, Simo18]. Dies dokumentiert den hohen Bedarf an neuen hartmagnetischen Werkstoffen.

2.3.6 Stand der Technik – Zusammenfassung

Aus dem Stand der Technik werden folgende Erkenntnisse zusammengefasst:

- 1) Heutzutage werden sehr hohe Anforderungen an die Oberflächenqualität insbesondere Topographie und Oberflächenintegrität in den Branchen Werkzeug- und Formenbau, Medizintechnik, Luftfahrt, Optik und Astronomie gestellt.
- 2) Der angestrebte Mittenrauwert kann in unterschiedlichen Industriezweigen um ein bis zu drei Größenordnungen abweichen. Allerdings müssen dabei die Werkstückdimensionen, -werkstoffe und spezifische Branchenanforderungen wie sehr hoher Reflektionsgrad, hohe Bauteilzuverlässigkeit oder Vermeidung von Oberflächenbeschädigungen mitbetrachtet werden.
- 3) Das Marktvolumen der angegebenen Industriezweige steigt, was durch eine Erhöhung der Bauteilkomplexität und Erweiterung des Werkstückportfolios begleitet wird.
- 4) Moderne Finishtechnologien sind in der Lage hochqualitative Oberflächen zu erzeugen. Allerdings ist der Bedarf an neuen kostengünstigen und effizienten Technologien zur Endbearbeitung von Bauteilen gegeben, da die verfügbaren Finishverfahren prozessspezifische Restriktionen aufweisen und nur für bestimmte Industriezweige einsatzfähig sind.
- 5) Alle beschriebenen Technologien benötigen eine separate und meistens eine kostenintensive Anlage, was im Zusammenhang mit niedriger Produktivität zu sehr hohem Zeit- und Kostenaufwand für die Endbearbeitung führt.
- 6) Magnetabrasives Polieren ist seit mehreren Dekaden ein bekanntes Fertigungsverfahren, verfügt über 250 Kinematikvariationen und zahlreiche mögliche Einsatzgebiete und ermöglicht das Finishen von ebenen und rotationssymmetrischen Flächen bis hin zu komplexen Freiformflächen.
- 7) Magnetabrasives Polieren bildet viele Vorteile ab, die mit dem Einsatz auf üblichen Bearbeitungszentren in Form von einem MAP-Werkzeug die Fertigungskosten erheblich reduzieren können.
- 8) In Bezug auf die Verfahrenskinematik für die Plan- und Freiformflächenbearbeitung mittels eines MAP-Werkzeuges wurden in den letzten Jahren überwiegend para- und diamagnetische Werkstoffe untersucht, während hauptsächlich mechanische Gemische und Cermets als Pulverarten eingesetzt wurden.

3 Zielsetzung

Aus dem Stand der Technik folgt, dass ein hoher Bedarf an kostengünstigen und effizienten Finishtechnologien in unterschiedlichen Industriezweigen besteht. Der Einsatz des magnetabrasiven Polierens auf Bearbeitungszentren in Form von einem MAP-Werkzeug weist ein hohes Potential zum Finishen ohne Nutzung einer separaten, kostenintensiven Anlage auf. Fundierte wissenschaftliche Untersuchungen zu dieser Thematik sind aktuell nur begrenzt vorhanden. Daher ist das Ziel dieser Arbeit: **eine anwendungsbezogene Grundlage des magnetabrasiven Polierens auf Bearbeitungszentren zu generieren, um somit einen Beitrag zum Einsatz dieses Verfahrens in der Industrie zu leisten.**

Dafür sind grundlegende, ausführliche und anwendungsbezogene Untersuchungen des MAPs an Planflächen von ferromagnetischen Stähle auf BAZ unter Einsatz von schmelzezerstäubtem, magnetabrasivem Pulver, Handelsbezeichnung FerroMAP, und Permanentmagneten aus einer Neodymeisenborlegierung $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ erforderlich. Ein Überblick zu den durchgeführten Untersuchungen und deren Reihenfolge ist im Bild 3.1 dargestellt. Im Verlauf der Voruntersuchungen wurde eine signifikante Verbesserung der Oberflächengüte beim Einsatz von Deckelstrukturen konstatiert. Daher wurde das magnetabrasive Polieren mit den Deckelstrukturen in den Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit gestellt. Da definierte Deckelstrukturen den Prozess stark beeinflussen, werden **im ersten Schritt** relevante Prozessparameter umfangreich untersucht. Außerdem werden unterschiedliche magnetabrasive Pulverarten analysiert, da diese einen signifikanten Einfluss auf die erreichte Oberflächengüte für unterschiedliche Werkstoffe aufweisen. Um die Kornumwälzung und den Effekt der mechanischen Pulververdichtung zu intensivieren, werden **im zweiten Schritt** unterschiedliche Deckelstrukturen und fünf MAP-Werkzeugtypen analysiert. Darauf aufbauend werden **im dritten Schritt** unterschiedliche Maßnahmen unternommen, um die Prozessfähigkeit bei optimalen Prozessparametern, Deckelstrukturen und MAP-Werkzeugtypen zu erhöhen. Nachdem die Möglichkeiten einer Prozessintensivierung umfangreich bewertet werden, erfolgen Betrachtungen zur Bearbeitbarkeit unterschiedlicher Stahlsorten und zum Einfluss der Ausgangsoberfläche nach der Fräs- und Schleifbearbeitung. **Im vierten Schritt** werden die Kenngrößen analysiert, da diese für die grundlegende Beschreibung des Verfahrens relevant sind. Weiterhin zählt die Standzeit einer Pulvermenge zu den wichtigsten praxisrelevanten Größen. Nach ausführlichen Untersuchungen zum Plan-MAP werden die Erkenntnisse

im **fünften Schritt** auf eine Verfahrenskinematik zum Kugel-MAP der Freiformflächen übertragen und mit den ausgewählten Versuchsreihen referenziert.

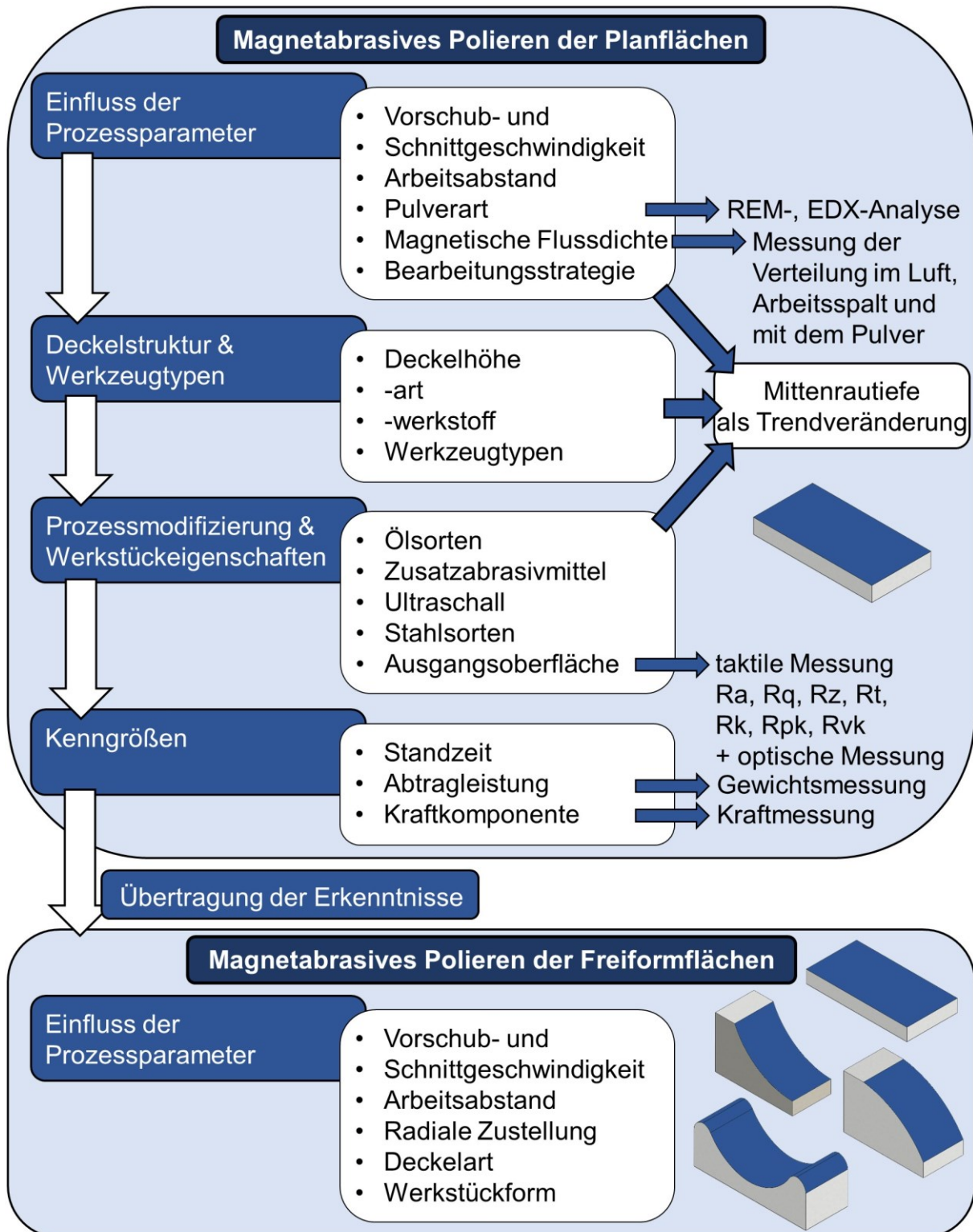


Bild 3.1: Schaubild über die durchgeführten Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit

4 Instrumentarium

In diesem Kapitel werden die eingesetzten Werkzeugmaschinen, Versuchswerkstoffe, Messinstrumente, entwickelte MAP-Werkzeuge inkl. der paramagnetischen Werkzeugaufnahme und neuartige Deckelstrukturen sowie eingerichtete Versuchsstände für die grundlegende Untersuchung des magnetabrasiven Polierens von Plan- und Freiformflächen auf Bearbeitungszentren näher erläutert. Außerdem wird die Versuchsplanung und -methode detaillierter dargestellt.

4.1 Versuchswerkstoffe

Die Versuche zum Einfluss der Prozessparameter, zum Einsatz unterschiedlicher Deckelstrukturen und Werkzeugtypen, zur Prozessmodifizierung, zum Einfluss der Werkstückeigenschaften sowie der Kenngrößen wurden an ferromagnetischem Baustahl 1.0037 durchgeführt. Einzige Ausnahme bildet das Kap. 7.5, in welchem unterschiedliche ferromagnetische Stahlsorten wie 1.2842, 1.2714 und 1.7225 sowie ein paramagnetischer Edelstahl 1.4301 in Blockform für die Ermittlung der Bearbeitbarkeit untersucht wurden. Bei allen Stahlsorten wurden die Härteprüfung und die Messung der chemischen Zusammensetzung durchgeführt, da diese häufig nicht exakt mit den Herstellerangaben übereinstimmen. Die Versuchswerkstoffe sind in der Tabelle 4.1 dargestellt und zeigen eine breite Streuung im Kohlenstoffanteil von 0,03% bis 0,1% sowie in der Härte von 150 bis 330 HV₁₀. Für Untersuchungen zur Freiformbearbeitung durch das magnetabrasive Polieren wurde ein paramagnetischer Edelstahl 1.4301 in Plattenform mit einem ferromagnetischen Unterteil aus dem Baustahl 1.0037 eingesetzt.

Tabelle 4.1: Versuchswerkstoffe

Werkstoff	HV ₁₀	Chemische Zusammensetzung [%]					
		C	Si	Mn	Cr	Ni	P, S, N
1.0037 ^(a)	150	0,1	0,18	0,88	0,17	0,19	
1.2842 ^(a)	200	0,9	0,26	1,96	0,24	0,02	
1.2714 ^(a)	250	0,53	0,19	0,8	1,11	1,68	
1.7225 ^(a)	330	0,39	0,22	0,86	1	0,14	<0,03
1.4301 ^(a)	300	0,03	0,47	1,67	18,46	8,16	
1.4301 ^(b)	185	0,04	0,52	1,44	18,6	8,04	

^(a) Blockform, ^(b) Plattenform

4.2 MAP-Werkzeuge

4.2.1 Zusammenbau des Werkzeugsystems

Das Werkzeugsystem zum magnetabrasiven Polieren mit einem BAZ besteht in der vorliegenden Arbeit aus den Komponenten: Werkzeugaufnahme, paramagnetischer Adapter, Gehäuse, $Fe_{14}Nd_2B$ -Permanentmagnet und Deckel mit spezifischen Strukturen (Bild 4.1). Die Werkzeugaufnahme mit dem Adapter wurden so konstruiert, dass alle entwickelten Versuchswerkzeugtypen eingespannt werden können. Die seitlichen Schrauben an der HSK-Aufnahme gewährleisten das Ausrichten des Adapters sowie die Reduzierung der Unwucht. Alle Bestandteile des Systems wurden durch eine Schraubverbindung befestigt. Die Permanentmagnete werden während der Bearbeitung durch den Deckel in Position gehalten. Unterschiedliche Gehäuse wurden für Werkzeugtypen definierter Größe, Anzahl und Position der Permanentmagnete entwickelt. In der Darstellung wurden der magnetische Südpol und der Nordpol farblich entsprechend blau und rot gekennzeichnet. Die Intensität und Ausrichtung des Magnetfeldes wurde anhand unterschiedlicher Anordnungen kommerziell verfügbarer Permanentmagneten analysiert und in sieben Versuchswerkzeugtypen variiert, welche nachfolgend umfassend beschrieben werden.

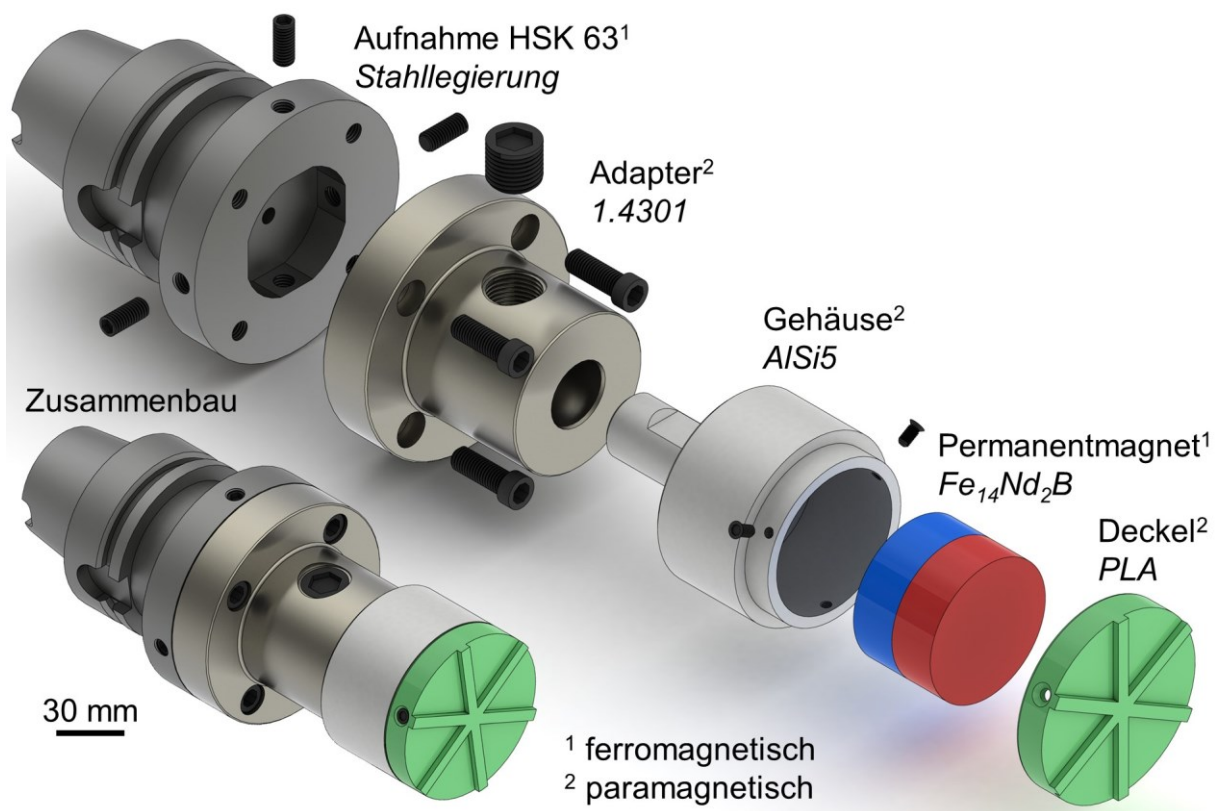


Bild 4.1: 3D-Modelle der Einzelteile und Zusammenbau des Werkzeugsystems zum magnetabrasiven Polieren auf Bearbeitungszentren

4.2.2 Paramagnetischer Adapter

Aus der Literaturrecherche (Kap. 2.3.5) folgt, dass die Nd₁₄Fe₂B-Permanentmagnete die höchste Remanenz aus allen heutzutage am Markt verfügbaren hartmagnetischen Werkstoffen aufweisen. Daher besteht die Gefahr der starken Magnetisierung von Werkzeugaufnahme und Spindel der Werkzeugmaschine, was zu Funktionseinschränkungen führen kann. Zwei Kompensationsmethoden können betrachtet werden. Entweder muss die Spindel nach jedem magnetabrasiven Polieren entmagnetisiert werden oder die Magnetisierung der Spindel muss grundsätzlich verhindert werden. In der vorliegenden Arbeit wurden Lösungen zur magnetischen Isolation von Spindel und Werkzeug betrachtet. Alle Standardwerkzeugaufnahmen verfügen über starke ferromagnetische Eigenschaften, deswegen wurde ein eigener Adapter aus paramagnetischem Werkstoff (Edelstahl 1.4301) entwickelt und umgesetzt, welcher zwischen dem Werkzeugfutter und MAP-Werkzeug eingesetzt wurde (Bild 4.2). Als Werkzeugaufnahme wurde ein HSK-A 63 Adapter (DIN 69893-1) der Fa. MAPAL Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG im Durchmesser von 80 mm gewählt, welcher eine präzise und verstellbare Einspannung des Werkzeugs ermöglicht. Für die Schnittstelle zur Aufnahme des MAP-Werkzeuges im Adapter wurde das Weldon-System gewählt, aufgrund der einfachen Fertigung, schneller Handhabung und der möglichen Einspannung von Aluminiumgehäusen. Die magnetische Flussdichte des Permanentmagneten sinkt mit dem Abstand (Adapterlänge 60 mm) exponentiell, daher werden die HSK-Aufnahme und Spindel nur minimal magnetisiert.

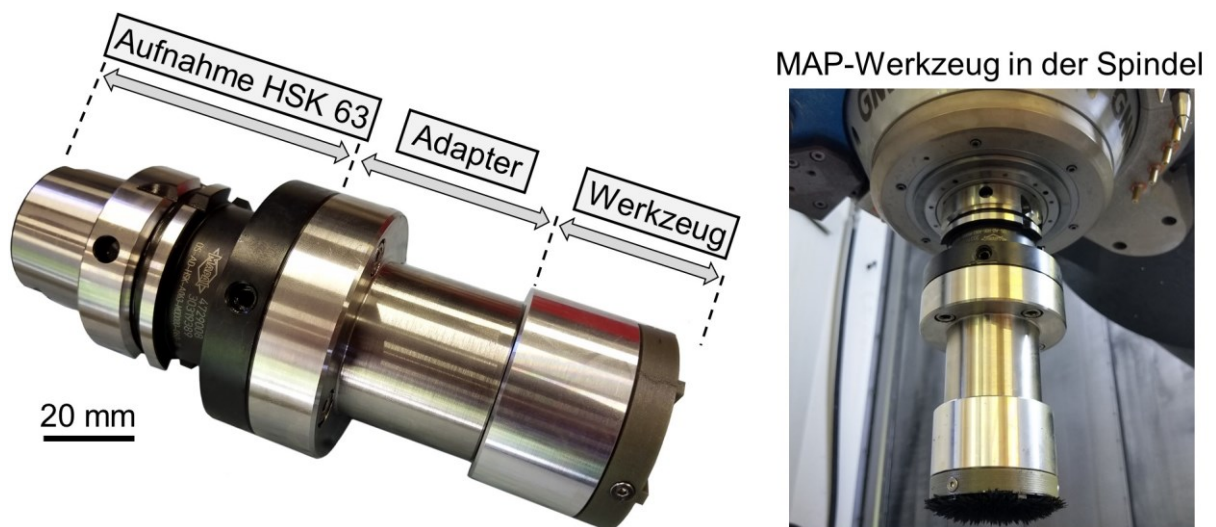


Bild 4.2: Aufnahme, paramagnetischer Adapter und MAP-Werkzeug

4.2.3 Versuchswerkzeug Typ A: D45 Zylinder

Der Werkzeugtyp A (Bild 4.3) wird mit einem relativ großen und starken Zylinderpermanentmagnet ($\varnothing 45 \times 30 \text{ mm}$) ausgestattet, der eine hohe magnetische Flussdichte im gemessenen Arbeitsbereich (max. $0,42 \text{ T}$) auf breiter Fläche gewährleistet (Bild 4.3d). Eine detaillierte Betrachtung der Messung der magnetischen Flussdichte wird in Kap. 5.5 vorgenommen, während der Versuchsstand zu dieser Messung in Kap. 4.4 beschrieben wird. Die Oberfläche auf dem realen Prototyp (Bild 4.3b) wurde entsprechend der Südpol- bzw. Nordpolseite farbig gekennzeichnet. Detaillierte Angaben zum Permanentmagneten wie Typ, Abmessungen, Anzahl und Haftkraft sind im Bild 4.3 unten rechts dargestellt. Die oben genannten Hinweise gelten für alle folgende Werkzeugtypen A-G.

Der Werkzeugtyp A ist durch eine einfache Konstruktion, Fertigung, Montage und Handhabung gekennzeichnet. Darüber hinaus wurde eine sehr hohe erreichbare Oberflächengüte unter Einsatz eines strukturierten Deckels in den Vorversuchen festgestellt. Daher wurde der Werkzeugtyp A als Basis-Plan-MAP-Werkzeug für alle grundlegenden Untersuchungen zum magnetabrasiven Polieren von Planflächen ferromagnetischer Werkstoffe eingesetzt.

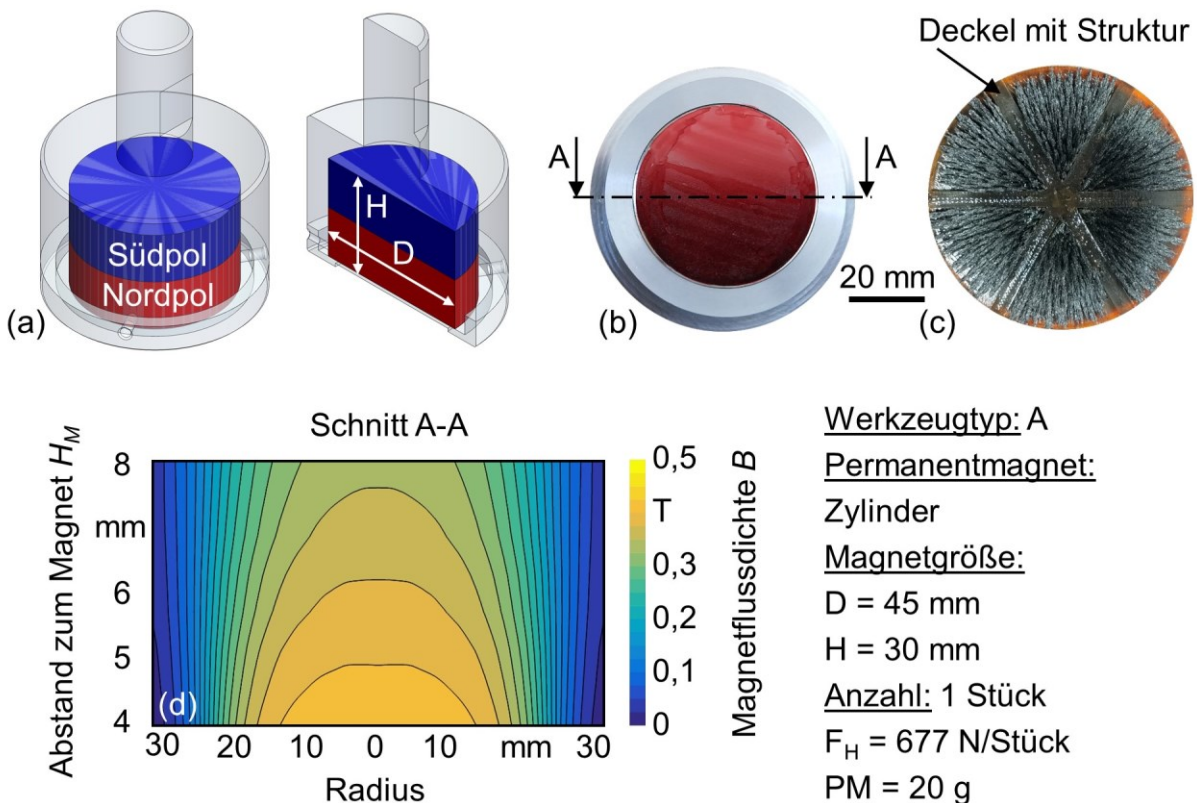


Bild 4.3: Versuchswerkzeug Typ A: (a) 3D-Modell, (b) realer Prototyp, (c) Pulververteilung nach dem Einsatz, (d) Verteilung magnetischer Flussdichte

4.2.4 Versuchswerkzeug Typ B: D60 IKZ

Der Werkzeugtyp B beinhaltet einen extrem großen und starken Zylindermagnet ($\varnothing 60 \times 30$ mm) mit Stufeninnenbohrung auf einen Durchmesser von 6 mm (Bild 4.4). Die Verteilung der magnetischen Flussdichte im Arbeitsspalt (max. 0,39 T) ist vergleichbar zum Werkzeugtyp A mit den Unterschieden, dass sich das hohe und gleichmäßige Niveau auf einen größeren Radius ausdehnt und das Magnetfeld im Zentrum aufgrund der Bohrung schwächer wird (max. 0,27 T). Der verwendete Permanentmagnet erzeugt eine sehr hohe Anziehungskraft von ca. 1200 N. Daher besteht ein Verletzungsrisiko während der Handhabung von ferromagnetischen Gegenständen in der Nähe des Magneten. Aus diesem Grund sollte ein Einsatz vom Werkzeugtyp B mit äußerster Vorsicht vorgenommen werden.

Die Innenbohrung kann für eine Kühlschmierstoffzufuhr genutzt werden, welche zusätzlich die Pulverumwälzung unterstützen kann. Die Welle (Bild 4.4a) ermöglicht dabei die Verwendung von austauschbaren Düsen unterschiedlicher Innendurchmesser von $\varnothing 0,2$ mm bis $\varnothing 1$ mm, was eine flexible Steuerung des IKZ-Drucks gewährleisten kann. In der Literatur wird generell ein sehr niedriger Druck von unter 5 bar für die Kühlschmierstoffzufuhr empfohlen [Chom06].

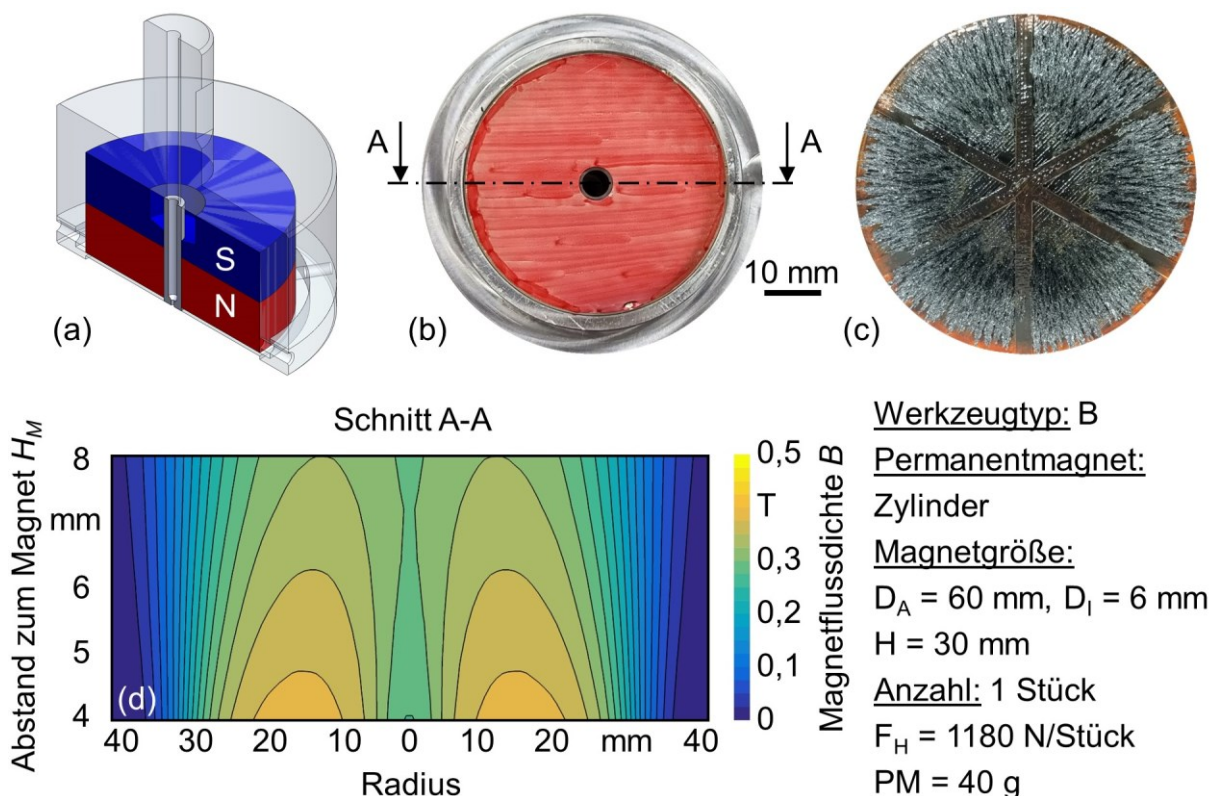
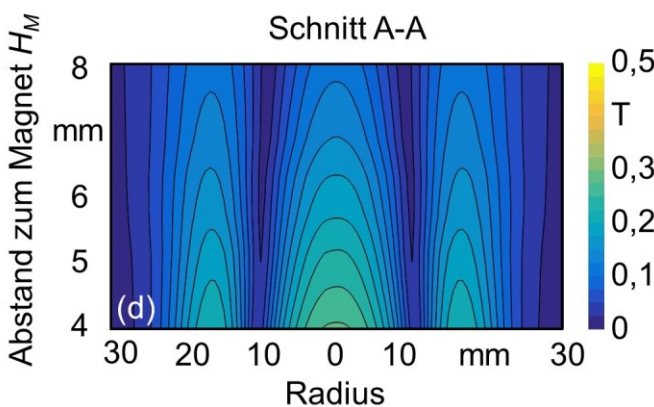
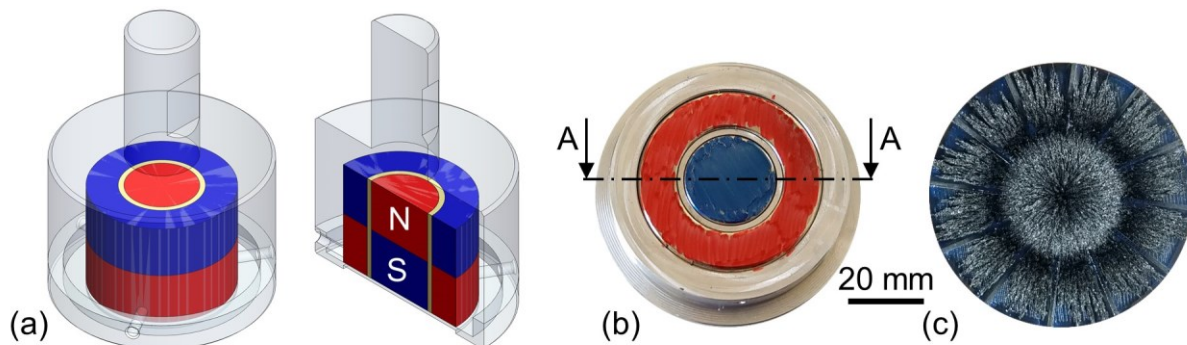


Bild 4.4: Versuchswerkzeug Typ B: (a) 3D-Modell, (b) realer Prototyp, (c) Pulververteilung nach dem Einsatz, (d) Verteilung magnetischer Flussdichte

4.2.5 Versuchswerkzeug Typ C: D40 Ring

Der Werkzeugtyp C besteht aus vielen relativ kleinen Permanentmagneten, die speziell ausgerichtet sind und nach der Montage im Paket eine Dimension von $\varnothing 40 \times 30$ mm aufweisen (Bild 4.5). Für das Werkzeug wurden die Magnete aus einem Standardsortiment verwendet, die nur in eingeschränkten Abmessungen (besonders Ringmagnete) zur Verfügung stehen. Die Ringmagnete (außen $\varnothing 40$ mm / innen $\varnothing 23$ mm) sind nur in der Höhe von 6 mm verfügbar. Daher wurden fünf Stück entsprechend der Anziehungsseiten kombiniert. Im Bild 4.5a wurde diese Sandwichbauweise aus Magneten vereinfacht als ein einziger Magnet dargestellt. In die Bohrung des Ringmagneten wurde eine Buchse (außen $\varnothing 23$ mm / innen $\varnothing 20$ mm) aus paramagnetischem Werkstoff (AlSi5) zur genauen Positionierung des Zylindermagnetes montiert. Zwei Zylindermagnete ($\varnothing 20 \times 15$ mm) wurden zuerst entsprechend der Ringmagnete zusammengebaut und danach in die Buchse eingefügt, sodass die Nordpol- und Südpolseite des Ring- und Zylindermagneten umgekehrt ausgerichtet sind (Bild 4.5b). Das bedeutet, dass das Magnetfeld sich am Werkzeug schließt und sich im Radius von ca. 11 mm ausgleicht (Bild 4.5d). Der Werkzeugtyp C verfügt über die schwächste magnetische Flussdichte (max. 0,29 T).



Werkzeugtyp: C

Permanentmagnet:

Ring und Zylinder

Magnetgröße:

$D_{RA} = 40$ mm, $D_{RI} = 23$ mm

$H = 6$ mm

$D_Z = 20$ mm, $H = 15$ mm

Anzahl: 5 und 2 Stück

$F_H = 206$ und 127 N/Stück

PM = 20 g

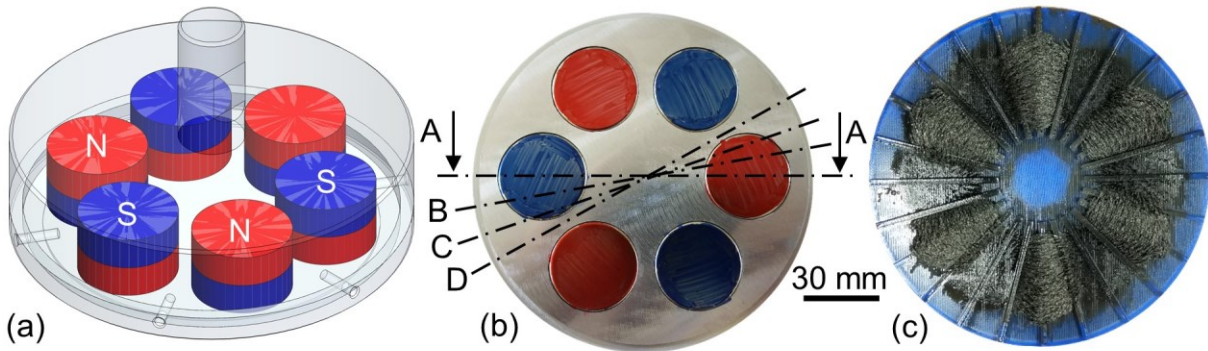
Bild 4.5: Versuchswerkzeug Typ C: (a) 3D-Modell, (b) realer Prototyp, (c) Pulververteilung nach dem Einsatz, (d) Verteilung magnetischer Flussdichte

4.2.6 Versuchswerkzeug Typ D: D100 1-Kreis

Der Werkzeugtyp D zeichnet sich durch einen großen Gehäusedurchmesser von 120 mm und sechs nacheinander unterschiedlich gepolten Zylinderpermanentmagneten aus, die jeweils aus zwei zusammengebauten Magneten (\varnothing 30 x 10 mm) bestehen und auf einem Kreis im Durchmesser von 70 mm mit 60° Kreisteilung positioniert sind (Bild 4.6a-c). Dabei werden die Magnetfeldlinien am MAP-Werkzeug geschlossen und das Pulver wird im Durchmesser innerhalb ca. 55 bis 85 mm zwischen den Magneten verteilt sodass die Mitte des Werkzeuges vom Pulver frei bleibt und eine sehr geringe Schnittgeschwindigkeit in der Nähe zur Rotationsachse vermieden wird.

Die beschriebenen Werkzeugtypen A, B und C sind durch eine vollständig symmetrische Verteilung der magnetischen Flussdichte in Umfangsrichtung gekennzeichnet. Der Werkzeugtyp D besitzt zwar eine symmetrische Positionierung der Permanentmagnete, diese führt jedoch zu einer komplexeren, ungleichmäßigen Verteilung der magnetischen Flussdichte. Dabei kann das Werkzeug in 30° Sektoren (z.B. zwischen dem Schnitt A-A und D-D) unterteilt werden, deren magnetische Flussdichte sich sektorenweise konstant ausbildet. Zur Untersuchung des einzelnen Sektors wurden drei Messebenen in 10° Schritt verwendet (Bild 4.6b). Die Ergebnisse sind im Bild 4.6d-f dargestellt. Das Magnetfeld im Schnitt D-D wird von zwei unterschiedlich gepolten Magneten ausgeglichen und ergibt Nullwerte, deswegen wurde dieser Schnitt nicht dargestellt.

Das Magnetfeld wirkt in der Mitte des Permanentmagneten am stärksten (Schnitt A-A) und beträgt max. 0,37 T bei einem Abstand von 4 mm zum Magnet. Die Verteilung der magnetischen Flussdichte des einzelnen Magneten nähert sich dem Werkzeugtyp A an mit dem Unterschied, dass das Magnetfeld schwächer und schmaler verteilt ist. Die weiteren Messebenen werden durch eine sinkende magnetische Flussdichte gekennzeichnet: max. 0,35 T und max. 0,28 T entsprechend für den Schnitt B-B und C-C. Zwischen den beiden Permanentmagneten fallen die Werte der magnetischen Flussdichte sehr schnell ab. Ähnliche Konstruktionen wie Werkzeugtyp D wurden in weiteren wissenschaftlichen Arbeiten erforscht. Dabei wurden vier anstatt sechs Permanentmagnete eingesetzt und das MAP der paramagnetischen Werkstoffe mit einer Unterplatte aus ferromagnetischem Werkstoff bzw. einem oder mehreren Permanentmagneten untersucht [Kala14, Kala15, Nave18, Siha15, Siha17].



Werkzeugtyp: D

Anzahl: 12 Stück

Permanentmagnet: Zylinder

$F_H = 196 \text{ N/Stück}$

Magnetgröße: D = 30 mm, H = 10 mm PM = 40 g

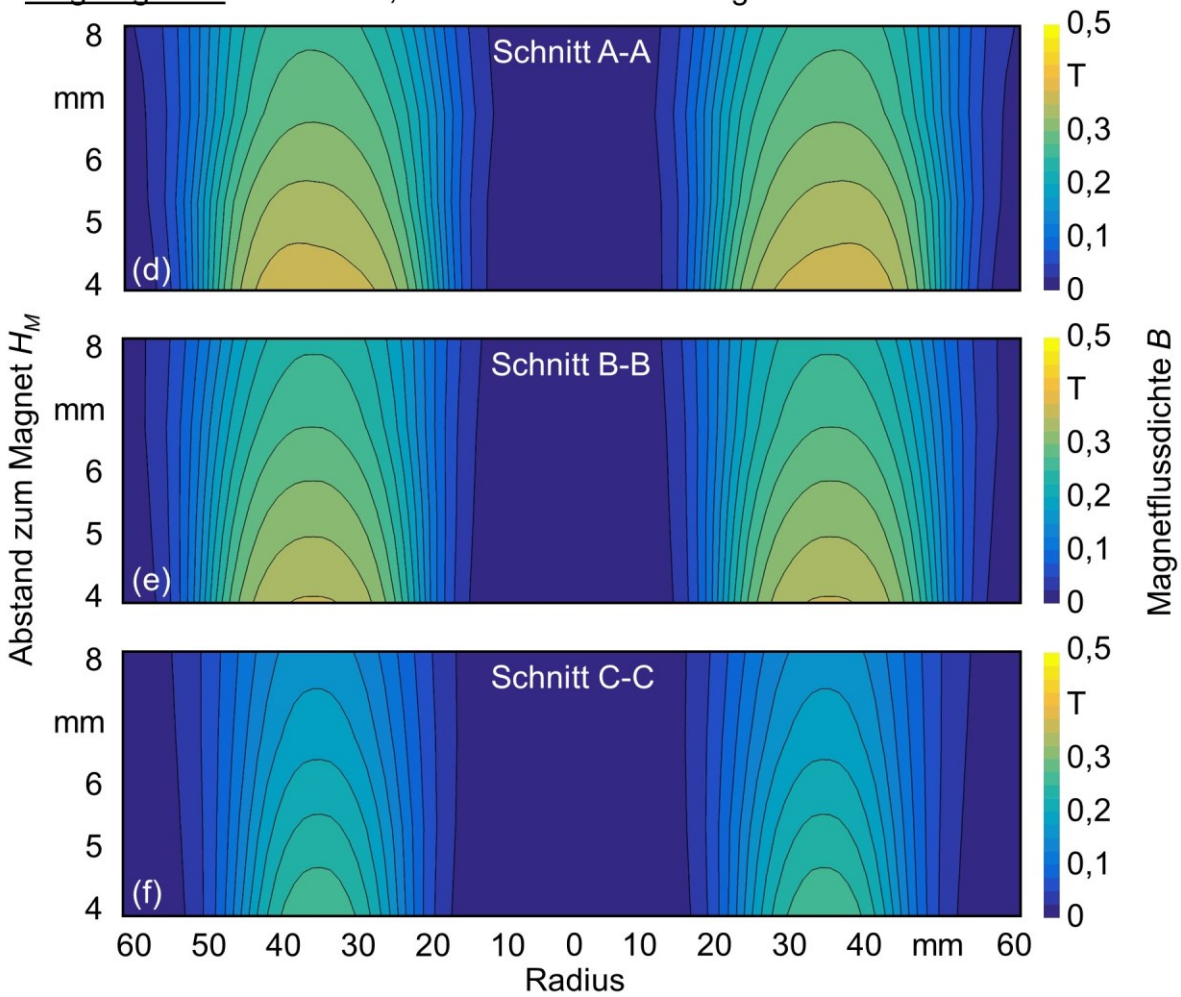


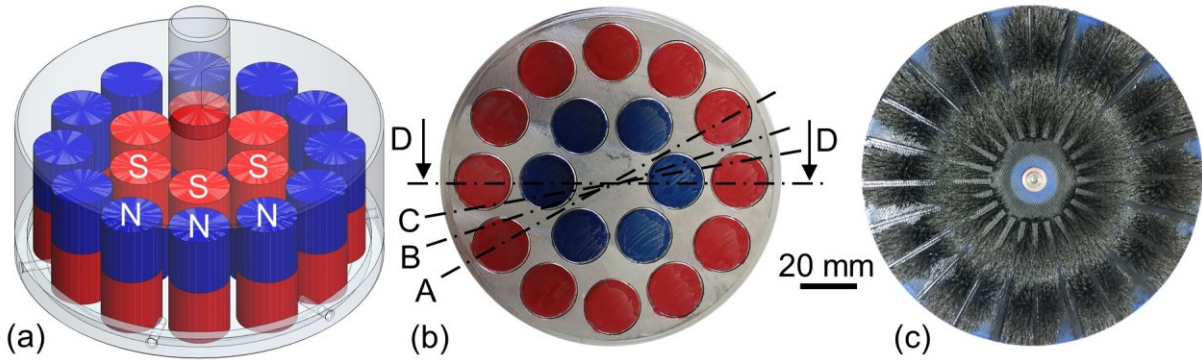
Bild 4.6: Versuchswerkzeug Typ D: (a) 3D-Modell, (b) realer Prototyp, (c) Pulververteilung nach dem Einsatz, (d-f) Verteilung magnetischer Flussdichte

4.2.7 Versuchswerkzeug Typ E: D100 2-Kreise

Der Werkzeugtyp E besteht aus vielen relativ kleinen Zylinderpermanentmagneten (\varnothing 20 x 20 mm), die paarweise in einem Gehäuse vom Durchmesser 120 mm zusammengebaut sind (Bild 4.7a-c). Die Permanentmagnete sind in zwei Kreisen unter einer 30° Teilung positioniert. Sechs Magnetpaare befinden sich auf dem inneren Durchmesser von 44 mm und zwölf Magnetpaare auf dem äußeren Durchmesser von 88 mm, sodass jeder Magnetkreis unterschiedliche Polung beinhaltet. Dabei schließt sich das Magnetfeld auf dem Durchmesser von ca. 66 mm. Analog dem Werkzeugtyp D bleibt das Zentrum des Werkzeuges frei von Pulver.

Die Verteilung der magnetischen Flussdichte über das gesamte Werkzeug scheint auf den ersten Blick sehr komplex. Bei genauerer Betrachtung können im Werkzeugtyp E auch die 30° Symmetriesektoren gefunden werden, die das Gesamtsystem charakterisieren. Dabei wurden vier Messebenen in 10° Schritten für die Untersuchung des einzelnen Sektors herangezogen (Schnitt A-A bis D-D). Die erste Messebene A-A verläuft zwischen den Permanentmagneten am Innenkreis (max. 0,28 T) und durch das Zentrum des Magneten am Außenkreis (max. 0,36 T). Bei den weiteren Messebenen B-B und C-C steigt die magnetische Flussdichte am Innenkreis auf max. 0,34 T und max. 0,38 T entsprechend. Das Magnetfeld am Außenkreis sinkt dabei und bleibt fast konstant auf dem Niveau von max. ca. 0,3 T. Die stärkste magnetische Flussdichte entsteht auf der letzten Messebene D-D. Dabei werden die Mitten der Permanentmagnete sowohl am Innen- als auch am Außenkreis getroffen. Die maximalen Messwerte betragen 0,38 T und 0,36 T.

Der Werkzeugtyp E verfügt über ein vergleichsweise starkes Magnetfeld, das über eine große Fläche wirkt. Daher wird eine große Pulvermenge durch das Werkzeug gehalten, die im größten Teil zwischen dem Innen- und Außenkreis aber auch auf den einzelnen Permanentmagneten am Außenkreis verteilt liegt (Bild 4.7c). Allerdings sind die Werkzeugtypen D und E in der Praxis auch durch eine erschwerte Montage der Permanentmagneten (benötigt zusätzliche Führungsteile), höhere Anfälligkeit für Unwucht als bei kleineren Werkzeugdurchmessern und einem vergleichsweise aufwändigen Deckelaustausch gekennzeichnet. Beim Wechsel des Deckels muss zuerst das magnetabrasive Pulver vollständig entfernt werden, um die Demontage der Magneten mit dem Deckel zu verhindern. Das magnetabrasive Pulver haftet extrem stark auf der Deckeloberfläche und erhöht somit den manuellen Arbeitsaufwand.



Werkzeugtyp: E

Anzahl: 36 Stück

Permanentmagnet: Zylinder

$F_H = 147 \text{ N/Stück}$

Magnetgröße: $D = 20 \text{ mm}$, $H = 20 \text{ mm}$ PM = 60 g

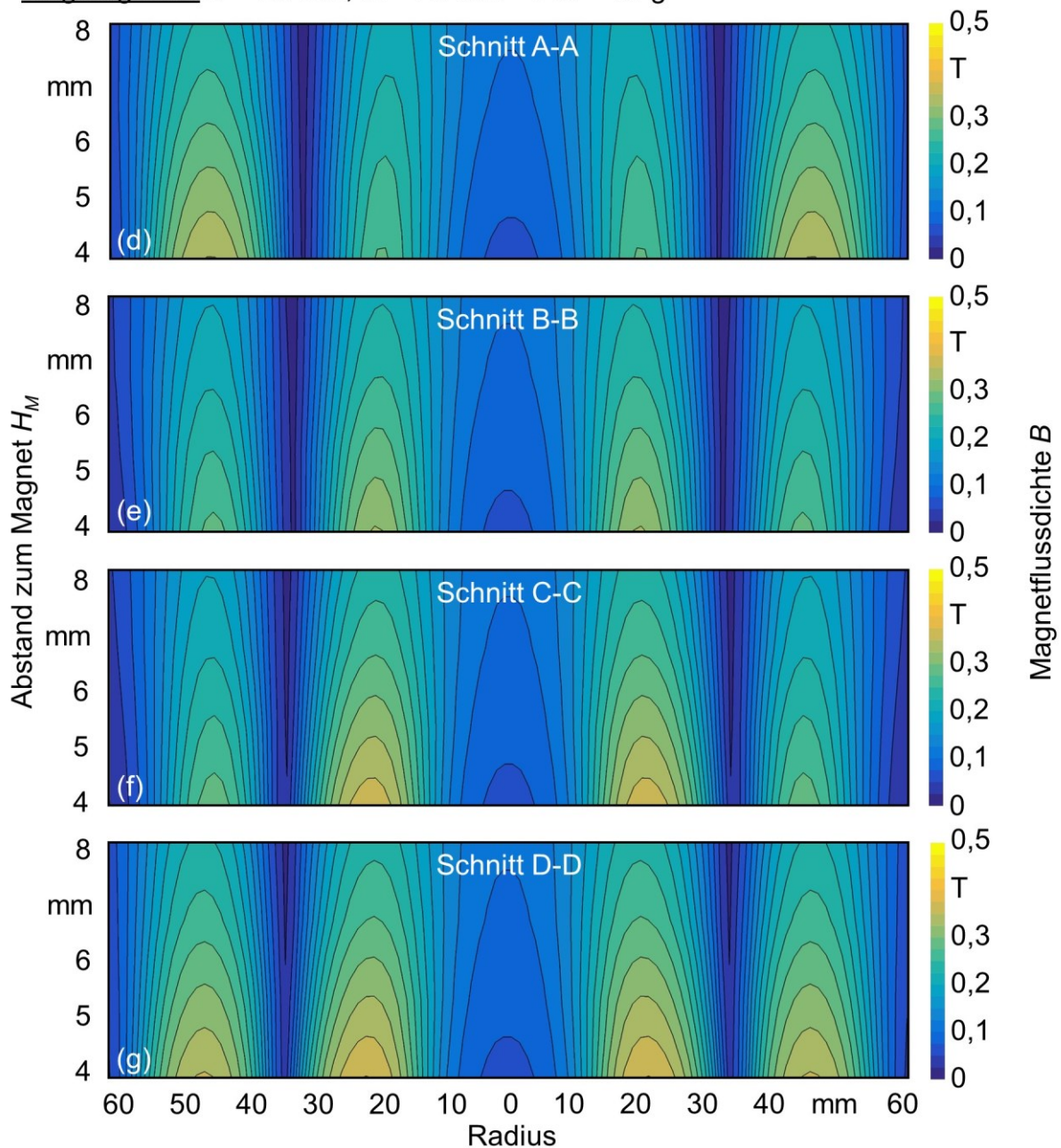


Bild 4.7: Versuchswerkzeug Typ E: (a) 3D-Modell, (b) realer Prototyp, (c) Pulververteilung nach dem Einsatz, (d-g) Verteilung magnetischer Flussdichte

4.2.8 Versuchswerkzeug Typ F: D45 US

Der Werkzeugtyp F beinhaltet den gleichen Zylindermagnet wie der Werkzeugtyp A (\varnothing 45 x 30 mm). Die Konstruktion der Gehäuse wurde jedoch für die ultraschallunterstützte Bearbeitung modifiziert. Da Aluminium- und Stahllegierungen für das Schrumpfen nicht geeignet sind, wurde eine Spannzangenaufnahme für die Versuche ausgewählt. In diesem einzelnen Fall wurde auf einen paramagnetischen Adapter verzichtet. Die Konstruktion der Gehäuse wurde dabei entsprechend angepasst bzw. verlängert, sodass der Permanentmagnet eine möglichst geringe Wirkung auf die Werkzeugaufnahme und Spindel aufweist (Bild 4.8a). Eine Stufenbohrung und der Einsatz von einer Al-Legierung (AlSi5) sorgen für ein geringeres Gewicht der Gehäuse, was zur Reduzierung der notwendigen Leistung des Schwingungsgenerators beitragen soll. Der zusammengebaute Werkzeugtyp F mit der ULTRASONIC-Aktoraufnahme der Fa. Sauer (DMG MORI AG) ist im Bild 4.8d dargestellt. Die Aktoraufnahme kann bei einer Frequenz bis zu 40 kHz eingesetzt werden und erzeugt eine Amplitude bis zu 10 μ m in axialer Richtung.

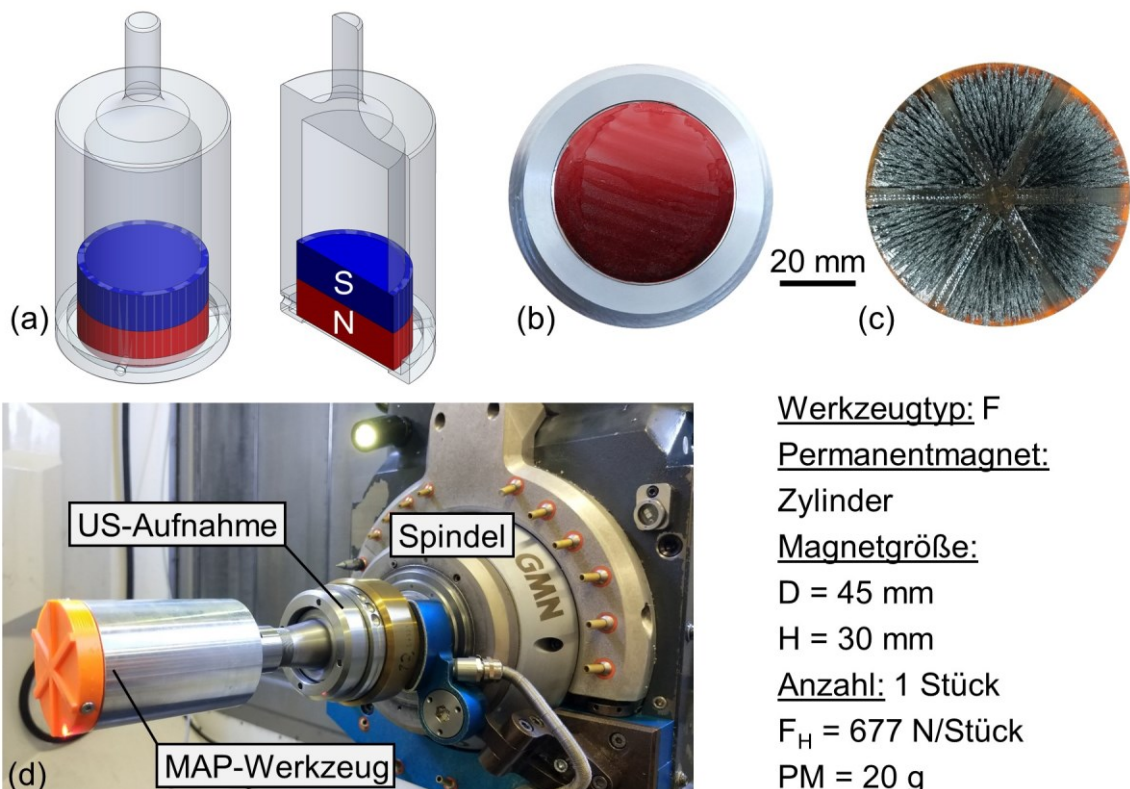


Bild 4.8: Versuchswerkzeug Typ F: (a) 3D-Modell, (b) realer Prototyp, (c) Pulververteilung nach dem Einsatz, (d) Foto des Werkzeuges mit der Ultraschallaufnahme auf der Werkzeugmaschine

4.2.9 Versuchswerkzeug Typ G: D40 Kugel

Der Werkzeugtyp Typ G (Bild 4.9a-d) beinhaltet einen der größten und stärksten verfügbaren kommerziell erhältlichen Kugelpermanentmagneten (\varnothing 40 mm). Der Kugelmagnet wird durch eine Kunststoffbuchse zylindrischer Form im Werkzeuggrundkörper positioniert und weist eine deutlich höhere magnetische Flussdichte (Bild 4.9d) im Vergleich zu den eingesetzten Zylindermagneten auf. Allerdings sinkt die magnetische Flussdichte mit steigendem Abstand vom Kugelmagnet deutlich schneller als bei den Zylindermagneten und beträgt z.B. im zentralen Messpunkt 0,68 T im Abstand von 1 mm bzw. 0,46 T im Abstand von 4 mm vom Kugelmagnet. Die magnetische Flussdichte sinkt ebenso mit steigendem Abstand von der Rotationsachse des Magnetfeldes. Der Werkzeugtyp G wird zur vereinfachten Darstellung im weiteren Verlauf der Arbeit als „Kugel-MAP“ bezeichnet und findet in den Untersuchungen zum magnetabrasiven Polieren von Freiformflächen Anwendung. Beim Kugel-MAP wird das Werkzeug unter einem Winkel von 60° zur Bearbeitungsoberfläche gestellt, um eine ausreichend hohe Schnittgeschwindigkeit zu gewährleisten. Allerdings ergeben sich ähnliche Werte von ca. 0,4 T im Abstand zum Magnet von 4 mm bei einem Winkel von 60° wie beim Werkzeugtyp A.

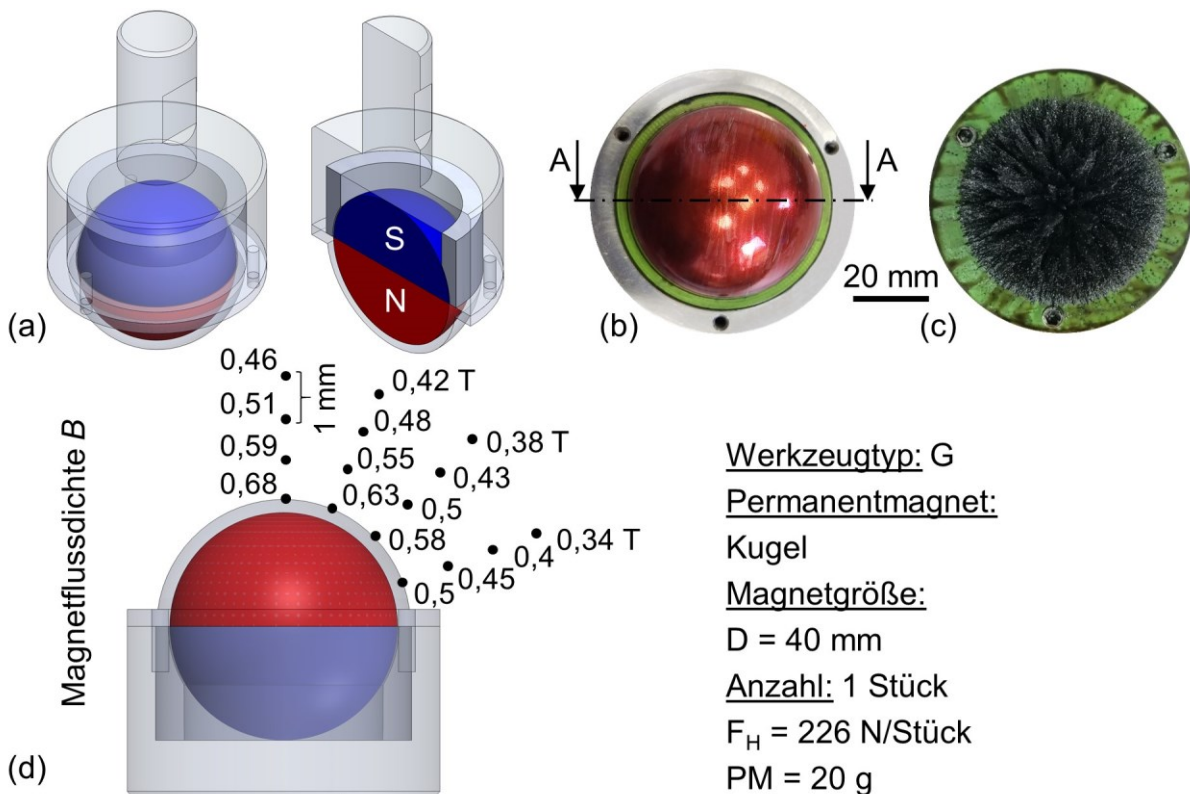


Bild 4.9: Versuchswerkzeug Typ C: (a) 3D-Modell, (b) realer Prototyp, (c) Pulververteilung nach dem Einsatz, (d) Verteilung magnetischer Flussdichte

4.2.10 Deckelstruktur

Untersuchungen zur Prozesswirkung einer definierten Deckelstruktur bilden einen innovativen Ansatz zur Prozessoptimierung, welcher bislang wissenschaftlich nicht betrachtet wurde (siehe Kap. 2.3). Im Laufe der Vorversuche wurde die positive Wirkung einer definierten Deckelstruktur dokumentiert, welche bei günstiger Auswahl das magnetabrasive Polieren und speziell die Kornumwälzung deutlich intensiviert aber auch bei ungünstiger Dimensionierung den Polierprozess fast vollständig eindämmen kann. Um die Wirkung der Deckelstrukturen genauer zu untersuchen, wurden 20 unterschiedliche Deckelstrukturen entwickelt (Bild 4.10) und getestet (Kap. 6.1). Die Strukturhöhe wurde mit 2 mm dimensioniert, während die Wandstärke zwischen dem Permanentmagnet und der Struktur 1 mm betrug. Die Vielfalt an Deckelstrukturen wurde am Werkzeugtyp A bei gleichen Prozessparametern untersucht. Die favorisierte Struktur wurde auf andere Werkzeugtypen übertragen und entsprechend dimensioniert. Die Deckelstrukturen wurden aus dem Kunststoff polylactic acid (PLA) durch additive Fertigung hergestellt. Der Einfluss der Strukturhöhe und des Deckelwerkstoffes werden im Kap. 6.2 und 6.4 dargestellt.

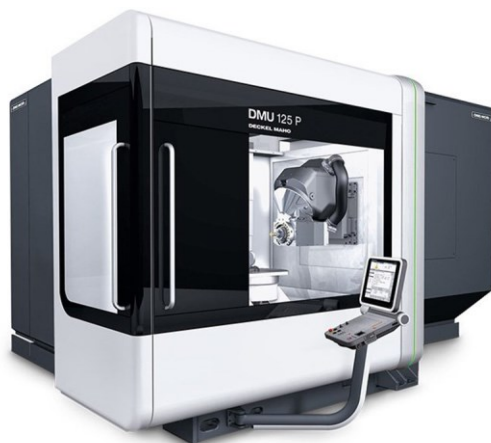


Bild 4.10: Unterschiedliche additiv-gefertigte Deckelstrukturen für den Werkzeugtyp A

4.3 Versuchsstände

4.3.1 Werkzeugmaschine

Alle Versuche zum magnetabrasiven Polieren wurden auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum der Fa. DMG MORI AG vom Typ DMU Ultrasonic 125 P durchgeführt. Die wichtigsten technischen Daten sind im Bild 4.11 dargestellt. Die verwendete Werkzeugmaschine verfügt über drei Linearachsen (X, Y, Z) einen Drehtisch (C-Achse) und einen Schwenkkopf (B-Achse), der die Bearbeitung von Planflächen bis zu komplexen Freiformflächen ermöglicht. Die Spindel verfügt über eine Schnittstelle HSK 63A zur Werkzeugaufnahme, generiert ausreichend Leistung und Drehzahl, um sowohl mit großem Messerkopf als auch kleinem Kugelfräser sehr hohe Ausgangsoberflächengüten für das MAP zu erreichen. Außerdem ermöglicht eine Zusatzausstattung der Spindel die Ultraschallbearbeitung, welche bei langen Werkzeugen kleinen Durchmessers eine Amplitude bis zu 10 μm und Schwingungsfrequenz bis zu 40 kHz gewährleistet.



Baujahr:

2016

Arbeitsbereich X- / Y- / Z-Achse:

1250 / 1250 / 1000 mm

Spindel:

bis 30.000 U/min, 85 kW, 40 Nm

Werkzeug-Schnittstelle:

HSK 63A nach ISO 12164

Bild 4.11: Technische Daten der Versuchsmaschine DMU Ultrasonic 125 P

4.3.2 Versuchsstand für die Fräs- und MAP-Bearbeitung am BAZ

Der Versuchsaufbau für die grundlegende Untersuchung zum magnetabrasiven Polieren auf dem Bearbeitungszentrum ist in Bild 4.12 dargestellt. Die Versuchsproben (130 x 50 x 50 mm = Länge x Breite x Höhe) wurden im Schraubstock nicht über die ganze Fläche, sondern mittels Grippstrukturen eingespannt, was zur Reduzierung von Schwingungen während des Planfräsens beigetragen hat und eine gleichmäßige, reproduzierbare Oberfläche gewährleistete. Das Werkstück wurde parallel zur Bauteillänge mit einem Messerkopf vom Typ Coromill 245 der Fa. Sandvik bearbeitet, der über vier flache Schneiden (Plattenform S) mit der Breite von 2,1 mm verfügt.

Danach wurde die Oberfläche eingölt (KMT 80, siehe Kap. 7.1) und durch MAP orthogonal zur Fräsrichtung bearbeitet. Der prozessbedingte Schlamm wurde manuell entfernt. Die Kühlluftdüse wurde in Teilen der Versuche werkstückseitig verwendet, um die Wärmeentwicklung im Prozess zu reduzieren, da diese negativen Effekte auf die magnetische Flussdichte und die Deformation des Kunststoffdeckels ausübt. Mit den Werkzeugtypen kleinerer Dimension (Typ A, C) wurden drei Bahnen auf einer Probe gefahren. Mit den größeren Werkzeugtypen B und D sowie E wurde diese Anzahl auf zwei und eins entsprechend reduziert, um eine Bahnüberschneidung zu vermeiden.

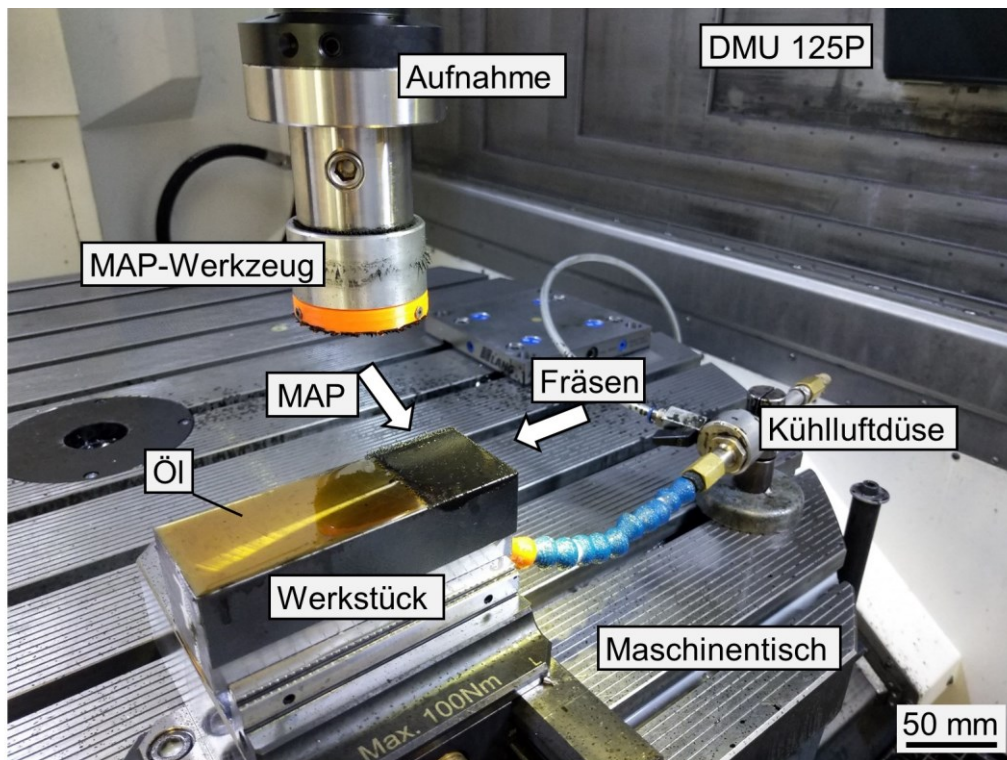


Bild 4.12: Versuchsstand für das magnetabrasive Polieren an der Werkzeugmaschine DMU Ultrasonic 125 P

4.3.3 Versuchsstände für die Messung der magnetischen Flussdichte

Für die erste Messung der magnetischen Flussdichte von unterschiedlichen MAP-Werkzeugtypen wurde die Axialsonde mit dem Hallsensor im Schraubstock auf dem Maschinentisch eingespannt und mit dem Messgerät sowie Laptop verbunden (Bild 4.13). Für die Ermittlung der genauen Position des Mittelpunktes vom Hallsensor im Maschinenkoordinatensystem wurde eine Kunststoffhülle, die die Steifigkeit des Sensors erhöht, mit einem Maschinentaster vermessen. Die MAP-Werkzeuge wurden in die Maschinenspindel eingespannt und in bestimmten festen Abständen radial zur Axialsonde (Messebene parallel zum Permanentmagnet) mit definierter

Vorschubgeschwindigkeit verfahren. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde auf die Messfrequenz abgestimmt, sodass im 0,5 mm Abstand ein Messpunkt aufgenommen wurde. Insgesamt wurden die Plan-MAP-Werkzeuge in fünf Messebenen bei einem Abstand zum Permanentmagnet von 4 bis 8 mm mit 1 mm Schritt in axialer Richtung gemessen. Die Messergebnisse und die Auswertung sind im Kap. 5.5 detaillierter ausgeführt. Zur Darstellung wurden die Messpunkte interpoliert und in einem Felddiagramm der Verteilung der magnetischen Flussdichte für die einzelnen Werkzeugtypen (Bilder 4.3d – 4.7g) dargestellt. Diese Messung liefert erste Informationen über die Ausbreitung des Magnetfeldes in der Luft. Allerdings wird die magnetische Flussdichte durch ein ferromagnetisches Werkstück und das magnetabrasive Pulver signifikant beeinflusst. Daraus resultiert ein Bedarf zur zusätzlichen Messung der magnetischen Flussdichte.

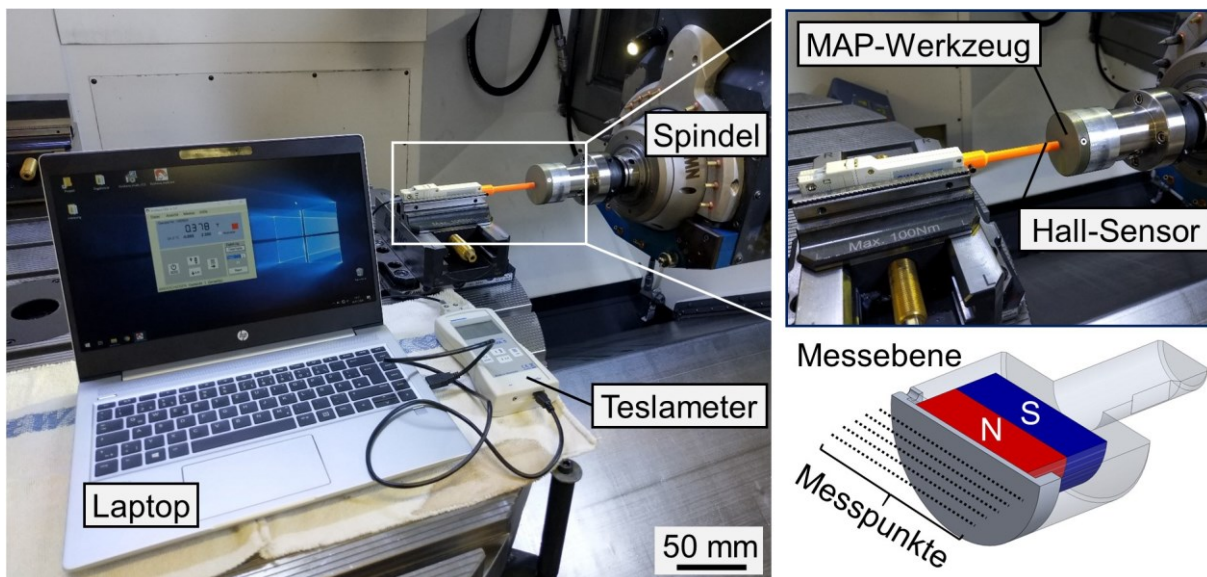


Bild 4.13: Versuchsstand für die Messung der magnetischen Flussdichte von MAP-Werkzeugen in Luft mittels Axialsonde (Hallsensor)

Ein weiterer Versuchsstand für die Messung der magnetischen Flussdichte im Arbeitsspalt mit dem ferromagnetischen Werkstück ist im Bild 4.14 dargestellt. Dabei wurden die Messungen mittels Transversalsonde auf drei Positionen in der Werkstückmitte, an der Kante und dazwischen durchgeführt. Der Hallsensor wurde fest positioniert und das MAP-Werkzeug quer zum Bauteil in definierten Abständen verfahren. Die Anzahl der Messpunkte und -ebenen wurde analog zur ersten Versuchsreihe gewählt. Auf die Verwendung von magnetabrasivem Pulver wurde aufgrund einer möglichen Beschädigung des Sensors verzichtet.

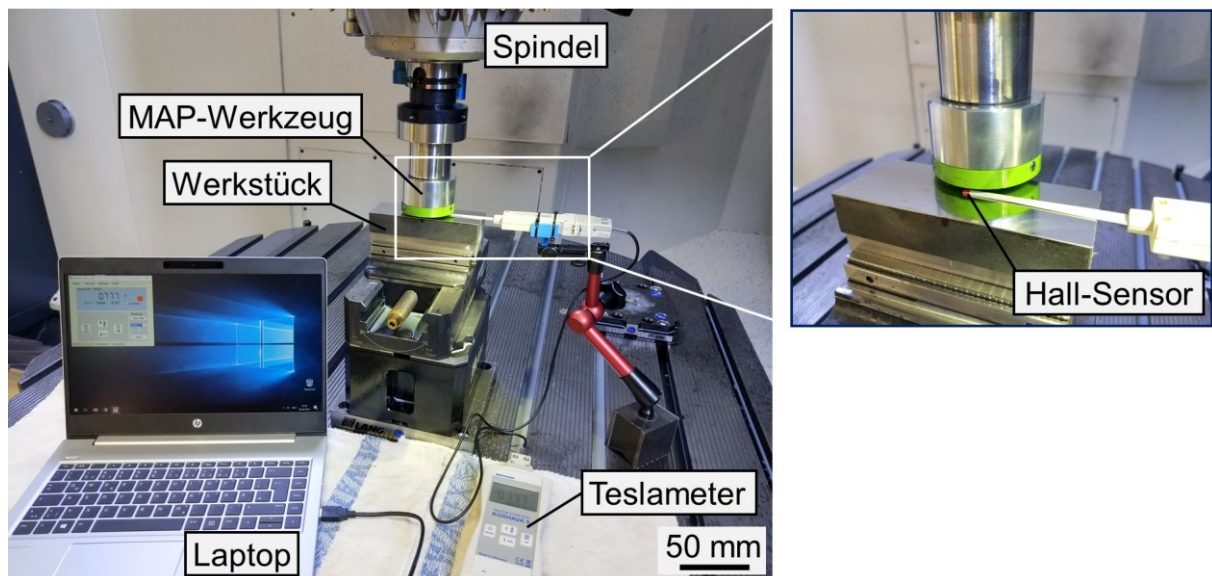


Bild 4.14: Versuchsstand für die Messung der magnetischen Flussdichte vom Werkzeugtyp A im Arbeitsspalt mittels Transversalsonde

Für die Ermittlung der magnetischen Flussdichte im Prozess unter Berücksichtigung des Pulvers wurde das Werkstück mit einer Bohrung für den Hallsensor versehen und vertikal im Schraubstock eingespannt (Bild 4.15). Die Kunststoffhülle diente dabei zum Schutz des Hallsensors vor mechanischer Beschädigung und Überhitzung.

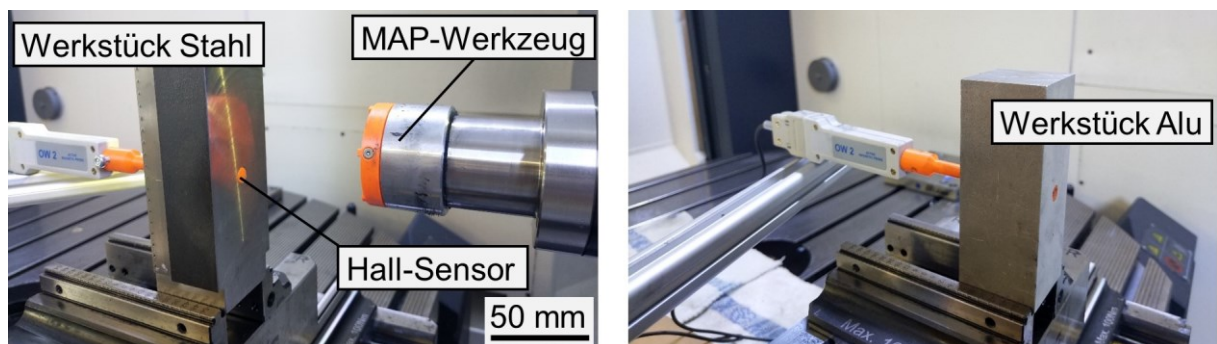


Bild 4.15: Versuchsstand für die Messung der magnetischen Flussdichte im Prozess mittels Axialsonde

Insgesamt wurde ein ferromagnetischer (1.0037) und paramagnetischer (AlSi5) Werkstoff ohne Pulver (das Werkzeug verfährt unter dem Arbeitsabstand in Luft) und mit Pulver (klassische Plan-MAP-Bearbeitung) untersucht. Die Ergebnisse sind im Kap. 5.5 näher erläutert.

4.3.4 Versuchsstand für die Messung der Kraftkomponenten

Für die Messung der Kraftkomponenten und Ermittlung der Zerspan- sowie Anziehungskraftkomponenten wurde das Werkstück direkt auf die Kraftmessplattform der Fa. Kistler Holding AG vom Typ 9257B mit Schrauben fixiert, welche auf dem Maschinentisch befestigt wurde (Bild 4.16). Das Plan-MAP-Werkzeug vom Typ A wurde für die Untersuchungen verwendet und quer zum Bauteil verfahren. Die Kraftkomponenten wurden in drei Richtungen gemessen und sind wie folgt ausgerichtet: X – parallel zur Vorschubbewegung, Y – orthogonal zur Vorschubbewegung, Z – parallel zur Rotationsachse. Zuerst wurden die Messwerte beim Verfahren des MAP-Werkzeuges ohne magnetabrasives Pulver aufgenommen, um die Anteile der magnetischen Anziehungskraft zu bestimmen. Danach wurden die Versuche mit Pulver während der klassischen Plan-MAP-Bearbeitung durchgeführt. Die Zerspankraftkomponenten wurden als Differenz von beiden Messergebnissen berechnet. Ein typischer Kräfteverlauf mit und ohne Pulver sowie die Änderungen der Passivkraft bei unterschiedlichen Prozessparametern (Arbeitsabstand, Abstand zum Magnet und Drehzahl) werden im Kapitel 8.3 näher erläutert.

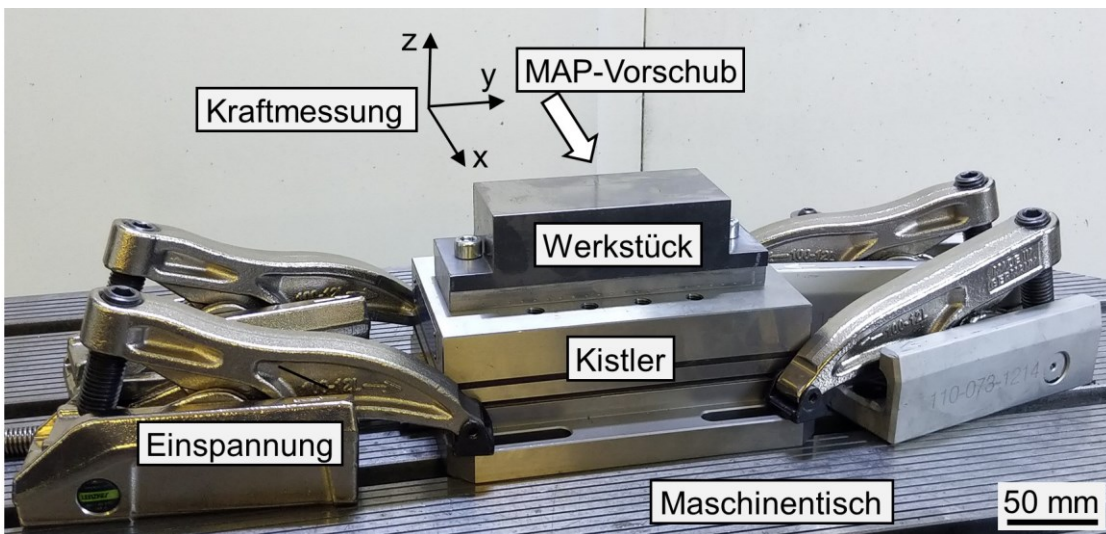


Bild 4.16: Versuchsstand für die Messung der Kraftkomponenten beim Plan-MAP mit und ohne magnetabrasives Pulver

4.4 Messtechnik

Die Messtechnik spielt eine Schlüsselrolle für die Aufnahme der Ergebnisse und die grundlegende wissenschaftliche Untersuchung des Prozesses. In vorliegender Arbeit wurde eine Vielfalt an Messtechnik benutzt, um den Versuchswerkstoff (Metallanalysator, Härteprüfmaschine), das Magnetfeld (Hallsonde), die Kräfte (Kraftmessplattform), die Schwingungen (Vibrometer), die Oberflächengüte (taktile, optische Messgeräte) und die magnetabrasiven Körner (Rastelektronenmikroskop) zu analysieren.

Der stationäre Metallanalysator der Fa. SPECTRO Analytical Instruments GmbH vom Typ SPECTROMAXx (Bild 4.17) wurde für die genaue Messung der chemischen Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe eingesetzt, da die Angaben aus den Datenblätter der Hersteller gewisse Toleranzen beinhalten und die Anteile einzelner Elemente von Charge zu Charge stark schwanken können.



Bild 4.17: Metallanalysator für die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung

Die universelle Härteprüfmaschine der Fa. KB Prüftechnik GmbH vom Typ KB 250 (Bild 4.18) wurde für die Ermittlung der Härte aller Versuchswerkstoffe verwendet. Die Messung wurde nach dem Prüfverfahren Vickers HV₁₀ durchgeführt.

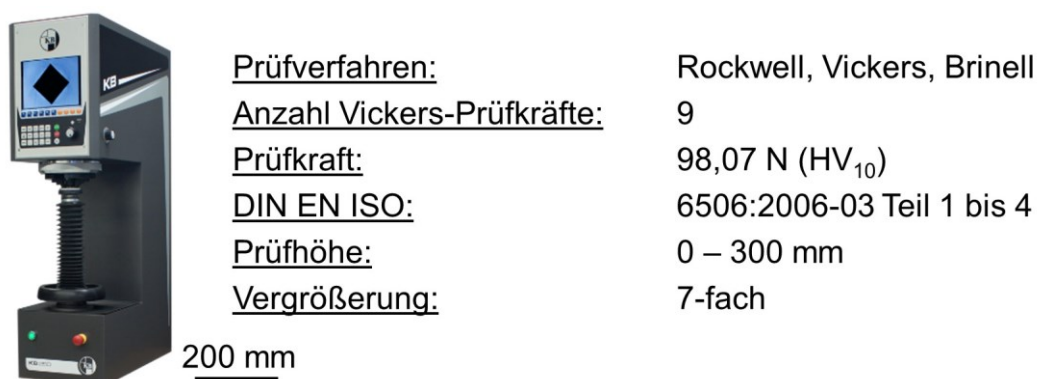


Bild 4.18: Härteprüfmaschine für die Messung der Härte nach Vickers HV₁₀

Das Teslameter der Fa. Wuntronic GmbH vom Typ Koshawa 5 (Bild 4.19) wurde für die Messung der magnetischen Flussdichte von den entwickelten MAP-Werkzeugen eingesetzt. Darüber hinaus wurde die magnetische Flussdichte mit und ohne magnetabrasives Pulver, bei ferro- und paramagnetischen Werkstücken sowie im Prozess gemessen. Das Gerät ermöglicht die automatische Speicherung der Werte in definiertem Zeitintervall und verfügt über zwei unterschiedliche Sondentypen: axiale und transversale, die eine Messung entsprechend in axiale und radiale Richtung gewährleisten. Die transversale Sonde ermöglicht die Ermittlung der magnetischen Flussdichte in schwer zugänglichen Zonen, wie z.B. im Arbeitsspalt beim MAP, der einige Millimeter beträgt.

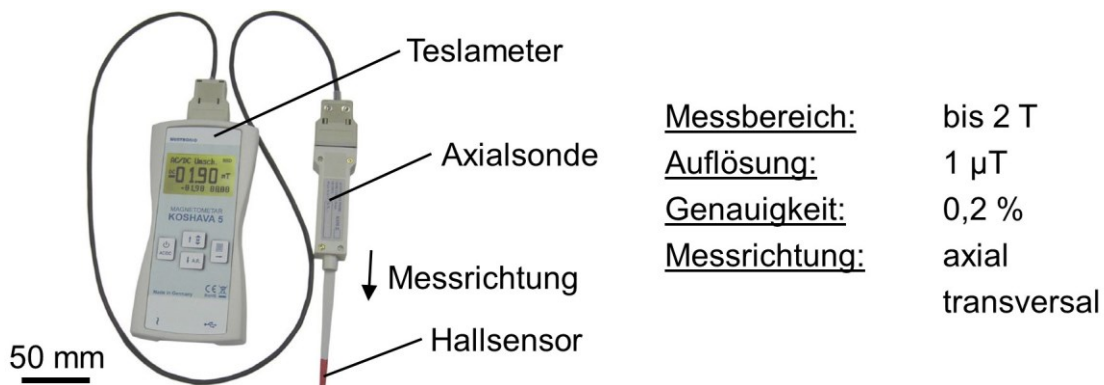


Bild 4.19: Teslameter für die Messung der magnetischen Flussdichte

Das Vibrometer der Fa. Polytec GmbH vom Typ PSV-500 (Bild 4.20) wurde für die Messung der Schwingungsamplitude vom MAP-Werkzeugtyp F bei einer Ultraschallanregung verwendet. Außerdem wurden die Schwingungen eines Vollhartmetallbohrers gemessen, um eine Referenz zu bilden und die Funktionsfähigkeit der Ultraschallspindel bzw. -aufnahme zu prüfen.



Bild 4.20: Vibrometer für die Messung des Schwingungsverhaltens des MAP-Werkzeugtyps F während der Ultraschallanregung

Die Kraftmessplattform der Fa. Kistler Holding AG vom Typ 9257B (Bild 4.21) wurde für die Messung der Kraftkomponenten (X, Y und Z) beim magnetabrasiven Polieren der Planflächen beim Einsatz des Werkzeugtyps A eingesetzt. Die Messungen wurden mit und ohne magnetabrasives Pulver durchgeführt, um den Einfluss der Zerspan- und Anziehungskraftkomponenten zu trennen. Die Messergebnisse wurden für die Analyse der Kraftkomponenten bei unterschiedlichen Prozessparametern wie Arbeitsabstand, Abstand zum Magnet sowie Drehzahl verwendet.



Messbereich:

Fx, Fy, Fz -5 – 5 kN

Empfindlichkeit:

Fx, Fy -7,5 pC/N

Fz -3,7 pC/N

Eigenfrequenz: 3,5 kHz

Kapazität: 220 pF

Aufspanfläche: 100 x 170 mm

Bild 4.21: Kraftmessplattform für die Messung der Kraftkomponente beim Plan-MAP

Das Rasterelektronenmikroskop der Fa. Zeiss vom Typ EVO MA 15 (Bild 4.22) wurde für die Charakterisierung unterschiedlicher Arten des magnetabrasiven Pulvers (Partikelform, -größe) eingesetzt. Darüber hinaus wurde die EDX-Analyse durchgeführt, um die prozentualen Anteile der einzelnen chemischen Elemente wie Fe als magnetischer Grundwerkstoff und Ti, Si, Al, O₂ als Elemente, die gemeinsam unterschiedliche abrasive Phasen bilden, zu ermitteln.

Beschleunigungsspannung: 0,3 – 30 kV

Auflösung: 4,5 nm

Vergrößerung: 5 – 300.000 Fach

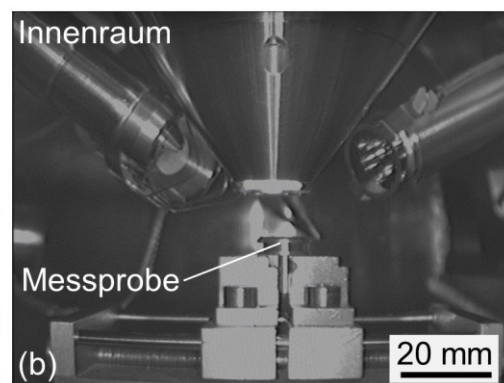


Bild 4.22: Rasterelektronenmikroskop für die Untersuchung des magnetabrasiven Pulvers: (a) Außenansicht, (b) Innenraum

Aus dem Kap. 2.1.1 folgt, dass die Oberflächenqualität als Funktion aus der Makrogeometrie, Topographie und Oberflächenintegrität definiert werden kann. Für die Beurteilung des Einflusses der Prozessparameter und anderer Einflussgrößen (Bild 2.7) beim MAP wurde die Topographie und insbesondere die Rauheit als Hauptkriterium ausgewählt. Für die Rauheitsmessung wurden drei Messinstrumente eingesetzt: taktiles mobiles Rauheitsmessgerät, taktiles stationäres Rauheitsmessgerät (Messung im Labor unter konstanter Temperatur) und ein optisches Mikroskop. Das taktile Rauheitsmessgerät der Fa. Garant vom Typ Perthometer H1 (Bild 4.23) wurde für die Messung am überwiegenden Anteil der Versuchswerkstücke eingesetzt, da dieses mobile Instrument die Messung an und neben der Werkzeugmaschine ermöglicht, was die Flexibilität erhöht und den Messaufwand reduziert. Der arithmetische Mittenrauwert – Ra (nachfolgend Mittenrauwert) wurde dabei als Hauptkriterium für die Trendveränderung der Oberflächengüte verwendet, da zum einen der Oberflächencharakter des Fertigungsverfahrens bekannt ist und zum anderen die Ra-Kenngröße durch geringe Streuung sowie schwache Reaktion auf Störungen gekennzeichnet ist und robuste, gut wiederholbare Messergebnisse liefert. Der Oberflächentyp kann dabei nicht beschrieben werden sowie eine Aussage über die Spitzen oder Riefen bzw. Profilmerekmale des Fertigungsverfahrens nicht getroffen werden. Dafür werden andere Rauheitskenngrößen wie Rz, Rmax, Rpk, Rk, Rvk usw. verwendet [KliU15].



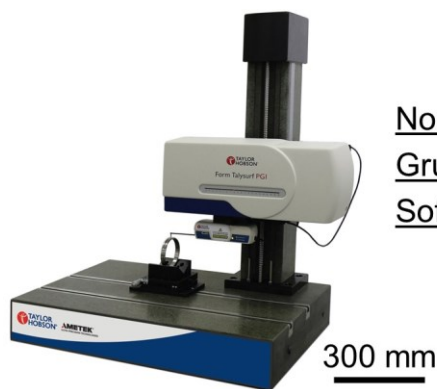
<u>Normen:</u>	ISO / ASME / JIS
<u>Taststrecke:</u>	Gemäß DIN EN ISO 4288 1:1,75 mm, 5,6 mm, 17,6 mm
<u>Cut-Off:</u>	0,25 mm, 0,8 mm, 2,5 mm
<u>Tastgeschwindigkeit</u>	0,5 mm/s

50 mm

Bild 4.23: Mobiles taktiles Rauheitsmessgerät für die Messung der Oberflächengüte nach dem Fräsen und magnetabrasiven Polieren

Das taktile stationäre Rauheitsmessgerät der Fa. Taylor Hobson (AMETEK GmbH) vom Typ Form Talysurf PGI 1500E (Bild 4.24) wurde für die Messung zahlreicher Rauheitskenngrößen und eine detaillierte Betrachtung von unterschiedlichen Ausgangsrauheitsprofilen sowie für durch das magnetabrasive Polieren erzeugte

Oberflächen eingesetzt. In vielen Anwendungsfällen hat sich die gemittelte Rautiefe – Rz etabliert, da eine ungefähre Rauheitsprofilhöhe ohne Ausreißer ermittelt wird und eine grafische Gegenüberstellung zum Rauheitsprofil gegeben ist. Die maximale Rautiefe – Rmax wird meistens unmittelbar gemeinsam mit Rz bewertet. Erhebliche Unterschiede der beiden Werte weisen auf eine markante Spitze hin. In diesem Fall wird die Wiederholung des Messvorganges empfohlen. Die Kernrautiefe – Rk gibt eine wichtige Aussage über die Tragfähigkeit der technischen Oberfläche. Je größer das Verhältnis zwischen Rz und Rk ist, desto höhere Belastung kann eine Oberfläche ertragen. Eine geringe reduzierte Spitzenhöhe – Rpk weist auf eine Plateauoberfläche. Aus der reduzierten Riefentiefe – Rpk wird z.B. das Ölrückhaltevolumen berechnet, was Relevanz in der Bewertung tribologischer Systeme aufweist [KliU15].



<u>Normen:</u>	ISO / ASME / JIS
<u>Grundrauschen:</u>	Rq < 2 nm; Rz < 10 nm
<u>Software:</u>	Talysurf Contour umfangreiche Oberflächenanalyse in 2D-Bereich

Bild 4.24: Stationäres taktiles Rauheitsmessgerät für die Messung zahlreicher Rauheitskenngrößen nach dem Fräsen und magnetabrasiven Polieren

Das optische Mikroskop der Fa. Alicona Imaging GmbH vom Typ Infinite Focus (Bild 4.25) wurde für die Beurteilung der Oberflächentopographie nach dem Fräsen mit unterschiedlichen Werkzeugen und dem magnetabrasiven Polieren eingesetzt. Dabei wurden die Aufnahmen der Struktur und die 3D-Messung der Oberfläche vor sowie nach dem MAP gegenübergestellt.



<u>Objektivvergrößerung:</u>		20x	50x	100x
<u>Arbeitsabstand:</u>	[mm]	19	11	4,5
<u>Messbereich X, Y:</u>	[mm]	0,81	0,32	0,16
<u>Vertikale Auflösung:</u>	[nm]	50	20	10
<u>Messgenauigkeit:</u>	[%]	0,05	0,05	0,05
<u>Min. messbare Rauheit Sa:</u>	[µm]	0,075	0,03	0,015

Bild 4.25: Optisches Mikroskop für die Beurteilung der Oberflächentopographie

4.5 Versuchsplanung

Der Prozess des magnetabrasiven Polierens ist durch sehr viele Prozessvariablen bzw. Eingangsgrößen und eine hohe physikalische Komplexität aufgrund der Überlagerung der mechanischen und magnetischen Effekte gekennzeichnet. Weiterhin existieren gewisse Randbedingungen, die durch die Verfahrenskinetik, magnetische Eigenschaften des Werkstückes, den MAP-Werkzeugtyp, die Deckelstruktur und die Prozessgrößen gesetzt werden. Wenn der Prozess außerhalb einer engen Grenze gefahren wird, findet keine oder eine sehr ungünstige Bearbeitung statt. Aus diesem Grund werden meistens aufwändige Vorversuchsreihen benötigt, wenn neue Einsatzfälle untersucht werden.

In zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten wird eine mehrfaktorielle Versuchsplanung eingesetzt, um den experimentellen Aufwand deutlich zu reduzieren. Dabei werden drei bis fünf Größen für jeden Prozessparameter ausgewählt und die ausgewählten Kombinationen getestet. Anschließend werden die Prozessmodelle in einer Software wie z.B. ANOVA erstellt [Kala14, Kala15, Kani17, Muli11, Nave18, Siha15, Siha17]. Allerdings können die Zusammenhänge und die Einflüsse einzelner Größen bei einem solch komplexen Verfahren nicht vollständig beschrieben werden. Aus diesem Grund wurde ausschließlich die einfaktorielle Versuchsplanung in der vorliegenden Arbeit verwendet, was die grundlegende Untersuchung zahlreicher Prozessparameter im Einzelnen ermöglicht und eine hohe Zuverlässigkeit der Ergebnisse gewährleistet. Obwohl der Versuchsaufwand dabei signifikant steigt, können spezifische Effekte wie z.B. die mechanische Pulververdichtung und der Einfluss der Deckelstruktur sowie des -werkstoffes detailliert beschrieben werden.

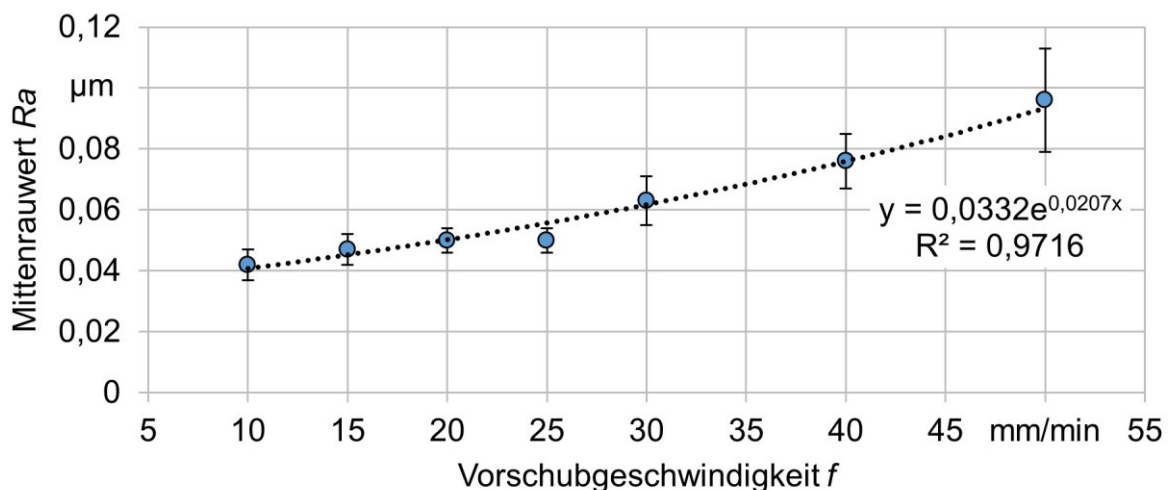
Jeder Versuch wurde mindestens drei Mal durchgeführt, um die statistische Sicherheit zu gewährleisten. Aus dem gleichen Grund wurde auch jede Messung zur Ermittlung der chemischen Zusammensetzung, Härte, magnetischen Flussdichte, Schwingungen, Kraftkomponenten und Rauheitskenngrößen mindestens drei Mal unternommen. Die Messung der Mittenrautiefe Ra mit dem mobilen taktilen Rauheitsmessgerät wurde mindestens sechs Mal nach jedem Versuch durchgeführt, um die Rauheitsschwankungen in der Fläche zu berücksichtigen und die Ausreißer zu kompensieren. Danach wurden die Graphiken anhand der Mittelwerte gebildet und die Standardabweichung entsprechend berechnet sowie an den Graphiken dargestellt.

5 Einfluss der Prozessparameter

Beginnend mit diesem Kapitel werden die Ergebnisse der praktischen Untersuchungen vorgestellt und diskutiert. Zuerst werden die wichtigsten Prozessparameter für das magnetabrasive Polieren, wie die Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit, der Arbeitsabstand sowie die magnetische Flussdichte im Arbeitsspalt untersucht. Darüber hinaus werden unterschiedliche Pulverarten und Bearbeitungsstrategien analysiert.

5.1 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit

Als erstes wurde die Vorschubgeschwindigkeit untersucht, da dieser Parameter die Produktivität bzw. Bearbeitungszeit definiert und den Zeitaufwand für die weiteren Versuche erheblich beeinflusst. Bei der abrasiven Präzisionsbearbeitung gilt generell, dass höhere Bearbeitungszeit zur Erzeugung besserer Oberflächengüte führt. Dieses Erkenntnis wurde in den ersten Versuchsreihen bestätigt (Bild 5.1). Das MAP wurde in einem Fertigungsschritt, einer so genannten Einweg-Bearbeitungsstrategie, unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit im Bereich von 10 bis 50 mm/min durchgeführt. Eine exponentielle Abhängigkeit der Reduzierung der Rauheit mit Senkung der Vorschubgeschwindigkeit wurde festgestellt. Dieser Zusammenhang wird dadurch erklärt, dass bei geringerer Vorschubgeschwindigkeit die Anzahl und Häufigkeit der aktiven Körner im Eingriff erhöht wird, was die Abtragsleistung steigert.



Verfahren: Plan-MAP
Werkzeugtyp: A
Deckel: A11
Werkstoff: 1.0037
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)

Ausgangsoberfläche:
 gefräst $R_a = 0,166 \pm 0,016 \mu\text{m}$
Werkzeug: CoroMill245
 $D = 80 \text{ mm}$, $z = 4$
WSP: R245-12 T3 E-ML
Schneidstoff: HM (1130)
Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:
 gefräst MAP
 n 800 900 [U/min]
 f 400 variabel [mm/min]
 a_p 0,3 1,5 [mm]
Pulver: FerroMAP 200/315 μm

Bild 5.1: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf den Mittenrauwert

Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $f = 25 \text{ mm/min}$ sinkt der Ausgangsmittenrauwert signifikant von ca. $R_a = 0,17 \text{ }\mu\text{m}$ auf $R_a < 0,06 \text{ }\mu\text{m}$, was auf eine hohe Prozessproduktivität im Bereich der abrasiven Präzisionsbearbeitung hinweist. Eine weitere Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit führt zur Erhöhung der Homogenität und Isotropie der polierten Oberfläche, wobei die Rauheit geringfügig reduziert wird. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $f = 10 \text{ mm/min}$ wurde der Mittenrauwert auf ca. $R_a = 0,04 \text{ }\mu\text{m}$ eingestellt und nähert sich somit der Bearbeitungsgrenze für diese verwendete Korngröße, Schnittparameter und Stahlsorte. Für die weiteren Versuchsreihen wurde ein Vorschub von $f = 25 \text{ mm/min}$ verwendet, da dieser die Oberflächenqualität bei relativ hoher Prozessproduktivität erheblich verbessert.

Für die Ermittlung des Einflusses der Einwirkzeit auf die erreichte Oberflächengüte wurden quasi-stationäre Versuche ohne Vorschub durchgeführt. Diese sind jedoch nur bedingt aussagekräftig, da die Vorschubkraftkomponente für die Pulverkinematik am Werkzeugkopf relevant ist. Durch eine sehr geringe Pulverumwälzung entstanden tiefe konzentrische Kreise auf der Bearbeitungsoberfläche, die mit der Erhöhung der Einwirkzeit zugenommen haben. Aus diesem Grund kann der Einfluss der Einwirkzeit beim Plan-MAP nur indirekt aus der Vorschubgeschwindigkeit und Größe des Permanentmagneten ermittelt werden (Bild 5.2).

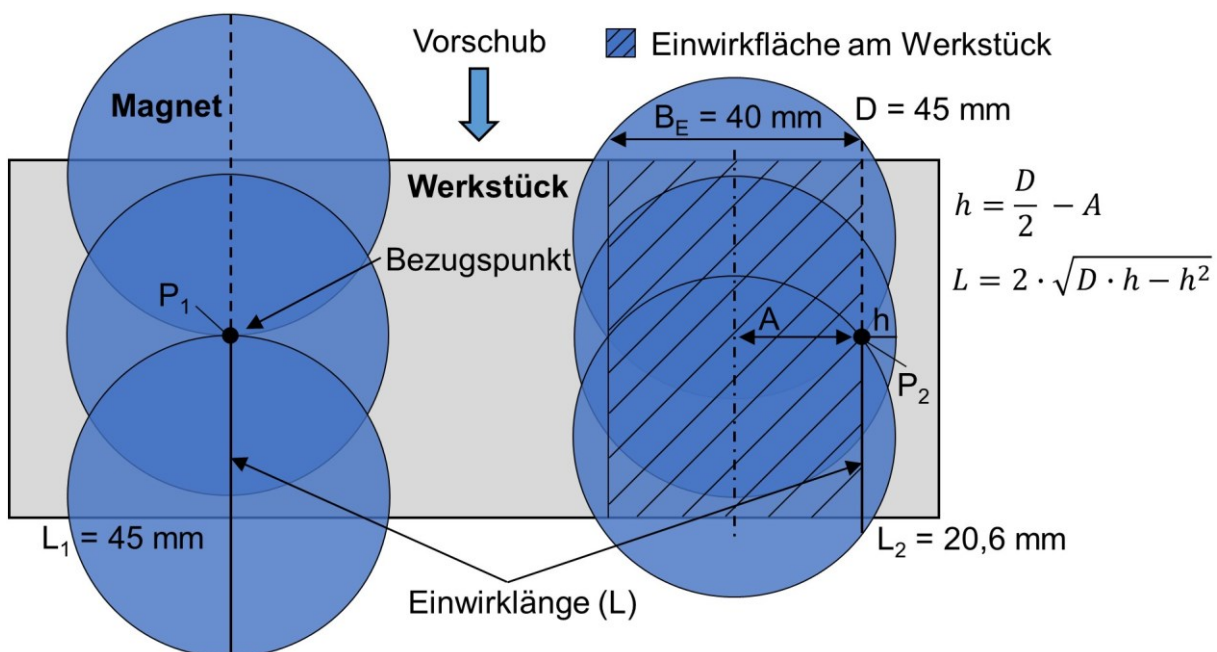


Bild 5.2: Ermittlung der Einwirkzeit aus der Vorschubgeschwindigkeit

Der Werkzeugtyp A wird mit einem Zylindermagnet in Durchmesser von 45 mm ausgestattet. Da die Oberfläche in der Einweg-Bearbeitungsstrategie am Rande der polierten Spur aufgrund der Ausbildung des Magnetfeldes weniger beeinflusst wird, wurde die Rauheitsmessung in diesen Übergangsbereichen nicht durchgeführt. Für die weitere Betrachtung/Rauheitsmessung wird ein Abstand von 2,5 mm vom jeweiligen Rand abgezogen. Daraus ergibt sich eine aktive MAP-Einwirkbreite von $B_E = 40$ mm (Bild 5.2). Jeder Punkt auf der Werkstückoberfläche (Bezugspunkt) wird mit einer bestimmten Länge des Magneten überfahren. Je näher dieser Punkt (P_1, P_2) sich an der MAP-Werkzeugachse befindet, desto größer ist die Einwirklänge (L_1, L_2). Bei der betrachteten Spurbreite von 40 mm ergibt sich eine mittlere Einwirkstrecke von ca. 32,8 mm. Aus der mittleren Einwirklänge und der Vorschubgeschwindigkeit kann die Einwirkzeit für den jeweiligen Punkt berechnet werden und entspricht z.B. 60 s für $f = 32,8$ mm/min. Für die jeweilige untersuchte Vorschubgeschwindigkeit wurde der relativ verbleibende Mittenrauwert nach dem MAP in Relation zur Ausgangsoberfläche berechnet. Die Ergebnisse sind im Bild 5.3 zusammengefasst. Aus den oben genannten Annahmen und Berechnungen folgt, dass der höchste Abtrag (über 50% des Rauheitsprofils) beim Plan-MAP mittels Werkzeugtyp A innerhalb ersten ca. 50 s stattfindet. In weiteren ca. 50 s findet die Bearbeitung mit mittlerer Intensität statt. In den nächsten ca. 100 s wird ein sehr geringer Werkstoffabtrag und eine geringfügige Rauheitsreduzierung erreicht.

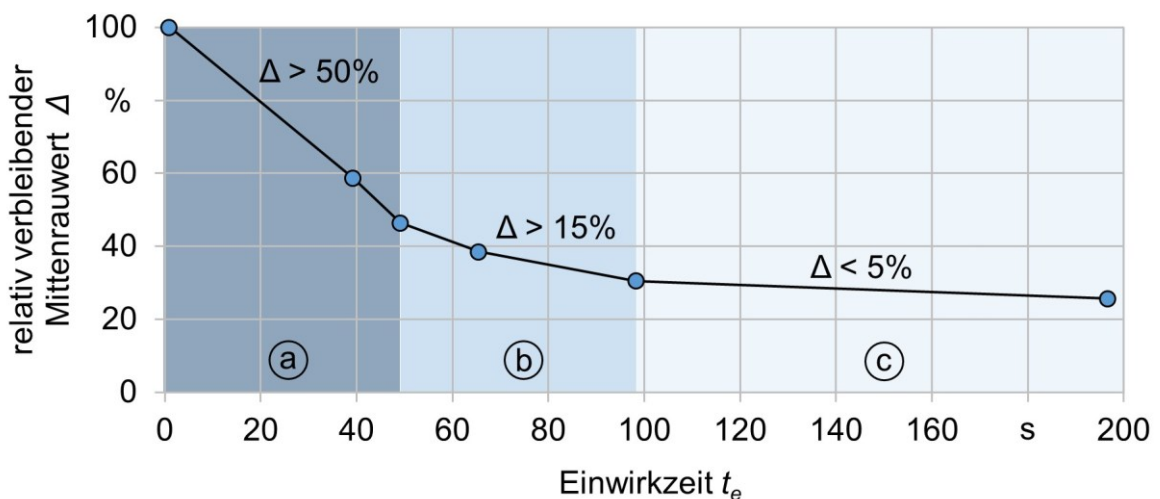
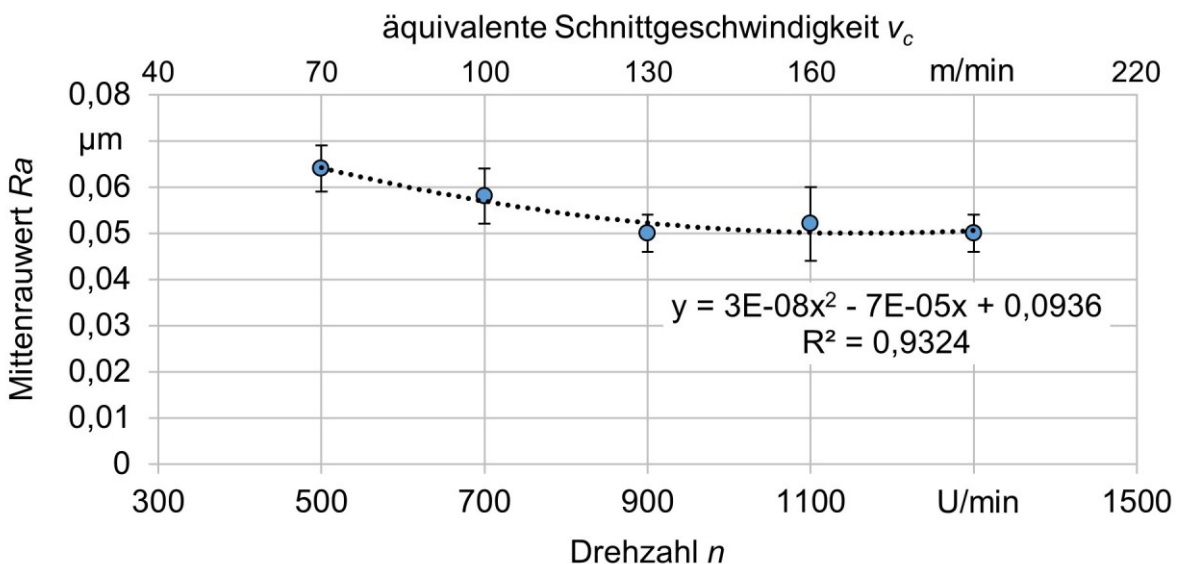


Bild 5.3: Einfluss der Einwirkzeit auf die relativ verbleibende Rauheit: (a) hohe, (b) mittlere, (c) niedrige Prozessintensität

Fazit: Eine geringere Vorschubgeschwindigkeit führt exponentiell zu besseren Oberflächengüten. Schon bei $f = 25$ mm/min findet eine intensive Bearbeitung statt.

5.2 Einfluss der Schnittgeschwindigkeit

Die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit verbessert in vielen abrasiven Fertigungsverfahren wie z.B. Schleifen die erreichte Oberflächengüte. Mit steigender Schnittgeschwindigkeit wird aber auch in den meisten Fällen die Abtragsleistung und die Prozesstemperatur erhöht, was bei Überschreitung bestimmter Werte zu dem erhöhten tieferen Korneindringen und entsprechend steigender Rauheit der Oberfläche oder der Erzeugung von Oberflächenbeschädigungen führt. Daher wird die Schnittgeschwindigkeit bei abrasiven Präzisionsbearbeitungsverfahren stets auf niedrigen Werten relativ zum klassischen Schleifen gehalten und auf einigen Meter pro Sekunde begrenzt. Beim magnetabrasiven Polieren liegt die optimale Schnittgeschwindigkeit laut Kap. 2.3.1 im Bereich von 1 bis 5 m/s (entspricht 60 bis 300 m/min). In der vorliegenden Arbeit wurde die Drehzahl für den entsprechenden maximalen Permanentmagnetdurchmesser (Werkzeugtyp A, B, C) inkl. der -position (Werkzeugtyp E, F) als Einstellparameter untersucht. Die äquivalente bzw. maximale Schnittgeschwindigkeit wurde für den größten Durchmesser inkl. Position des Permanentmagneten bezüglich der Rotationsachse umgerechnet. Für den Werkzeugtyp A wurde der Durchmesser von ca. 45 mm angenommen.



Verfahren: Plan-MAP

Werkzeugtyp: A

Deckel: A11

Werkstoff: 1.0037

Oberfläche verölt
(KMT 80)

Ausgangsoberfläche:

gefräst Ra = 0,164 ± 0,011 µm

Werkzeug: CoroMill245

D = 80 mm, z = 4

WSP: R245-12 T3 E-ML

Schneidstoff: HM (1130)

Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:

gefräst MAP

n 800 variabel [U/min]

f 400 25 [mm/min]

a_p 0,3 1,5 [mm]

Pulver: FerroMAP 200/315 µm

Bild 5.4: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf den Mittenrauwert

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Bild 5.4 dargestellt und zeigen die Reduzierung der Oberflächenrauheit mit steigender Schnittgeschwindigkeit bis zu $v_c = 130$ m/min bzw. ca. 2 m/s auf. Dafür werden folgende Gründe genannt:

- 1) Die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit führt zur Steigerung der Tangentialkraft, die auf einzelne magnetabrasive Partikel wirkt und somit zur Steigerung der Aufprallenergie, mit der die Körner die Oberfläche beeinflussen, was wiederum zu einer Erhöhung der Schnitttiefe von einzelnen Körner führt.
- 2) Die steigende Drehzahl bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit führt zum häufigeren Kontakt der magnetabrasiven Körner mit der Werkstückoberfläche innerhalb gleicher Bearbeitungszeit.
- 3) Spezifisch für das magnetabrasive Polieren wird auch der Effekt der Pulverumwälzung intensiviert, was zum Einsatz neuer, scharfer Schneidkanten im Prozess führt und einen Selbstschärfeffekt begünstigt.

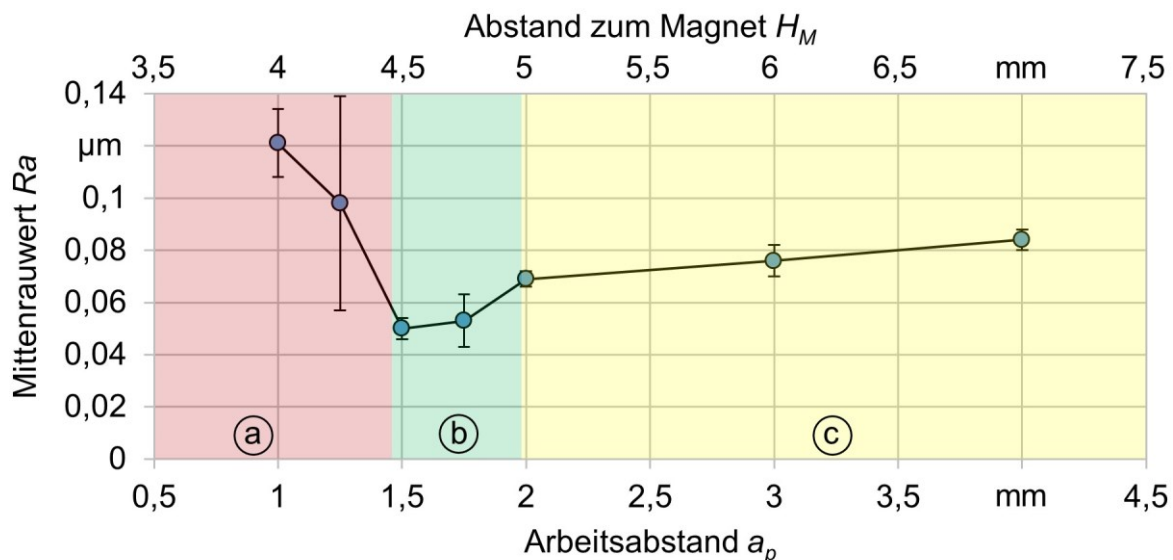
Insgesamt führen all diese Effekte zum höheren Werkstoffabtrag bzw. zur höheren Abtragsleistung, was zu Beginn der Bearbeitung zur Entfernung der Ausgangsrauheit, der Defektschicht und Oberflächenbeschädigungen eine essentielle Rolle spielt. Allerdings wird zum Ende der Bearbeitung durch eine zu hohe Schnittgeschwindigkeit respektive Abtragsleistung und Schnitttiefe der einzelnen Körner die Oberflächenrauheit negativ beeinflusst.

Explizit beim magnetabrasiven Polieren von Planflächen ferromagnetischer Werkstoffe ohne Kühlschmierstoff mittels Werkzeugtyp A wurde eine ungünstige Wärmeentwicklung bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_c > 130$ m/min festgestellt, die durch den Zerspanprozess und die Reibung zwischen dem magnetabrasiven Pulver, dem Werkstück und der Deckelstruktur erzeugt wurde. Diese führte zur Reduktion der Festigkeit des Kunststoffdeckels bei einer Temperatur über 60 °C, was zur starken Verformung des Deckels führen kann (Kap. 6.3). Weiterhin reduziert die höhere Temperatur die Magnetkraft bzw. die magnetische Flussdichte signifikant, was zu einer schwachen Prozessintensität führt. Für die Schnittgeschwindigkeit $v_c > 130$ m/min wird daher eine Kühlung des Werkstückes oder der Einsatz von Kühlschmierstoff empfohlen.

Fazit: Die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit verbessert die Oberflächengüte bis zu einer gewissen Grenze. Ab $v_c > 130$ m/min wird die positive kinetische Wirkung durch einen negativen thermischen Effekt überlagert.

5.3 Einfluss des Arbeitsabstandes

Der Begriff Arbeitsabstand wird für das magnetabrasive und magnetorheologische Polieren verwendet. Der Arbeitsabstand wird in der vorliegenden Arbeit als die Spalthöhe zwischen der Werkstück- und der Strukturoberfläche des Deckels definiert. Für die Ermittlung des Abstandes von der Werkstück- zur Magnetoberfläche (nachfolgend Abstand zum Magnet genannt) wird die Deckelstrukturhöhe und -wandstärke zum Arbeitsabstand addiert. Der Abstand zum Magnet spielt eine große Rolle für die Höhe der magnetischen Flussdichte im Prozess und entsprechend für die auf die Partikel wirkende Normalkraft. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Variation des Arbeitsabstandes (Bild 5.5) zeigen, dass der Arbeitsabstand den MAP-Prozess signifikant beeinflusst und einen schmalen optimalen Bereich für die entsprechende Korngröße aufweist, bei dem eine intensive Bearbeitung stattfindet. Dies wird durch die mechanische Verdichtung der magnetabrasiven Körner und dementsprechend einer drastischen Erhöhung der Zerspankraft sowie Abtragungsgeschwindigkeit gekennzeichnet. Der Arbeitsabstand wird in drei Zonen unterteilt: Oberflächenbeschädigungen, optimaler Bereich und niedrige Intensität (Bild 5.5a-c).



Verfahren: Plan-MAP
Werkzeugtyp: A
Deckel: A11
Werkstoff: 1.0037
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)

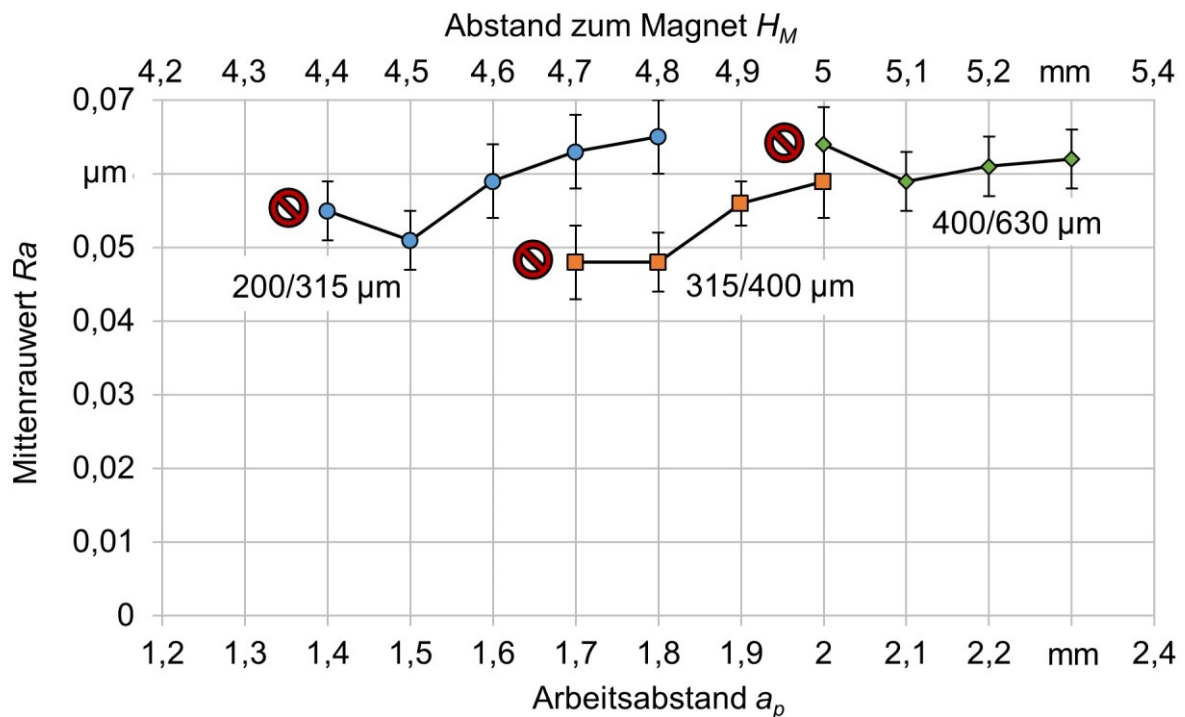
Ausgangsoberfläche:
 gefräst $R_a = 0,17 \pm 0,01 \mu\text{m}$
Werkzeug: CoroMill245
 $D = 80 \text{ mm}$, $z = 4$
WSP: R245-12 T3 E-ML
Schneidstoff: HM (1130)
Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:
 gefräst MAP
 n 800 900 [U/min]
 f 400 25 [mm/min]
 a_p 0,3 variabel [mm]
Pulver: FerroMAP 200/315 μm

Bild 5.5: Einfluss des Arbeitsabstandes auf den Mittenrauwert; Bearbeitungszonen: (a) Oberflächenbeschädigungen, (b) optimaler Bereich, (c) niedrige Intensität

Bis zu einem Arbeitsabstand von 2 mm findet eine schwache Bearbeitung bei einer Korngröße von 200 bis 315 μm statt. Dabei steigt die Normalkraft sowie Prozessintensität durch die Erhöhung der magnetischen Flussdichte im Arbeitsspalt. Die Bearbeitung findet im suboptimalen Bereich statt. Bei dem Arbeitsabstand von 1,5 bis 2 mm nimmt die mechanische Verdichtung des Pulvers deutlich zu, sodass der Prozess durch eine höhere Zerspankraft intensiviert und der Mittenrauwert auf ca. $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ reduziert wird. Ein geringer Arbeitsabstand ($< 1,5 \text{ mm}$) führt zum sehr starken Korneindringen in das zu bearbeitende Bauteil, was starke und tiefe Kratzerbildung zur Folge hat. Die Oberflächengüte sinkt dabei drastisch, während Oberflächenbeschädigungen in Form tiefer Rillen auftreten und stark zunehmen.

In weiteren Versuchen wurde der optimale Bereich (Bild 5.5b) für die jeweilige Korngröße detaillierter untersucht, wobei der Arbeitsabstand in 0,1 mm Schritten verstellt wurde, bis die ersten tiefen Kratzer auf der Oberfläche auftraten. Diese Stellen sind mit dem roten Symbol in der Grafik markiert (Bild 5.6).



Verfahren: Plan-MAP
Werkzeugtyp: A
Deckel: A11
Werkstoff: 1.0037
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)

Ausgangsoberfläche:
 gefräst $R_a = 0,14 \pm 0,02 \mu\text{m}$
Werkzeug: CoroMill245
 $D = 80 \text{ mm}$, $z = 4$
WSP: R245-12 T3 E-ML
Schneidstoff: HM (1130)
Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:
 gefräst MAP
 n 800 900 [U/min]
 f 400 25 [mm/min]
 a_p 0,3 variabel [mm]
Pulver: FerroMAP
 variable Körnung

Bild 5.6: Optimaler Arbeitsabstand bei unterschiedlicher Korngröße

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die Rauheitsreduzierung für jede Korngröße einen Peak aufweist. Der entsprechende Arbeitsabstand steigt dabei bei größer werdenden Pulverfraktionen. Dieser Zusammenhang wird dadurch erklärt, dass eine optimale mechanische Verdichtung bei einer bestimmten Anzahl von Körnern im Arbeitsspalt erzeugt wird. Größere Körner nehmen mehr Platz im Arbeitsspalt ein, daher muss der Arbeitsabstand erhöht werden. Für die Ermittlung eines genaueren Zusammenhanges zwischen der Korngröße und des Arbeitsabstandes werden die empirische Ergebnisse in der Tabelle 5.1 zusammengefasst und ein k_A -Faktor eingeführt, welcher folgendermaßen berechnet wird:

$$k_A = KG_M / a_{po}$$

Tabelle 5.1: Optimaler Arbeitsabstand

min Korngröße KG_{\min} [μm]	max Korngröße KG_{\max} [μm]	mittlere Korngröße KG_M [μm]	optimaler Arbeitsabstand a_{po} [mm]	Korrektur- faktor k_A
200	315	257,5	1,5	5,83
315	400	357,5	1,8	5,06
400	630	515	2,1	4,08

In der Literatur wird ein Arbeitsabstand in der Höhe von 3- bis 10-facher Korngröße empfohlen [Olik90]. Aus der Tabelle 5.1 folgt, dass der k_A -Faktor bei kleineren Pulverfraktionen aufgrund der höheren Packungsdichte steigt und der optimale Arbeitsabstand beim Plan-MAP unter Einsatz von Deckelstrukturen das 4- bis 6-fache der mittleren Korngrößen beträgt. Die höchste erreichte Oberflächengüte wurde dabei nicht bei der kleinsten Pulverfraktion, sondern bei der mittleren Korngröße von 315 bis 400 μm erzeugt. Generell führt eine höhere Korngröße zu einer Erhöhung des Volumens an ferromagnetischem Grundwerkstoff und somit zur Erhöhung der magnetischen Kräfte, die auf einzelne Körner wirken, was wiederum zum tieferen Korneindringen führt. Allerdings wird dabei auch die aktive Korn- bzw. Schneidanzahl reduziert, was zur Reduzierung des Werkstoffabtrags führt. Daher muss ein Kompromiss bei der Auswahl der Pulverfraktion gefunden werden.

Fazit: Ein optimaler Arbeitsabstand spielt eine wesentliche Rolle für die mechanische Pulververdichtung, die die Prozessintensität drastisch erhöht. Höherer Arbeitsabstand führt zur Intensitätsreduzierung. Ein niedriger Arbeitsabstand bewirkt hingegen eine Beschädigung der Oberfläche.

5.4 Untersuchte magnetabrasive Pulverarten

Im Kapitel 2.3.4 wurde beschrieben, dass das durch Schmelzezerstäubung hergestellte magnetabrasive Pulver die höchste Standzeit aufweist. Das dazugehörige FerroMAP sowie Hartgussgranulat und zwei Pulverarten der Fa. Magnetfinish GmbH („Standard“ und „Nanoabrasive“) werden in diesem Kapitel näher untersucht (Bild 5.7).

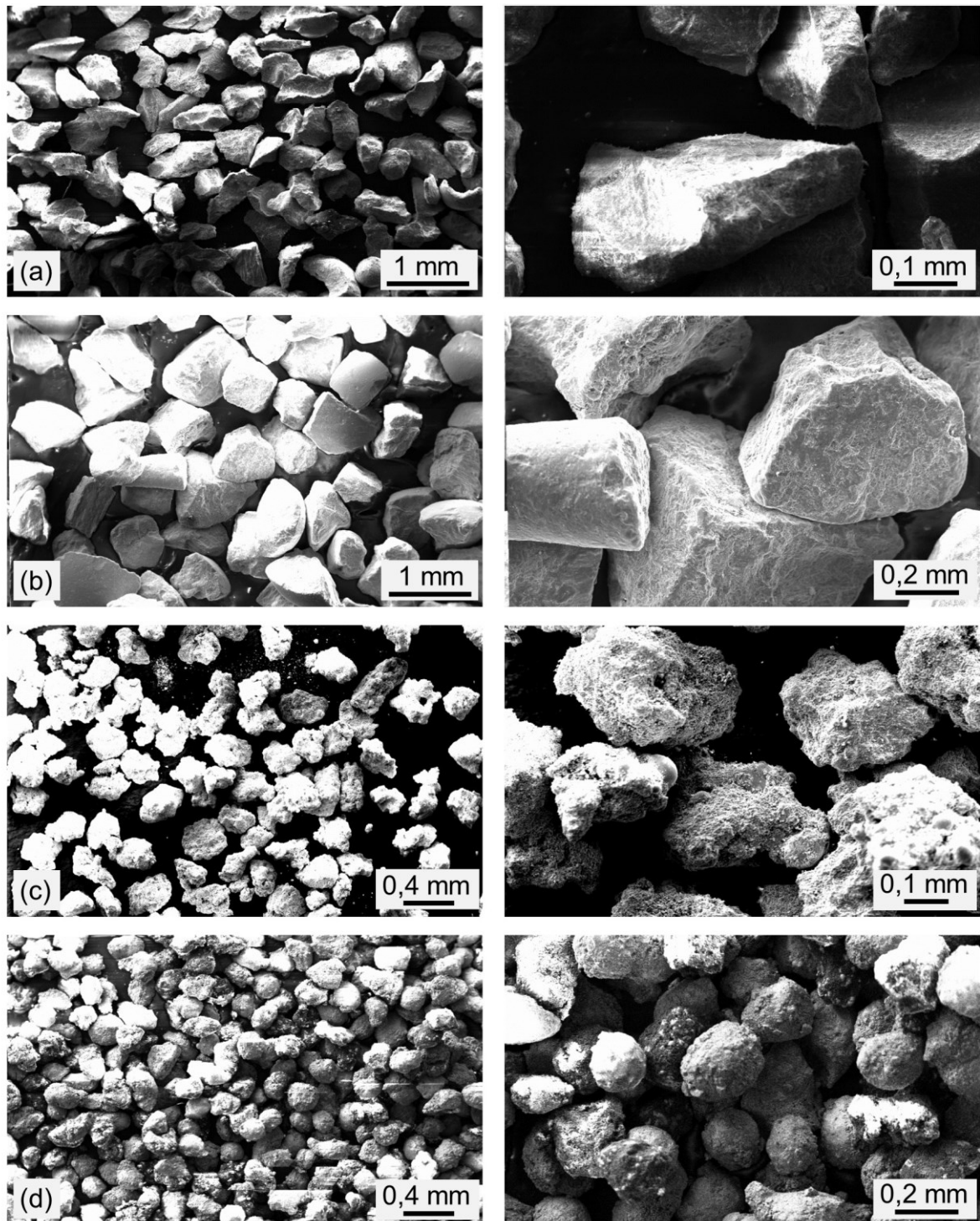


Bild 5.7: REM-Aufnahmen unterschiedlicher magnetabrasiven Pulverarten: (a) FerroMAP, (b) Hartgussgranulat; Fa. Magnetfinish (c) Standard, (d) Nanoabrasive

Die REM-Aufnahmen zeigen, dass FerroMAP und Hartgussgranulat vorwiegend durch scharfkantige Formen und glatte Oberflächen gekennzeichnet sind. Hingegen weisen die beiden Pulverarten der Fa. Magnetfinish GmbH vorwiegend runde Formen und raue Oberfläche auf. Das wird damit korreliert, dass FerroMAP durch Schmelzezerstäubung, Hartgussgranulat durch konventionelles Schmelzen von Graugussgranulat in Wasser und „Standard“ bzw. „Nanoabrasive“ vermutlich durch Sintern hergestellt wurden. FerroMAP und Hartgussgranulat wurden vermehrt im letzten Jahrhundert in der ehemaligen Sowjetunion eingesetzt. Die Pulverarten der Fa. Magnetfinish werden aktuell in der Industrie für die Werkzeugvor- und Schichtnachbehandlung verwendet.

Die hier verwendeten Pulverarten wurden durch energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX-Analyse) auf deren chemische Zusammensetzung untersucht. Dabei wurden jeweils drei Flächen pro Einzelkorn analysiert und die Mittelwerte der prozentualen Anteile einzelner Elemente in Bild 5.8 zusammengefasst. Es werden jedoch die Elemente nur an der Oberfläche und nicht im Korn sowie keine Anteile der chemischen Verbindungen durch diese Methode ermittelt. Daher kann mittels EDX-Analyse keine Gefügestruktur des magnetabrasiven Pulvers ermittelt werden.

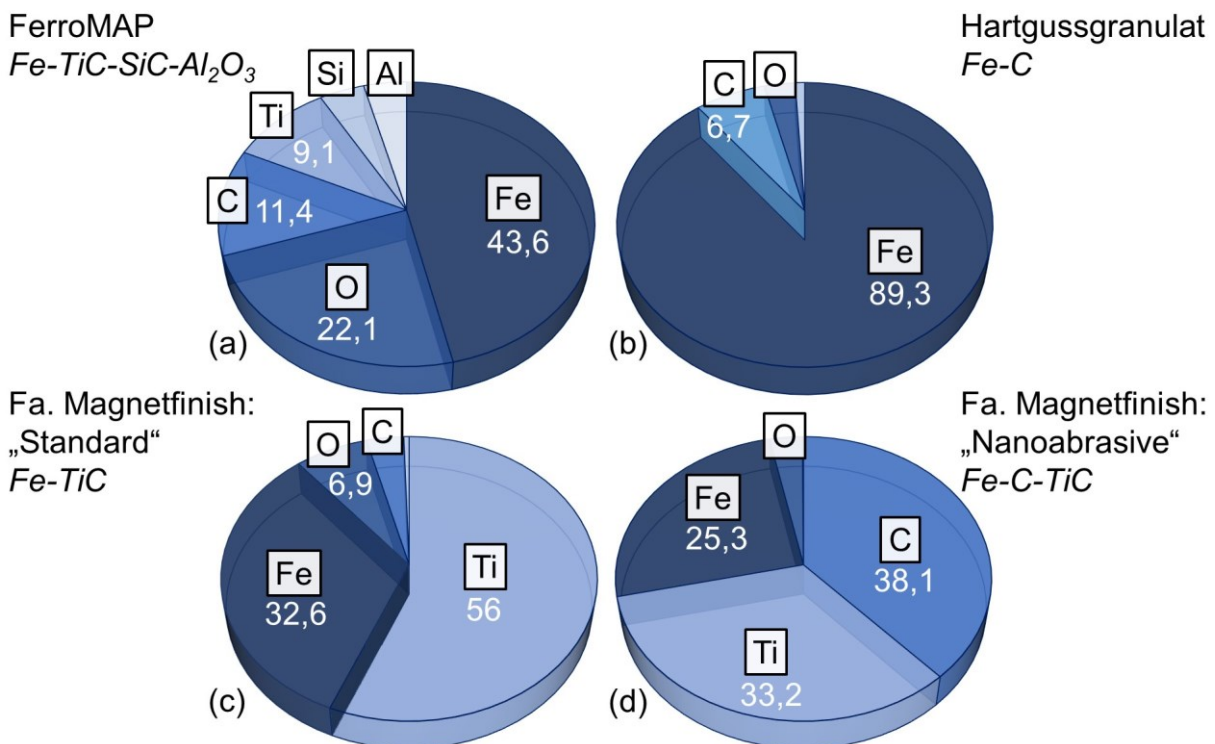


Bild 5.8: EDX-Analyse unterschiedlicher magnetabrasiver Pulverarten: (a) FerroMAP, (b) Hartgussgranulat; Fa. Magnetfinish (c) Standard, (d) Nanoabrasive

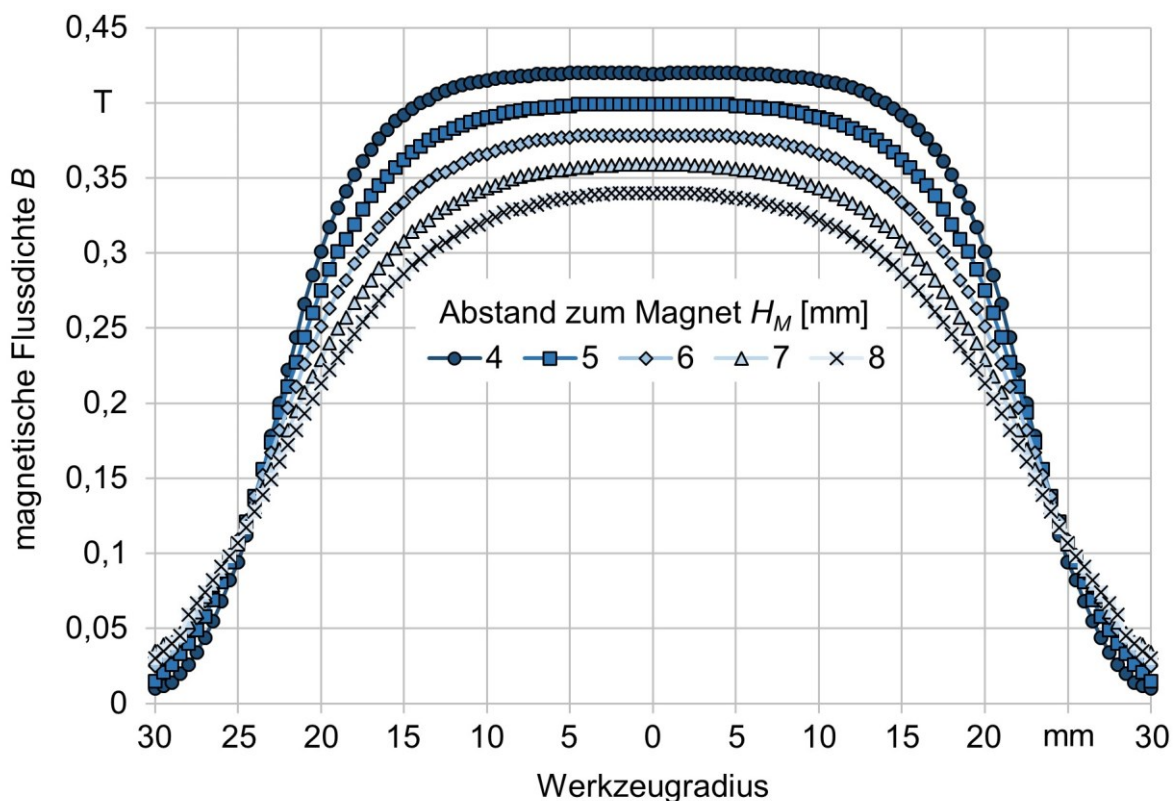
Die Ergebnisse der EDX-Analyse zeigen, dass FerroMAP neben einem hohen Anteil an ferromagnetischem Grundwerkstoff (ca. 44% Fe) viele Elemente, die gemeinsam unterschiedliche, harte Abrasivphasen wie Titan-, Siliziumkarbid und Aluminiumoxid bilden, was wiederum einen universellen Einsatz bzw. effektive Bearbeitung unterschiedlicher Werkstoffe ermöglicht. Hartgussgranulat wird vollständig aus Grauguss hergestellt und verfügt über den mit Abstand größten Anteil an Eisen (ca. 90%), was die ferromagnetischen Eigenschaften des Pulvers hervorhebt. Allerdings weist Hartgussgranulat keine zusätzlichen harten Phasen auf. Dies wird durch eine geringere abrasive Wirkung und geringe Standzeit gekennzeichnet.

Das Pulver vom Typ „Standard“ der Fa. Magnetfinish GmbH beinhaltet über 50% Titan, woraus die abrasive Phase Titankarbid gebildet wird. Der Anteil an Eisen beträgt dabei ca. 33% an der Oberfläche. Das Pulver vom Typ „Nanoabrasive“ enthält laut Hersteller Diamant als Abrasivmittel. Die EDX-Analyse zeigt, dass diese Pulverart den größten Anteil an Kohlenstoff (ca. 38%) aufweist. Allerdings wurde auch ein hoher Anteil an Titan gemessen, daher beinhaltet „Nanoabrasive“ vermutlich neben Diamant auch Titankarbid als abrasive Phase. Der Gehalt an Eisen fiel bei dieser Pulverart am mit ca. 25 % am geringsten aus.

Die Versuche zur Bearbeitung von weichem ferromagnetischem Baustahl 1.0037 mit unterschiedlichen Pulverarten und unter Einsatz von Öl der Fa. Wieds Ecochem AG von Typ KMT 80 haben gezeigt, dass eine sehr starke Schlamm- und Anhaftung der Pulverpartikel auf der Werkstückoberfläche beim Einsatz der beiden Pulverarten der Fa. Magnetfinish GmbH stattfindet. Solch eine Schlamm- und Anhaftungsschicht kann nur mit hohem Aufwand entfernt werden. Darüber hinaus wurde keine günstige Bearbeitung sowie sehr niedrige Oberflächenqualität festgestellt. Beim Einsatz von FerroMAP und Graugussgranulat konnte der entstehende Schlamm mit geringem manuellem Aufwand, z.B. mit Hilfe eines Papiertuches entfernt werden sowie eine Oberflächenverbesserung erzeugt werden. Dabei zeigte das Pulver FerroMAP deutlich bessere Prozessergebnisse. Bei den Versuchen mit Kühlschmierstoff der Fa. Oemeta Chemische Werke GmbH von Typ Novamet 900 wurde eine sehr starke Schlamm- und Anhaftungsschichtbildung und eine vermehrt klebende Wirkung für alle Pulverarten festgestellt. Solche Effekte entstehen durch chemische Reaktion im System Werkstoff-Schneidstoff-KSS/Öl. Unter zusammenfassender Betrachtung zeigte das Pulver FerroMAP die vorteilhaftesten Eigenschaften und wurde daher in der vorliegenden Arbeit als Hauptpulver für alle Untersuchungen verwendet.

5.5 Magnetische Flussdichte

In zahlreichen Forschungsarbeiten wird eine magnetische Flussdichte von 0,2 bis 1,6 T im Arbeitsspalt beim magnetabrasiven Polieren eingesetzt (Kap. 2.3.1). Um die magnetischen Eigenschaften der vorgestellten MAP-Werkzeugen zu beschreiben, wurde zuerst die axiale Messung der magnetischen Flussdichte innerhalb des gesamten Werkzeugdurchmessers durchgeführt. Der Versuchsstand ist im Kap. 4.3.3 detaillierter erläutert. Die gemessenen Punkte für den Werkzeugtyp A sind im Bild 5.9 dargestellt und bilden fünf Kurven, wobei die oberste Kurve die Messwerte der magnetischen Flussdichte (max. 0,42 T) beim Abstand zum Magnet von 4 mm zeigt. Die weiteren Kurven stellen die Reduzierung der magnetischen Flussdichte mit steigendem Abstand zum Magnet dar (ca. 20 mT/mm). Je näher die Messung zum Magnet stattgefunden hat, desto breiter wurden die höchsten Werte verteilt und sind entsprechend später abgefallen. Das wird durch die hohe Homogenität des Magnetfeldes in der Nähe zum Permanentmagnet erklärt.



Werkzeugtyp: A

Permanentmagnet:
Zylinder (1 Stück)
Durchmesser: 45 mm
Höhe: 30 mm
Haftkraft: 677 N

Messung:
Richtung: axial
Toleranz: ± 2 mT
Messintervall: 0,5 mm
Gerät: Koshawa 5

Bild 5.9: Messdaten magnetischer Flussdichte für den Werkzeugtyp A

Für eine bessere Veranschaulichung der Ergebnisse wurden die Messpunkte in ein Flächendiagramm interpoliert (Bild 5.10), sodass die Verteilung der magnetischen Flussdichte für die gesamte Fläche des gemessenen Bereiches dargestellt wird. Dabei wird die Ausbreitung des Magnetfeldes unterschiedlicher MAP-Werkzeuge vereinfacht dargestellt. Die quantitative Bewertung wird durch eine Farbenskala gegeben. Die Ergebnisse für alle Werkzeugtypen werden in den Bildern 4.3d – 4.7g dargestellt.

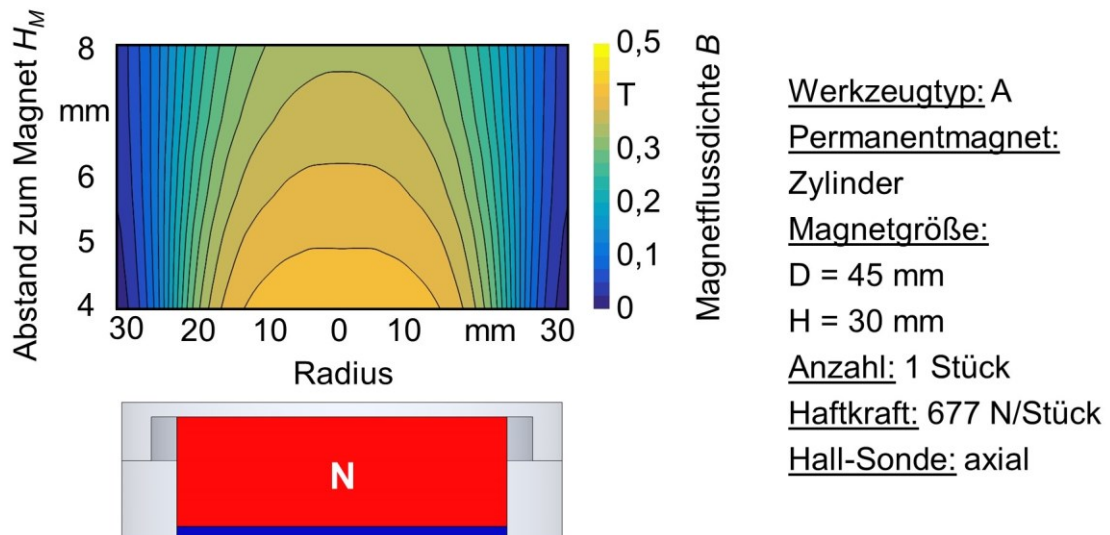


Bild 5.10: Interpolation der Messdaten zur magnetischen Flussdichte im Flächendiagramm für den Werkzeugtyp A

Das Magnetfeld vor dem Permanentmagnet wird durch ein ferromagnetisches Werkstück massiv verstärkt. Um diese Wirkung detaillierter zu untersuchen, wurden die Messungen im Arbeitsspalt zwischen dem Werkzeugtyp A und dem Bauteil mittels transversaler Hall-Sonde vorgenommen. Der Versuchsaufbau ist im Kap. 4.3.3 detaillierter erläutert und die Ergebnisse im Bild 5.11 dargestellt. Die Verteilung der magnetischen Flussdichte weist einen sehr ähnlichen Verlauf wie bei der Messung ohne Werkstück in Luft auf mit den Unterschieden, dass das Magnetfeld schmäler ausgeprägt ist und eine fast doppelt so hohe Intensität (max. 0,78 T) aufweist. Der Abfall der magnetischen Flussdichte mit steigendem Abstand zum Magnet wurde auch verdoppelt (ca. 40 mT/mm). Die Messungen an den Sonden-Positionen 2 und 3 ergeben fast identische Werte, während die Messung an der Kante (Position 1) einen unsymmetrischen Verlauf der magnetischen Flussdichte aufweist und höhere Peakwerte in Höhe von ca. 1 T wegen der Magnetfeldkonzentration auf der Bauteilecke zeigt.

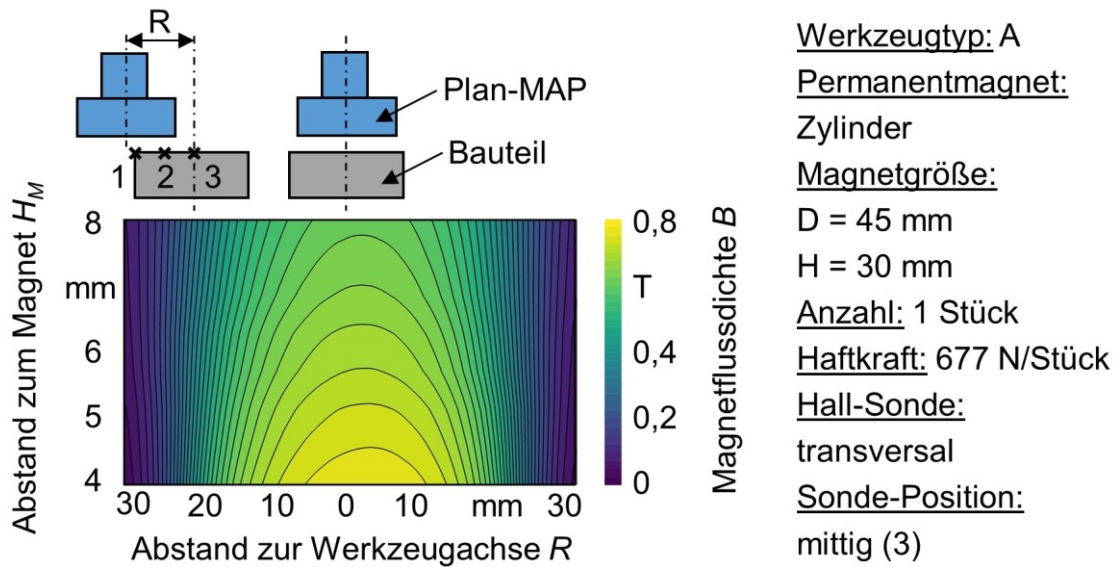
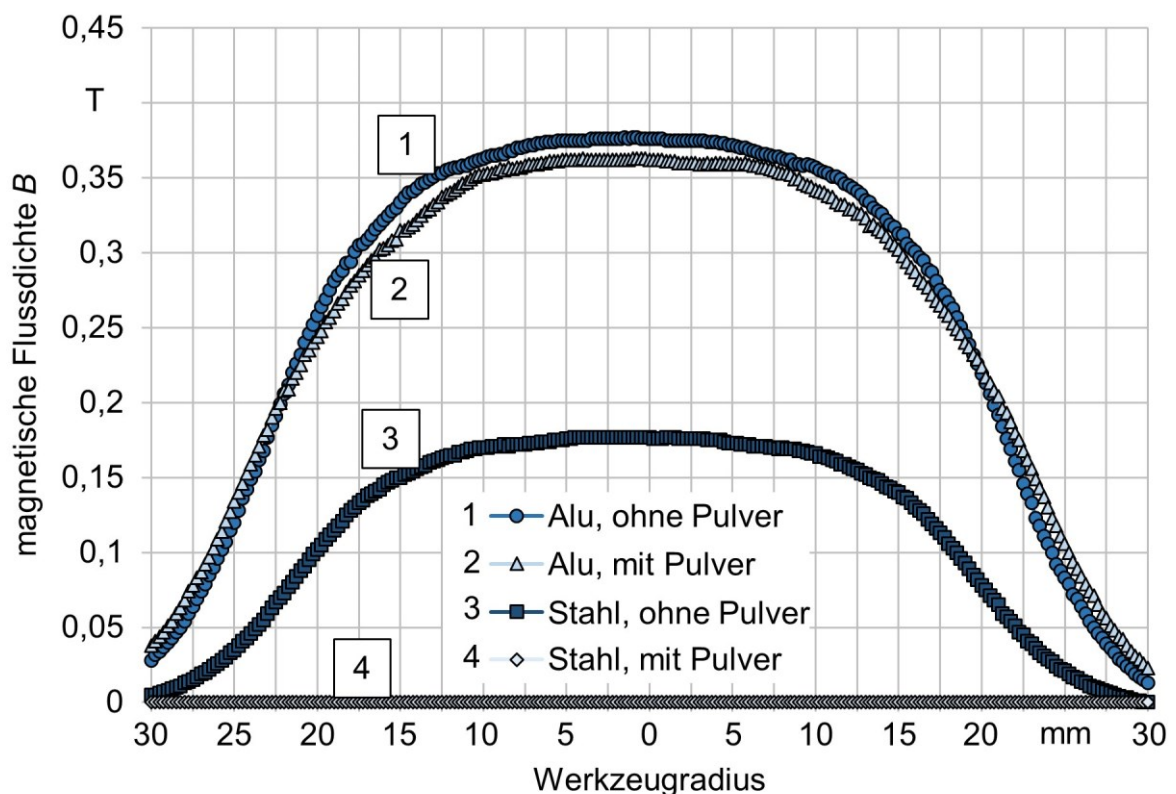


Bild 5.11: Flächendiagramm der Verteilung magnetischer Flussdichte zwischen dem Werkzeugtyp A und ferromagnetischem Werkstück ohne Pulver

Die Messung der magnetischen Flussdichte mittels Transversalsonde konnte, wie beschrieben, nicht unter Verwendung von magnetabrasivem Pulver durchgeführt werden. Daher wurde ein neuer Versuchsstand (Kap. 4.3.3) verwendet, in welchem die Axialsonde in der Bohrung des Werkstückes platziert wurde. Somit wurde versucht, die magnetische Flussdichte im Bearbeitungsprozess zu erfassen. Die Ergebnisse der Messung magnetischer Flussdichte im Prozess sind für ferro- und paramagnetische Werkstoffe mit und ohne magnetabrasives Pulver beim Einsatz von Werkzeugtyp A in Bild 5.12 dargestellt. Alle Messungen wurden bei festem Arbeitsabstand von 1,5 mm und einer Drehzahl von 700 U/min durchgeführt. Die Deckelwandstärke inklusive der Struktur betrug 3 mm sowie der SONDENSCHUTZ 1 mm, sodass der Abstand vom Hallensensor zum Permanentmagnet bei 5,5 mm fest eingestellt wurde.

Eine Al-Legierung beeinflusst das Magnetfeld ähnlich schwach wie Luft, daher korrelieren die Ergebnisse (Kurve 1) mit den Messwerten für den Werkzeugtyp A. Die Messung mit Pulver ergibt ähnliche Werte (Kurve 2). Einerseits soll das magnetabrasive Pulver das Magnetfeld verstärken. Andererseits laufen dabei die Magnetfeldlinien hauptsächlich durch das Pulver. Beide Aspekte gleichen das Messergebnis aus. Bei einem ferromagnetischen Werkstoff schließt sich das Magnetfeld am Werkstück. Für die Montage der Axialsonde wurde eine Bohrung von $\varnothing 8$ mm erzeugt. Dabei entsteht ein Hohlraum, der die Verteilung des Magnetfeldes sehr stark beeinflusst. Eine geringere Anzahl an Feldlinien verläuft durch die Bohrung, wo der Hallensensor die Messwerte aufnimmt. Aus diesem Grund sind die gemessenen

Werte (Kurve 3) viel niedriger als beim paramagnetischen Werkstoff. Die Zugabe von magnetabrasivem Pulver führt dazu, dass die gemessene magnetische Flussdichte den Wert Null annimmt (Kurve 4). Das wird dadurch erklärt, dass das vollständige Magnetfeld vom Permanentmagnet durch das Pulver zum Werkstück fließt und deshalb die Axialsonde nur sehr eingeschränkt erreicht. Bei weiteren Versuchen wurden einige Sacklochbohrungen mit unterschiedlichen Wandstärken von 1 bis 3 mm zur bearbeitenden Oberfläche gefertigt. Der Hallsensor wurde hinter der Bohrung positioniert. Hierbei wurden nur sehr geringe Werte für die magnetische Flussdichte gemessen. Das bedeutet, dass das Magnetfeld primär durch das Werkstück fließt.



Verfahren: Plan-MAP

Werkzeugtyp: A

Deckel: A11

Werkstoffe: 1.0037, AISi5

Pulver: FerroMAP 200/315 μm

Messung:

Richtung: axial

Abstand zum Magnet: 5,5 mm

Toleranz: ± 2 mT

Messintervall: 0,25 mm

Gerät: Koshawa 5

Schnittparameter:

$n = 700$ U/min

$f = 30$ mm/min

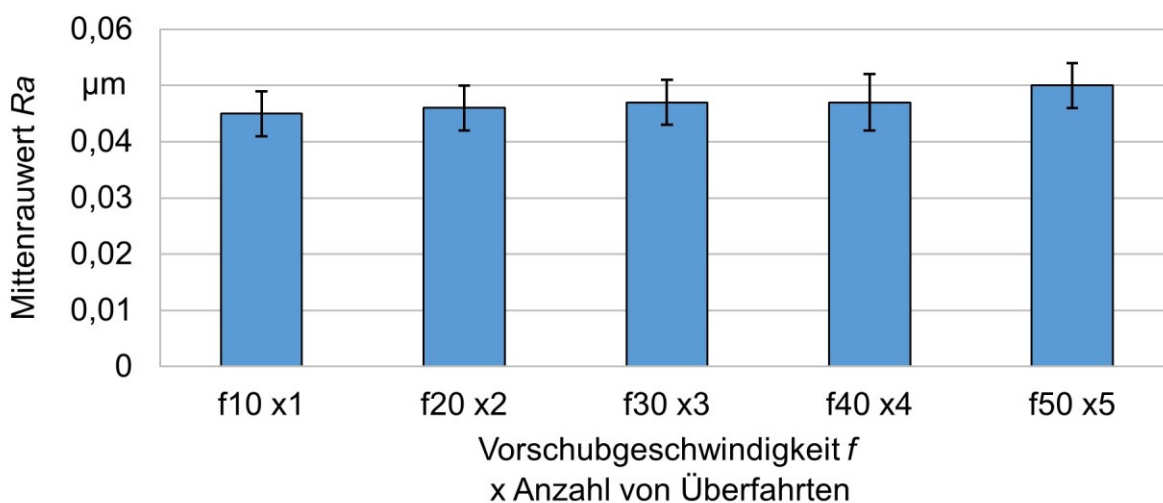
$a_p = 1,5$ mm

Bild 5.12: Messdaten magnetischer Flussdichte für den Werkzeugtyp A im Prozess

Fazit: Die Messung der magnetischen Flussdichte während der Bearbeitung unter Einsatz von magnetabrasivem Pulver kann nicht realisiert werden. Ferromagnetische Werkstücke erhöhen die magnetische Flussdichte im Arbeitsspalt signifikant (annäherungsweise Verdopplung der magnetischen Flussdichte beim Stahl 1.0037).

5.6 Bearbeitungsstrategie

Die Bearbeitungsstrategie bezeichnet wie beim klassischen Fräsen die unterschiedlichen Werkzeugbahnen zur Bearbeitung eines Formelementes. Dazu gehören die Strategien wie „Einweg“, „Doppelweg“, „Spirale“ usw. Wie beim Planfräsen wurden beim Plan-MAP zwei typische Bearbeitungsstrategien untersucht: das Verfahren in eine Richtung (Einweg) sowie in beide Richtungen (Doppelweg). Die Doppelweg-Strategie wurde bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten und Anzahl an Überfahrten untersucht, sodass die Bearbeitungszeit mit der Einwegbearbeitung übereinstimmt. Beispielweise bedeutet der Wert f20 x2 die Bearbeitung bei $f = 20$ mm/min in beide Richtungen. Die Ergebnisse sind im Bild 5.13 dargestellt. Dabei wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen: (1) bei gleicher Bearbeitungszeit wird annäherungsweise ein gleicher Mittenrauwert unabhängig von der Überfahrtenanzahl erzeugt; (2) die Schlamm- und Pulverbildung aus Öl, abgetragenem Werkstoff und Pulverabrieb weist keinen negativen Einfluss auf den Prozess auf; (3) „Frisches“ Pulver generiert wegen der Einarbeitungszeit bei der ersten Durchfahrt einen geringeren Abtrag, was generell mit der Doppelweg-Strategie behoben wird.



Verfahren: Plan-MAP

Werkzeugtyp: A

Deckel: A11

Werkstoff: 1.0037

Oberfläche verölt
(KMT 80)

Ausgangsoberfläche:

gefräst $Ra = 0,173 \pm 0,022$ µm

Werkzeug: CoroMill245

$D = 80$ mm, $z = 4$

WSP: R245-12 T3 E-ML

Schneidstoff: HM (1130)

Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:

gefräst MAP
n 800 900 [U/min]

f 400 variabel [mm/min]

a_p 0,3 1,5 [mm]

Kühlluftdüse: ein

Pulver: FerroMAP 200/315 µm

Bild 5.13: Einfluss der Bearbeitungsstrategie auf den Mittenrauwert

Fazit: Die Bearbeitungszeit spielt eine entscheidende Rolle für die erreichte Oberflächengüte unabhängig von der Anzahl der Überfahrten.

6 Deckelstruktur und Werkzeugtypen

In diesem Kapitel werden zahlreiche Deckelstrukturen vorgestellt, und anhand der erreichten Oberflächengüte eingeordnet. Außerdem werden der Einfluss der Strukturhöhe und des Deckelwerkstoffes auf die Prozessintensität analysiert sowie der Verschleiß der additiv gefertigten PLA-Deckel näher erläutert. Darüber hinaus werden fünf MAP-Werkzeugtypen unter Variation von Prozessparametern gegenübergestellt.

6.1 Einfluss der Deckelstruktur

In der ersten Versuchsreihe wurden alle Deckelstrukturen (Bild 6.1) bei $f = 25 \text{ mm/min}$ und $n = 700 \text{ U/min}$ getestet, um die Unterschiede in der erzeugten Oberflächengüte besser zu detektieren. Die Ergebnisse in Bezug auf die erzeugte Oberflächenqualität (Bild 6.2) zeigen eindeutige Trends, welche Strukturen den Prozess begünstigen.

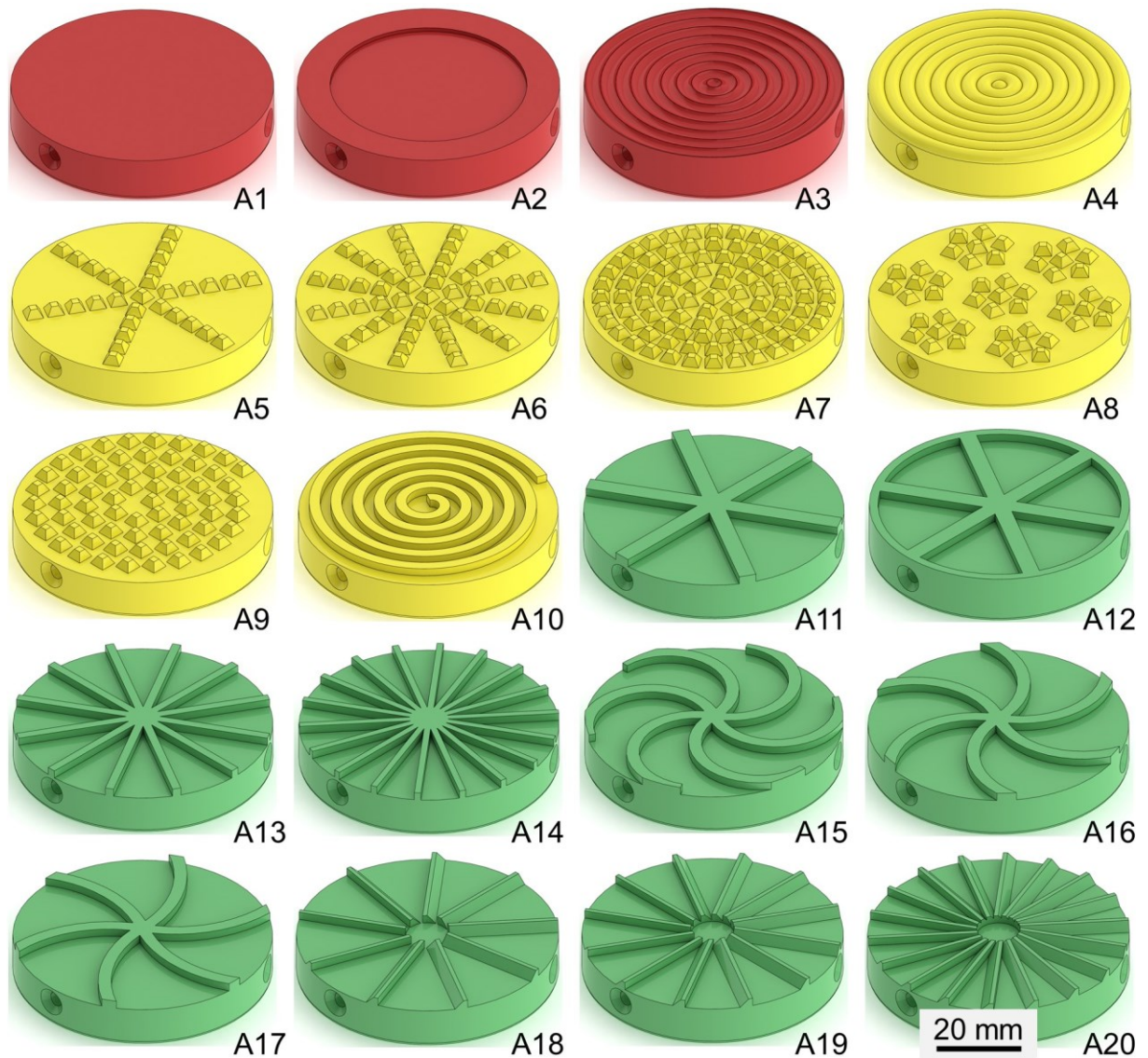
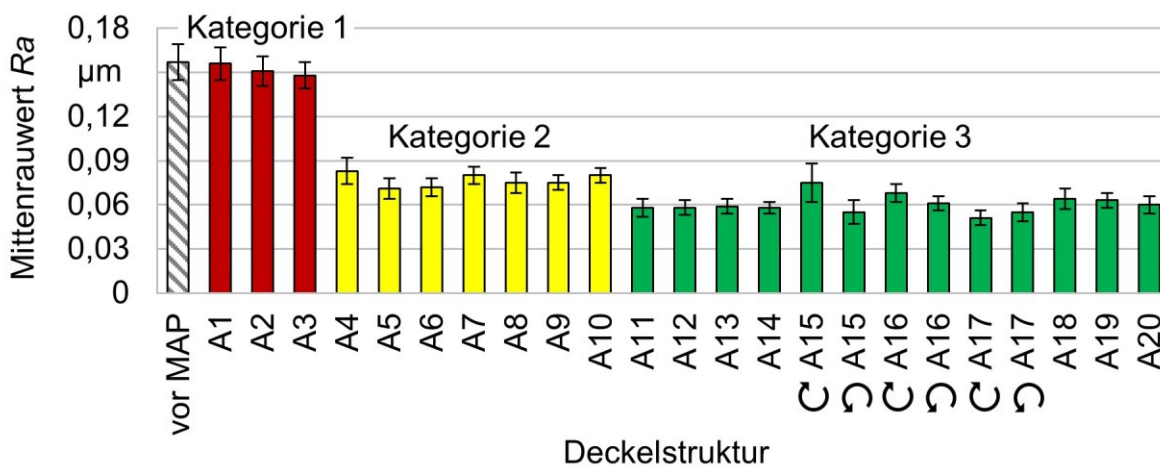


Bild 6.1: 3D-Modelle der durch FDM gedruckten Deckelstrukturen

Entscheidend für eine mechanische Pulververdichtung im Arbeitsspalt wirken demnach Barrieren in Umfangsrichtung. Diesbezüglich wurden die entwickelten Strukturen in die Kategorien (Bild 6.1): (1) Ungehinderte Umfangsbewegung (A1 – A3); (2) Unterbrochene Hindernisse in Umfangsrichtung (A4 – A10); (3) Ununterbrochene Hindernisse in Umfangsrichtung (A11 – A20) unterteilt. Die Deckelstrukturen der Kategorie 1 (A1 – A3) unterstützen nicht die mechanische Prozesswirkung, sodass die Oberfläche nur marginal bearbeitet wird. Diese Deckelstrukturen sind für das MAP unter Einsatz eines Permanentmagneten nicht geeignet. Die Kategorie 2 mit unterbrochener Struktur in Form von Pyramiden (A5 – A9) begünstigt die Pulverkinematik nur zum Teil und kann nicht als optimale Lösung bezeichnet werden. Die Wellen- (A4) und Spiralstruktur (A10) gehören zwar nicht direkt zur Kategorie 2, intensivieren aber die Bearbeitung zu Beginn, wenn eine große Menge an Pulver im Arbeitsspalt vorhanden ist. Danach sinkt die Wirkung und verläuft analog Kategorie 1. Die Deckelstrukturen aus der Kategorie 2 generieren eine hohe Oberflächengüte von $R_a = 0,07 - 0,08 \mu\text{m}$. Die Strukturen der Kategorie 3 (A11 – A20) sind durch die besten Ergebnisse in Bezug auf die Rauheit ($R_a = 0,055 - 0,06 \mu\text{m}$) gekennzeichnet. Die ununterbrochenen Hindernisse tragen zur örtlichen Reduzierung des Fließquerschnitts des magnetabrasiven Pulvers bei. Dadurch werden die Körner mechanisch verdichtet, was die Normalkraft zusätzlich zur magnetischen Wirkung signifikant erhöht.



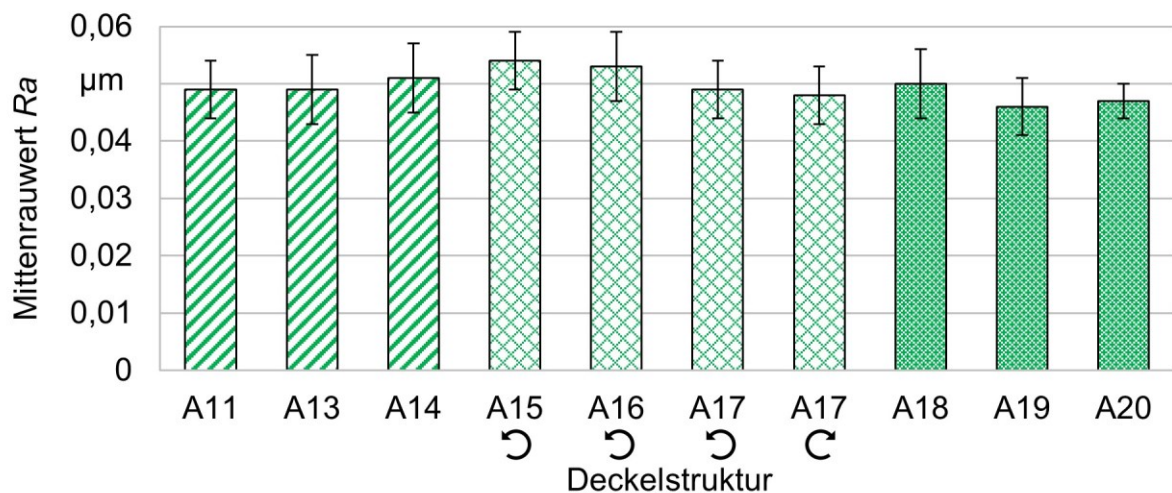
Verfahren: Plan-MAP
Werkzeugtyp: A
Deckel: variabel
Werkstoff: 1.0037
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)

Ausgangsoberfläche:
 gefräst $R_a = 0,165 \pm 0,014 \mu\text{m}$
Werkzeug: CoroMill245
 $D = 80 \text{ mm}$, $z = 4$
WSP: R245-12 T3 E-ML
Schneidstoff: HM (1130)
Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:
 gefräst MAP
 $n = 800$ 700 [U/min]
 $f = 400$ 25 [mm/min]
 $a_p = 0,3$ 1,5 [mm]
Pulver: FerroMAP 200/315 μm

Bild 6.2: Einfluss der unterschiedlichen Deckelstrukturen auf den Mittentrauert

In der zweiten Versuchsreihe wurde die Kategorie 3 bei geringerer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mm/min in Doppelweg-Bearbeitungsstrategie und höherer Drehzahl von 900 U/min detaillierter untersucht. Die geschlossene Struktur A12 sowie die Deckel A15 und A16 bei der Drehrichtung im Uhrzeigersinn wurden dabei aufgrund der in Vorversuchen ermittelten neutralen bzw. nachteiligen Prozesswirkung nicht betrachtet. Um die Überhitzung der Deckel zu vermeiden, wurde eine Kühlluftdüse auf der Werkstückseite eingesetzt. Die Ergebnisse sind im Bild 6.3 dargestellt. Bei höherer Bearbeitungszeit ergeben sich marginale Unterschiede in der Oberflächengüte beim Einsatz der ununterbrochenen Strukturen untereinander. Es können jedoch folgende Tendenzen zusammengefasst werden: (1) Bei zu schmalen Strukturen mit erhöhter Strukturweite sinkt die erzeugte Oberflächengüte (A14); (2) Die Strukturanzahl spielt bei gleicher Verdichtungsfläche eine untergeordnete Rolle (A11, A13); (3) Ein großer Schaufelradius wirkt negativ auf den Prozess (A15, A16); (4) Eine gebogene Struktur (A15 – A17) bringt keine Vorteile im Vergleich zu A11; (5) Eine geringere Strukturanzahl gleicher Elemente reduziert die Prozessintensität (A18 – A20).



Verfahren: Plan-MAP

Werkzeugtyp: A

Deckel: variabel

Werkstoff: 1.0037

Oberfläche verölt
(KMT 80)

Ausgangsoberfläche:

gefräst Ra = 0,162 ± 0,017 µm

Werkzeug: CoroMill245

D = 80 mm, z = 4

WSP: R245-12 T3 E-ML

Schneidstoff: HM (1130)

Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:

gefräst MAP

n 800 900 [U/min]

f 400 20 x2 [mm/min]

a_p 0,3 1,5 [mm]

Kühlluftdüse: ein

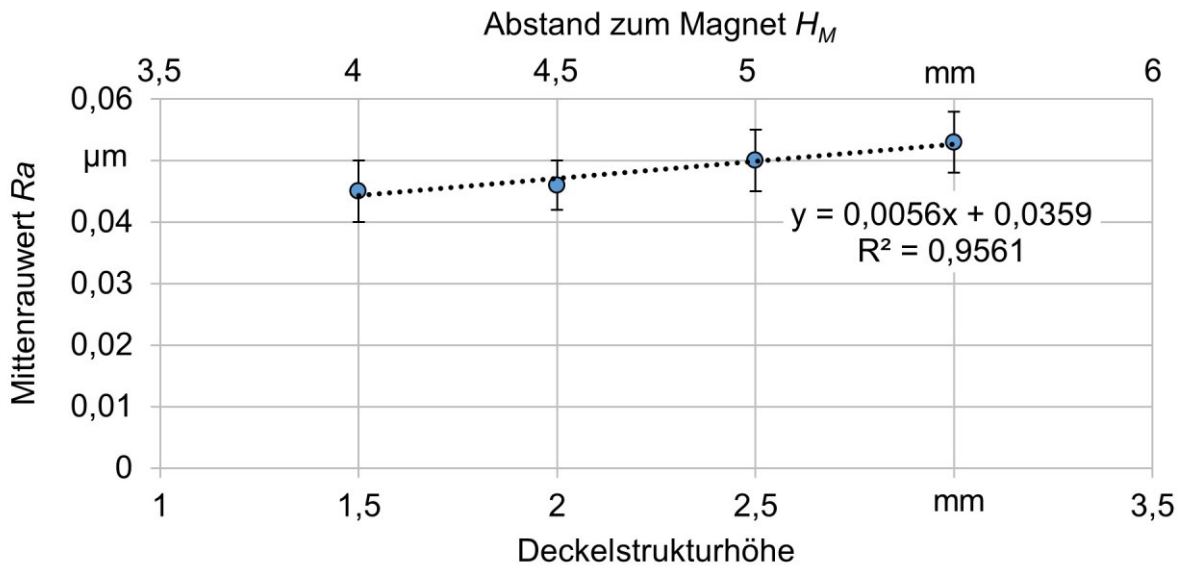
Pulver: FerroMAP 200/315 µm

Bild 6.3: Detaillierte Untersuchung der Deckelstrukturen aus der Gruppe 3

Fazit: Die Kategorie 3 der Deckelstrukturen mit ununterbrochenen Hindernissen in Rotationsrichtung begünstigen das MAP am stärksten. Die Basisstruktur A11 wird aufgrund der positiven Prozesswirkung für weitere Untersuchungen eingesetzt.

6.2 Deckelstrukturhöhe

Zur Untersuchung des Einflusses der Deckelstrukturhöhe auf die Oberflächengüte wurden Strukturen im Bereich von 1,5 mm bis 3 mm eingesetzt. Der Arbeitsabstand wurde bei den Versuchen immer konstant gehalten, sodass die mechanische Verdichtung des Pulvers gleichbleibt. Dementsprechend steigt der Abstand zum Magnet mit der Höhe der Deckelstruktur, was zur Reduzierung der magnetischen Flussdichte und des Abtragsverhaltens im Prozess führt. Da die magnetische Flussdichte beim starken und großen Permanentmagnet relativ schwach mit dem Abstand sinkt (ca. 20 mT/mm, Kap. 5.5), wirkt sich diese Reduzierung in relativ kleinen aber konstanten Unterschieden in der erzeugten Oberflächengüte aus (Bild 6.4).



Verfahren: Plan-MAP

Werkzeugtyp: A

Deckel: A11

Werkstoff: 1.0037

Oberfläche verölt
(KMT 80)

Ausgangsoberfläche:

gefräst Ra = 0,168 ± 0,015 µm

Werkzeug: CoroMill245

D = 80 mm, z = 4

WSP: R245-12 T3 E-ML

Schneidstoff: HM (1130)

Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:

gefräst MAP

n 800 900 [U/min]

f 400 20 x2 [mm/min]

a_p 0,3 1,5 [mm]

Kühlluftdüse: ein

Pulver: FerroMAP 200/315 µm

Bild 6.4: Einfluss der Deckelstrukturhöhe auf den Mittenrauwert

Fazit: Mit steigendem Abstand zum Magnet bzw. steigender Deckelstrukturhöhe sinkt die magnetische Flussdichte im Arbeitsspalt näherungsweise linear, was wiederum zu einer Reduzierung der Oberflächengüte führt. Somit beeinflusst die Abweichung im Arbeitsabstand den Prozess viel stärker als der gleiche Unterschied im Abstand zum Magnet, was die Schlüsselrolle der mechanischen Pulververdichtung zur Steigerung der Prozessintensität beim magnetabrasiven Polieren bekräftigt.

6.3 Deckelverschleiß

Für eine effiziente Fertigung unterschiedlicher Strukturen wurde die additive Herstellung im PLA-Kunststoffdruck durch das FDM-Verfahren verwendet. PLA weist relativ niedrige maximale Einsatztemperaturen von 60 °C und eine niedrige Steifigkeit auf. Mit der steigenden Prozesstemperatur sinkt somit die Festigkeit des Kunststoffes signifikant, was zur plastischen Verformung der Deckelstruktur aufgrund der Anziehungskraft des Permanentmagneten zum ferromagnetischen Werkstück führt (Bild 6.5), da der Magnet in dem Gehäuse nicht verspannt ist. Bei erhöhter Temperatur wird zuerst die komplette Fläche unter dem Permanentmagneten inkl. Deckelstruktur axial verformt (Bild 6.5b). Bei sehr hohen Temperaturen wird die Struktur entgegen der Drehrichtung plastisch deformiert (Bild 6.5c) oder in das Werkstück gepresst (Bild 6.5d). Erhöhte Prozesstemperaturen treten entweder bei langer Bearbeitungszeit ($f < 20$ mm/min) oder hoher Drehzahl ($n > 1100$ U/min) auf. Die plastische Deformation der Deckelstruktur findet auch bei niedriger Temperatur aber dauerhaftem Einsatz aufgrund der Ermüdung des Kunststoffes statt. Die Mehrzahl der Versuche wurden im optimalen Arbeitsabstand durchgeführt. Eine geringe Unterschreitung dessen von 0,1 – 0,2 mm führt zu Prozessstörungen und zum starken Korneindringen in das Bauteil sowie häufiger Kratzerbildung. Dabei wird die Oberfläche stark beschädigt und diese Ergebnisse sind somit nicht weiter verwertbar. Aus diesem Grund wurden die Deckelstrukturen regelmäßig auf plastische Verformungen geprüft und bei Bedarf erneuert. In Bezug auf die Verschleißbeständigkeit ergibt sich hier ein eindeutiger Bedarf zur Substitution des Deckelwerkstoffes.

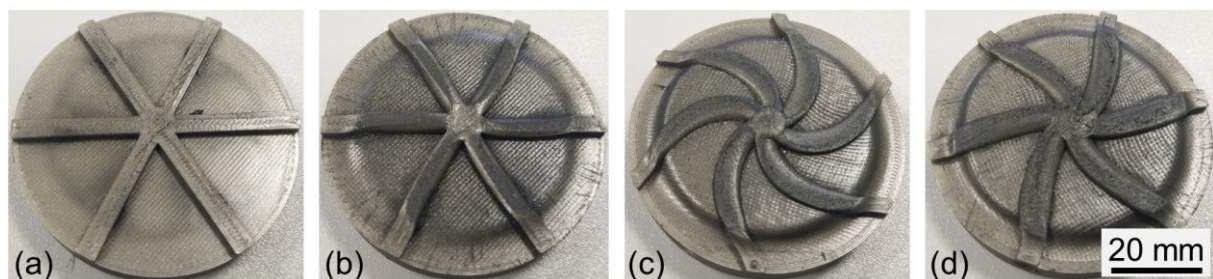
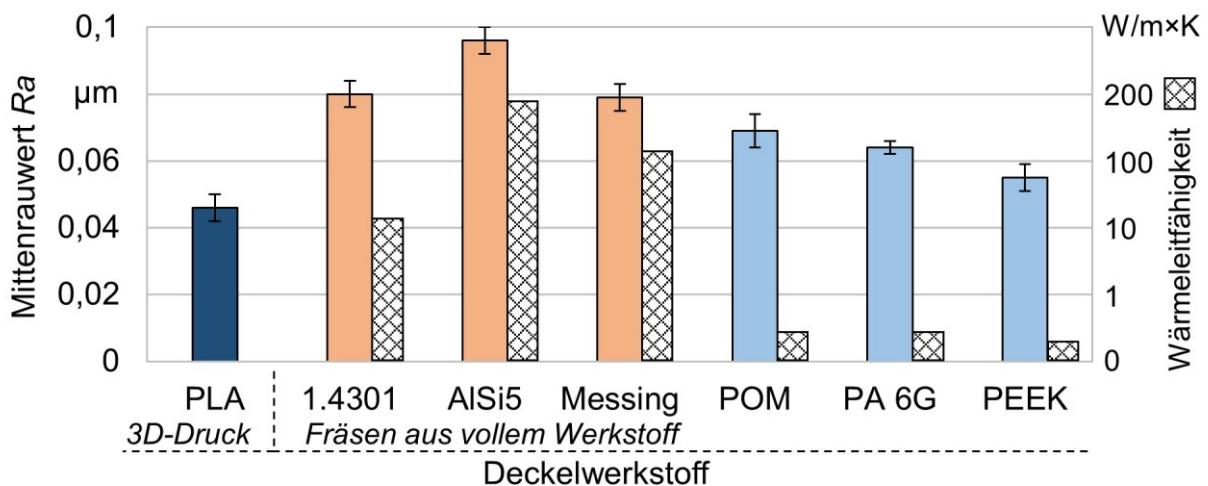


Bild 6.5: Deckelstruktur A11 nach dem Einsatz bei a) geringer, b-d) erhöhter Prozesstemperatur

Fazit: Die additiv gefertigten PLA-Deckelstrukturen neigen sehr stark zur plastischen Verformung bei erhöhter Prozesstemperatur oder dauerhaftem Einsatz.

6.4 Einfluss des Deckelwerkstoffes

In Vorversuchen wurde gezeigt, dass metallische Deckelwerkstoffe, welche durch Fräsen erzeugt wurden, die Prozessintensität negativ beeinflussen. Der Einfluss des Deckelwerkstoffes auf das magnetabrasive Polieren soll entsprechend detaillierter untersucht werden. Für eine ausführlichere Betrachtung wurden neben den additiv-gefertigten PLA-Deckeln weitere Deckel aus metallischen Werkstoffen (Edelstahl 1.4301, Aluminiumlegierung AlSi5, Messing) und drei Kunststoffen (POM, PA, PEEK) aus vollem Rohmaterial gefräst sowie unter gleichen Prozessbedingungen untersucht. Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe sowie die Ergebnisse sind im Bild 6.6 dargestellt.



Verfahren: Plan-MAP
Werkzeugtyp: A
Deckel: A11
Werkstoff: 1.0037
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)

Ausgangsoberfläche:
 gefräst $Ra = 0,138 \pm 0,02 \mu\text{m}$
Werkzeug: CoroMill245
 $D = 80 \text{ mm}, z = 1$
WSP: R245-12 T3 E-ML
Schneidstoff: HM (1130)
Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:
 gefräst MAP
 n 800 900 [U/min]
 f 200 20 x2 [mm/min]
 a_p 0,3 1,5 [mm]
Pulver: FerroMAP 200/315 μm

	Metalle			Kunststoffe		
	1.4301	AlSi5	Messing	POM	PA 6G	PEEK
Dichte [kg/m^3]	7900	2700	8430	1410	1150	1310
Zugfestigkeit [N/mm^2]	700	120	350	67	83	116
Wärmeleitfähigkeit [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]	15	180	113	0,39	0,38	0,27

Bild 6.6: Einfluss des Deckelwerkstoffes auf den Mittenrauwert

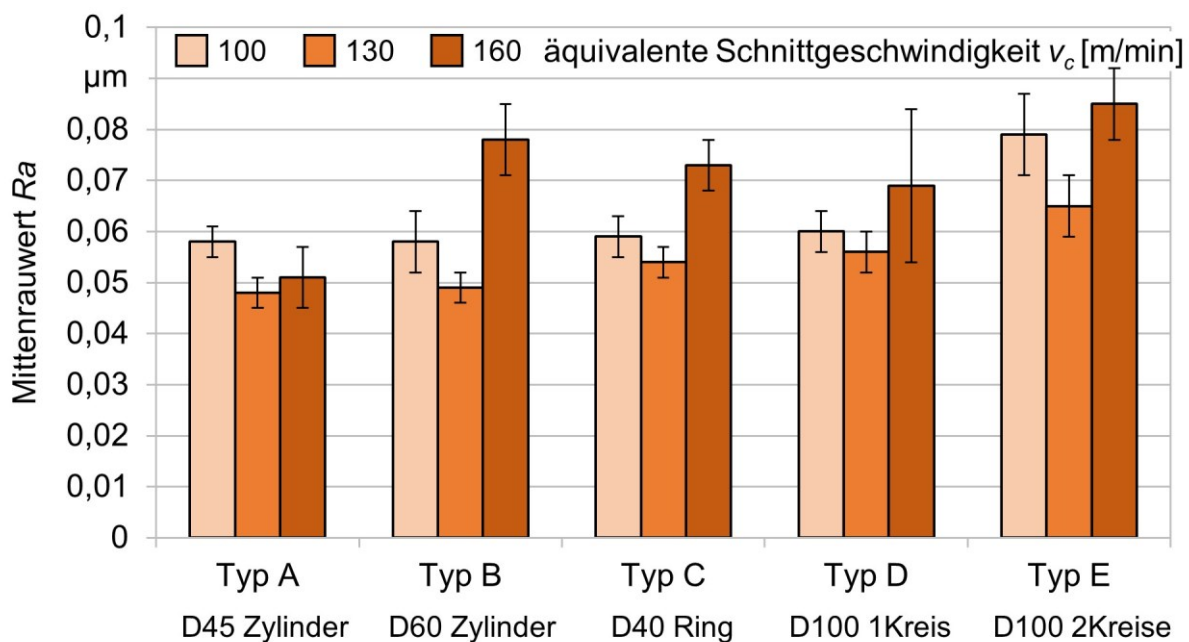
Die Ergebnisse der Rauheitsmessung zeigen eindeutig, dass die metallischen Deckel das MAP am wenigsten positiv unterstützen. Die gefrästen Kunststoffdeckel sind für den Prozess vorteilhafter. Allerdings scheint der additiv gefertigte PLA-Deckel nach wie vor die positivste Prozesswirkung aufzuweisen. Die Ergebnisse können nicht direkt mit der Dichte oder Zugfestigkeit der Werkstoffe korreliert werden. Die magnetischen Eigenschaften der Deckel spielen dabei auch eine vernachlässigbare Rolle, da alle eingesetzten Deckelwerkstoffe entweder zu para- oder diamagnetischen Materialien gehören. Eine Korrelation zur Wärmeleitfähigkeit scheint möglich. Nach jedem Versuchsdurchgang wurde die Temperatur des MAP-Werkzeuges und Werkstückes qualitativ bzw. manuell überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass bei den metallischen Deckeln das MAP-Werkzeug eine Wärmesenke darstellt und das Werkstück relativ kühl bleibt. Bei den Kunststoffdeckeln wurde der umgekehrte Effekt beobachtet. Die Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe liegt um den Faktor von ca. 40 bis ca. 600 geringer als bei den verwendeten metallischen Werkstoffen. Daher nehmen die Metaldeckel und somit das MAP-Werkzeug mehr Wärme auf. Der Permanentmagnet aus $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ ist durch eine hohe Temperatursensitivität gekennzeichnet. Dies führt zum starken Verlust der magnetischen Flussdichte bei höherer Temperatur. Die maximale Einsatztemperatur der verwendeten Magneten liegt laut Herstellerdatenblatt bei 80 °C. Eine deutlich geringere magnetische Flussdichte im Arbeitsspalt führt zur starken Reduzierung der Prozessintensität. Der Kunststoffdeckel zeigt dagegen eine wärmeisolierende Wirkung. Folglich wird der Einsatz von thermisch isolierenden Werkstoffen mit hoher Verschleißbeständigkeit empfohlen.

Ein weiterer Betrachtungsaspekt stellt die oberflächennahe Elastizität des Werkstoffs bzw. dessen Härte dar. Durch einen tieferen Eintritt der magnetabrasiven Körner in die Deckeloberfläche (sowohl Struktur als auch großflächige Plateaus) wird die Kornumwälzung bzw. Pulverbewegung im Arbeitsspalt intensiviert. Dies kann die intensivere Prozesswirkung in der Nutzung von Kunststoff erklären. Eine erhöhte Oberflächenrauheit der Deckel, welche bei additiv gefertigten Bauteilen zu beobachten war, erhöht die Hindernisanzahl auf der Mikroebene für das magnetabrasive Pulver, was wiederum die Kornumwälzung und somit die erhöhte Abrasivität fördert.

Fazit: „Weiche“ und raue Deckel mit niedriger Wärmeleitfähigkeit steigern die Prozessfähigkeit beim MAP. Gefräste und demnach vergleichsweise glatte Metaldeckel reduzieren die Prozessintensität. Eine Mikrostrukturierung der Metaldeckel wird daher empfohlen.

6.5 Vergleich der Plan-MAP-Werkzeugtypen

Die Prozessfähigkeit der fünf Werkzeugtypen (detaillierte Konstruktionsbeschreibung in Kap. 4.3) für das Plan-MAP wurde bei unterschiedlichen Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten untersucht. Der Arbeitsabstand wurde bei 1,8 mm für die Korngröße 315/400 μm aus dem Kapitel 5.3 bei allen Versuchen konstant gehalten. Da bei größerem Werkzeugdurchmesser breitere Fläche bearbeitet werden, konnten mit dem Werkzeug vom Typ B nur zwei Überfahrten und dem Typ D sowie E nur eine Überfahrt auf dem vorab definierten und konstant gewählten Werkstück erfolgen, um Bahnüberschneidung zu vermeiden. Im Kapitel 5.2 wurde die optimale Drehzahl von 900 U/min für den Typ A ermittelt. Das entspricht der äquivalenten Schnittgeschwindigkeit von ca. 130 m/min auf dem größten Umfang des Permanentmagneten beim Durchmesser von 45 mm. Diese Schnittgeschwindigkeit und jeweils eine um ca. 30 m/min höhere sowie niedrigere Schnittgeschwindigkeit wurden bei allen anderen Werkzeugtypen untersucht und die Drehzahl entsprechend umgerechnet. Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe sind im Bild 6.7 dargestellt.



Verfahren: Plan-MAP

Werkzeugtyp: variabel

Deckel: A11

Werkstoff: 1.0037

Oberfläche verölt
(KMT 80)

Ausgangsoberfläche:

gefräst $Ra = 0,142 \pm 0,01 \mu\text{m}$

Werkzeug: CoroMill245

$D = 80 \text{ mm}$, $z = 1$

WSP: R245-12 T3 E-ML

Schneidstoff: HM (1130)

Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:

gefräst MAP

n 2400 variiert [U/min]

f 200 30 x2 [mm/min]

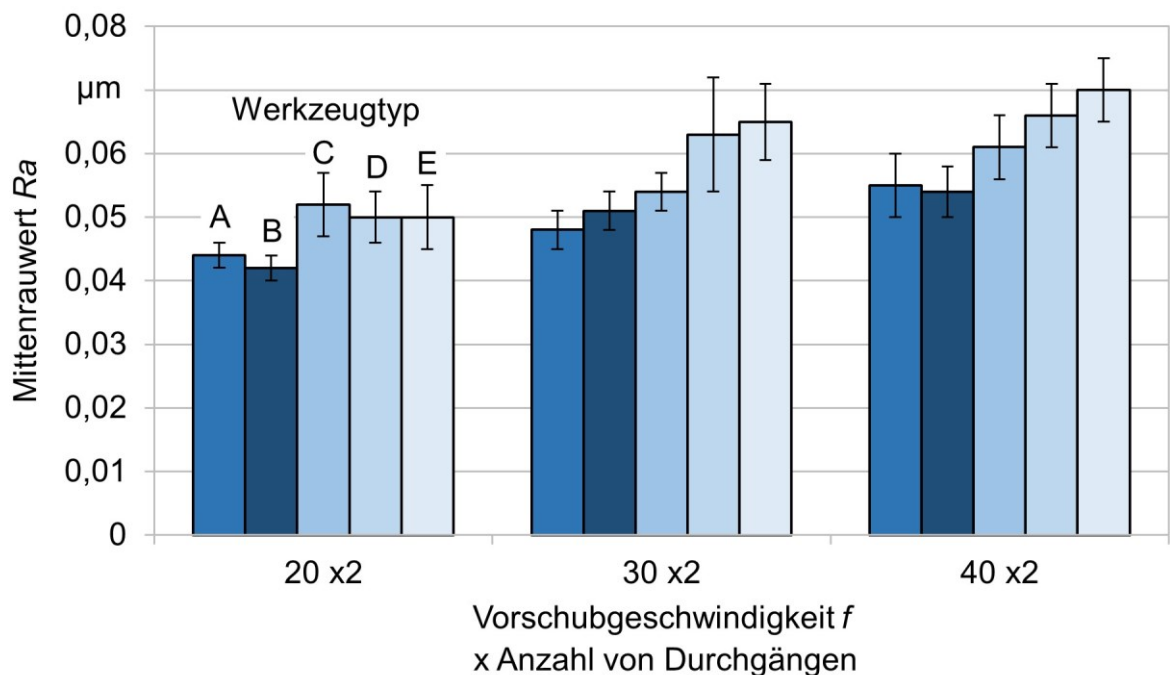
a_p 0,3 1,8 [mm]

Pulver: FerroMAP 315/400 μm

Bild 6.7: Einfluss der äquivalenten Schnittgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Werkzeugtypen

Aus den Untersuchungen folgt eindeutig, dass die äquivalente Schnittgeschwindigkeit von ca. 130 m/min auch bei anderen Werkzeugtypen die beste Oberflächengüte erzeugt. Eine geringere Drehzahl führt zur schwächeren Korneindringung in die Oberfläche sowie zu geringerem Abtrag des Ausgangsprofils bzw. höherem Mittenrauwert. Bei einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit kommt es zu einer deutlichen erhöhten Wärmeentwicklung im Prozess. Dabei wird die Wärme auch auf das MAP-Werkzeug übertragen, was zur starken Reduzierung der magnetischen Flussdichte im Arbeitsspalt führt, da die maximale Einsatztemperatur der verwendeten Permanentmagneten aus Fe₁₄Nd₂B bei 80 °C liegt. Dies wird am Beispiel des Werkzeugtyps B mit dem extrem großen und starken Zylindermagnet am stärksten beobachtet.

In der zweiten Versuchsreihe wurden alle Werkzeugtypen bei drei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten in der Doppelweg-Bearbeitungsstrategie miteinander verglichen. Die optimale äquivalente Schnittgeschwindigkeit wurde aus der ersten Versuchsreihe (130 m/min) übernommen. Die Ergebnisse sind im Bild 6.8 dargestellt.



Verfahren: Plan-MAP
Werkzeugtyp: variabel
Deckel: A11
Werkstoff: 1.0037
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)

Ausgangsoberfläche:
 gefräst Ra = 0,138 ± 0,01 µm
Werkzeug: CoroMill245
 D = 80 mm, z = 1
WSP: R245-12 T3 E-ML
Schneidstoff: HM (1130)
Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:
 gefräst MAP
 v_c 600 130 [m/min]
 f 200 variiert [mm/min]
 a_p 0,3 1,8 [mm]
Pulver: FerroMAP 315/400 µm

Bild 6.8: Vergleich der Werkzeugtypen bei drei Vorschubgeschwindigkeiten

Alle Werkzeugtypen können sehr hohe Oberflächengüte von $Ra = 0,04 - 0,05 \mu\text{m}$ bei niedriger Vorschubgeschwindigkeit von 20 mm/min in zwei Durchgängen erzeugen. Allerdings sinkt die Prozessintensität bei den Werkzeugtypen C, D und E mit höherem Vorschub sehr stark. Die Werkzeugtypen A und B erzeugen dabei die besten Ergebnisse unabhängig von der Bearbeitungszeit und können bei erhöhter Prozessproduktivität die gleiche Oberflächengüte wie die anderen Werkzeugtypen gewährleisten. Beispielhaft wurde eine gleiche oder zum Teil bessere Oberflächengüte mit den Werkzeugtypen A und B bei der Vorschubgeschwindigkeit von 30 mm/min als mit den Werkzeugtypen C, D und E beim Vorschub von 20 mm/min erzeugt. Dies entspricht einer Zeitersparnis bzw. Produktivitätserhöhung von 50%.

Aus den Untersuchungen folgt, dass die Werkzeugtypen mit kontinuierlicher Ausdehnung der magnetischen Flussdichte bzw. einem großen und starken Permanentmagnet (Werkzeugtyp A und B) die beste Oberflächengüte erzeugen. Darauf folgt der Typ C mit einem Zylinder und Ringpermanentmagnet sowie schwächerer Magnetfeldstärke. Die Werkzeuge größerer Durchmesser mit mehreren Magneten auf einem und zwei Flugkreisen vom Typ D und E erzeugen die niedrigste Oberflächengüte, die viel stärker als bei den kleineren Werkzeugen schwankt. Dies könnte auch damit zusammenhängen, dass die Unwucht bei größerem Werkzeugdurchmesser viel stärker ausgeprägt ist. Die Ergebnisse des Werkzeugtypenvergleiches werden durch zwei Hypothesen erklärt:

- 1) Eine höhere magnetische Flussdichte (Werkzeugtyp A und B) verursacht tieferes Korneindringen und demnach eine intensivere Bearbeitung.
- 2) Polwechsel am Werkzeug (Werkzeugtyp C, D, und E) bei unterschiedlicher Anordnung mehrerer Permanentmagnete reduziert die Pulverbewegung bzw. Kornumwälzung im Arbeitsspalt und somit die Prozessintensität (Verteilung magnetischer Flussdichte unterschiedlicher Werkzeugtypen in Kap 4.3).

Allerdings sind diese Zusammenhänge nur für die Bearbeitung von ferromagnetischen Werkstoffen belegt. Beim magnetabrasiven Polieren von para- und diamagnetischen Materialien ohne Gegenmagnet werden vermutlich die Werkzeugtypen C, D und E bessere Ergebnisse zeigen, da das Magnetfeld sich am MAP-Werkzeug schließt.

Fazit: Für das magnetabrasive Polieren von ferromagnetischen Werkstoffen sind die Werkzeugtypen A und B bzw. der Einsatz eines großen und starken Zylinderpermanentmagneten zu empfehlen.

7 Prozessmodifizierung und Werkstückeigenschaften

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Maßnahmen, wie die Variation der Ölviskosität, die Zugabe von Abrasivmitteln und die Ultraschallanregung untersucht, um die Prozessfähigkeit zu erhöhen. Darüber hinaus wird das MAP unterschiedlicher Stahlsorten näher erläutert und der Einfluss unterschiedlicher Ausgangsoberflächen umfangreich analysiert.

7.1 Einfluss des Schmierstoffes

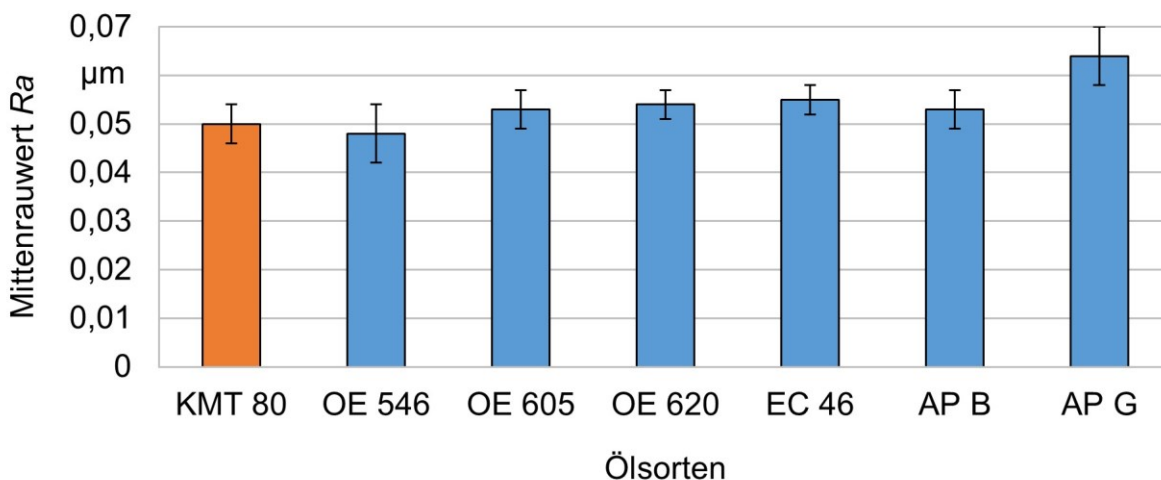
Für die Ermittlung des Einflusses der Ölsorten wurden neben des Basisöls bei vorherigen Versuchen KMT 80 noch sechs weitere Öle unterschiedlicher Zusammensetzung und Viskosität bei gleichen Prozessparametern untersucht (Tabelle 7.1). Die wichtigsten Eigenschaften aus den Herstellerdatenblättern sind nachfolgend zusammengefasst:

- a) KMT 80: ein synthetisches Hochleistungs-, Schmier-, Schneid- und Stanzmittel, geeignet für Gewindeschneiden, -bohren, Drehen, Stanzen, Stoßen und Bohren.
- b) Oemetol 546: auf Basis synthetischer Esteröle, geeignet für Zerspanungs- und Umformprozesse sowie Sinterwerkstoffe.
- c) Oemetol 605 HM: auf Basis synthetischer GTL-Öle („Gas-to-Liquids“), geeignet für Honen sowie Hartmetallzerspanung.
- d) Oemetol 620 HC: auf Basis synthetischer Hydrocracköle, geeignet für Drehen, Bohren, Fräsen sowie Fe-Metalle und NE-Metalle.
- e) Microtol EC 46: auf Basis synthetischer Esteröle, geeignet für Zerspanung sowie hochlegierte Stähle, Al- und Gusseisenlegierungen.
- f) Addi-Prox B: Schmierleistungsadditiv für Kühlschmierstoffe, optimiert auf die Anforderungen der Zerspanungsprozesse.
- g) Addi-Prox G: Schmierleistungsadditiv für Bearbeitungsöle, optimiert auf die Anforderungen der Schleifbearbeitung.

Tabelle 7.1: Kennwerte unterschiedlicher Ölsorten

	KMT		Oemetol		Microtol	Addi-Prox	
	80	546	605 HM	620 HC	EC 46	B	G
Dichte [kg/m ³]	930	863	806	851	924	1029	926
Viskosität [mm ³ /s]	44	4	4	22	46	56	76

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zeigen vernachlässigbare Unterschiede beim Einsatz unterschiedlicher Ölsorten (Bild 7.1). Mit Addi-Prox G wurden die schlechtesten Ergebnisse aufgrund höherer Viskosität oder chemischer Zusammensetzung erzielt. Mit Oemetol 546 konnte ein leicht reduzierter Mittenrauwert im Vergleich zu KMT 80 erreicht werden. Allerdings liegt die Standardabweichung höher, daher wurde die Ölsorte KMT 80 weiterhin als Basisöl für alle weitere Untersuchungen eingesetzt. Unabhängig von der Ölsorte entsteht ein Schlamm beim magnetabrasiven Polieren, der besonders stark bei der Bearbeitung von ferromagnetischen Werkstoffen ausgeprägt ist. Dieser Effekt ist damit verbunden, dass ein starkes Magnetfeld auf der Bauteiloberfläche durch die Werkstückmagnetisierung entsteht und die Mikrospäne und die Pulverabriebpartikel bindet, die mit dem Öl vermischt werden. Bei günstiger Kombination im System Werkstückwerkstoff-Schneidstoff-Schmierstoff kann dieser Schlamm ohne großen Aufwand entfernt werden. Bei ungünstiger Kombination (z.B. KSS Novamet 900) entsteht ein fester Schlamm, der zur Prozessstörung führt.



Verfahren: Plan-MAP

Werkzeugtyp: A

Deckel: A11

Werkstoff: 1.0037

Oberfläche verölt
(Öl variiert)

Ausgangsoberfläche:

gefräst Ra = 0,135 ± 0,028 µm

Werkzeug: CoroMill245

D = 80 mm, z = 1

WSP: R245-12 T3 E-ML

Schneidstoff: HM (1130)

Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:

gefräst MAP

n 2400 900 [U/min]

f 200 25 [mm/min]

a_p 0,3 1,5 [mm]

Pulver: FerroMAP 200/315 µm

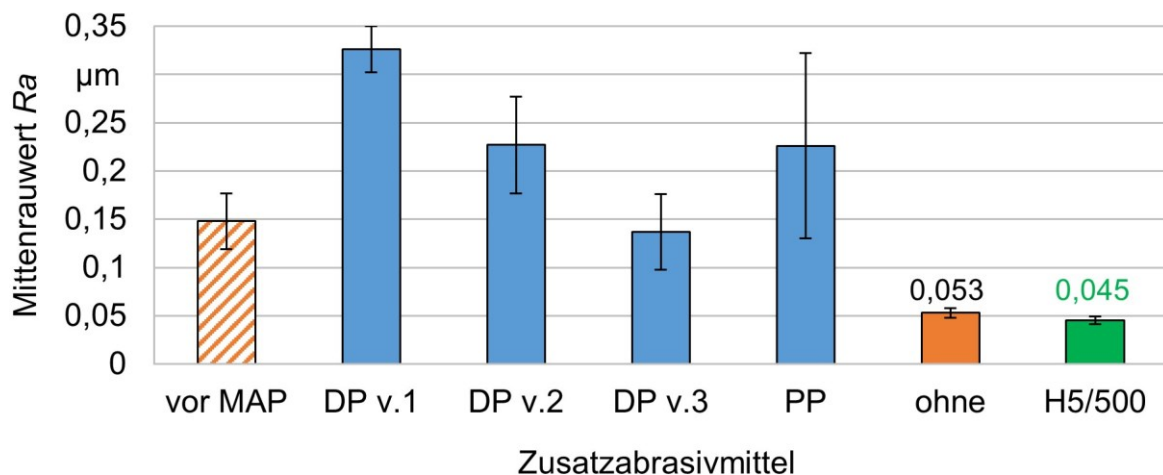
Bild 7.1: Einfluss der Ölsorten auf den Mittenrauwert

Fazit: Es wurden keine relevanten Unterschiede beim Einsatz unterschiedlicher Ölsorten festgestellt. KMT 80 wurde weiterhin als Basisöl für alle weiteren Untersuchungen eingesetzt.

7.2 Einfluss des Zusatzabstrivmittels

Ein mechanisches Gemisch aus nichtferromagnetischen, abrasiven Pulverpartikel (Korund, Siliziumkarbid oder Diamant) in Kombination mit Eisenkörnern wurde in vielen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht und erfolgreich eingesetzt [Kang12a, Liu14, Muli11, Nave18, Vahd16, Yama14a]. In dieser Konfiguration nehmen die ferromagnetischen Eisenpartikel die Abrasivkörner mit der Bewegung mit und drücken diese in die Werkstückoberfläche. Dieser Effekt wurde in der vorliegenden Arbeit für die Verstärkung der Wirkung vom magnetabrasiven Pulver „FerroMAP“ durch den Einsatz unterschiedlicher Abrasivmedien untersucht.

Eine Diamantpaste (Korngröße 5,5 – 8 µm) der Fa. Rene Gerber AG wurde für den Prozess in drei Variationen eingebracht: v.1 – auf die komplette Werkstückoberfläche (ca. 40 g); v.2 – auf die komplette Werkzeug- bzw. Pulveroberfläche (ca. 15 g); v.3 – auf ein Teil der Werkzeugoberfläche (ca. 5 g). Die Polierpaste (P16) und ein Walnussgranulat (H5/500) der Fa. OTEC Präzisionsfinish GmbH wurden auch wie bei v.1 auf die komplette Werkstückoberfläche eingetragen. Danach wurde die Oberfläche eingölt und das magnetabrasive Polieren der Planflächen unter optimierten Prozessparametern sowie optimalem Arbeitsabstand von 1,5 mm für die Korngröße 200/315 µm durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Bild 7.2 dargestellt.



Verfahren: Plan-MAP
Werkzeugtyp: A
Deckel: A11
Werkstoff: 1.0037
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)

Ausgangsoberfläche:
 gefräst Ra = 0,148 ± 0,029 µm
Werkzeug: CoroMill245
 D = 80 mm, z = 1
WSP: R245-12 T3 E-ML
Schneidstoff: HM (1130)
Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:
 gefräst MAP
 n 2400 900 [U/min]
 f 200 30 x2 [mm/min]
 a_p 0,3 1,5 [mm]
Pulver: FerroMAP 200/315 µm

Bild 7.2: Einfluss des Zusatzabstrivmittels auf den Mittenrauwert

Die Polier- und Diamantpaste haben zu ungünstigen Reaktionen im System Werkstoff-Schneidstoff-Schmierstoff sowie starken Schlamm bildung geführt, welches die normale Bearbeitung eingeschränkt hat. Die Oberfläche wirkte matt und war durch eine schlechte Oberflächenqualität gekennzeichnet. Eine geringere Menge der Pasten konnte diese negative Wirkung reduzieren. Der Prozess konnte für die Stahlbearbeitung nicht effektiv umgesetzt werden. Allerdings hat das magnetabrasive Pulver die Polier- und Diamantpaste sehr gut aufgenommen und kann bei der Bearbeitung von Buntmetallen vorteilhafte Effekte bringen.

Das Walnussgranulat der Korngröße von 200 bis 400 μm (die kleinste verfügbare Pulvergröße bei Fa. OTEC Präzisionsfinish GmbH) wird in der Industrie für das Polieren von medizinischen Implantaten in einer Schleppscheifenanlage eingesetzt. Die Versuche mit Walnussgranulat beim MAP haben positive Effekte gezeigt. Zum einen wurde die Oberflächengüte weiterhin auf $R_a = 0,045 \mu\text{m}$ reduziert. Zum anderen konnte ein hoher Glanzgrad der Oberfläche festgestellt werden. Somit wurde eine günstige Wirkung des Walnussgranulats auf das magnetabrasive Polieren von ferromagnetischen Stähle als Unterstützung zum verwendeten magnetabrasiven Pulver festgestellt.

In der Literatur sind auch diverse Erkenntnisse für die Zugabe der Abrasivpasten zum magnetabrasiven Pulver vorhanden. Der Einsatz unterschiedlicher Korngrößen von 1/2 bis 80/100 μm bei der Stahlbearbeitung führte zum erhöhten Werkstoffabtrag, wobei die optimale Korngröße der Abrasivpaste in Abhängigkeit von der Ausgangsoberfläche ausgewählt werden muss. Eine höhere Korngröße führt zur Steigerung der Schnitttiefe der einzelnen Körner. Dabei wird aber die Anzahl aktiver Körner reduziert, was wiederum den Gesamtwerkstoffabtrag reduziert. Eine geringere Korngröße kann nur bedingt das grobe Ausgangsprofil reduzieren. Daher wird eine mehrstufige Bearbeitung empfohlen, um eine sehr niedrige Rauheit zu erzeugen. Abrasivpasten eignen sich besonders bei der Verfahrenskinetik mit rotierendem Werkstück [Olik90].

Fazit: Der Einsatz von Diamant- und Polierpaste als Unterstützung für das magnetabrasive Pulver führt zur starken Schlamm bildung und Prozessstörung bei der Stahlbearbeitung. Unter Verwendung von Walnussgranulat wurde hingegen eine bessere Oberflächengüte und höherer Glanzgrad als beim konventionellen MAP erreicht.

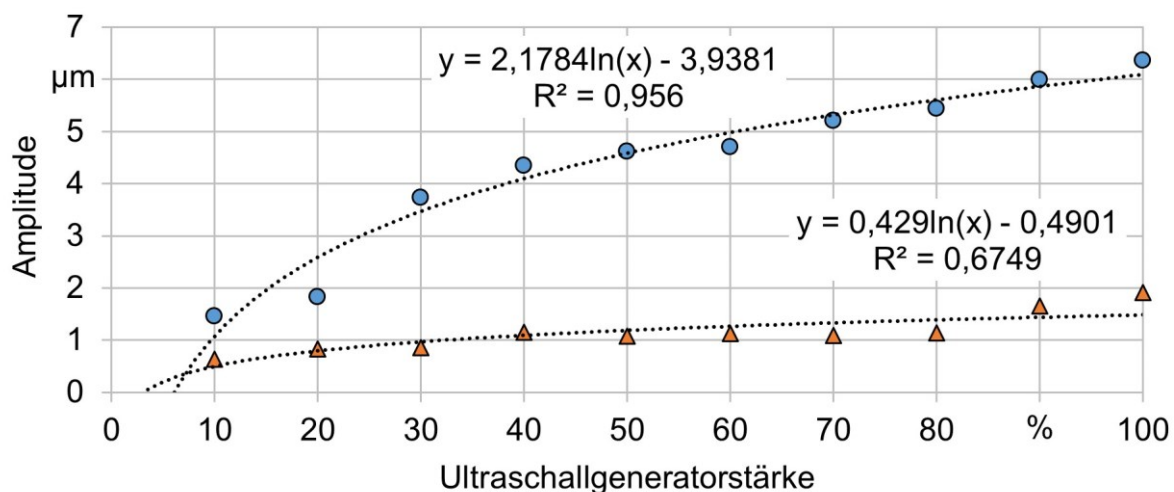
7.3 Ultraschallunterstütztes MAP

Beim magnetabrasiven Polieren wird in der Literatur hauptsächlich empfohlen, die Schwingungen am Werkzeug (Magnet) oder Werkstück mit niedriger Frequenz (10 – 25 Hz) und hoher Amplitude (1 – 5 mm) zu erzeugen, um die Prozessintensität signifikant zu erhöhen. Bei schweren Werkstücken wird meistens das Werkzeug bzw. der Magnet angeregt [Baro86, Saku81]. Die wichtigsten Vorteile, die sich durch Überlagerung des magnetabrasiven Polierens mit einer niederfrequenten Schwingung ergeben, werden nachfolgend zusammengefasst:

- a) Erhöhung der Oberflächengüte durch verbesserte Spanbrechung und somit Reduzierung der Schnitttiefe einzelner Körner.
- b) Verbesserung der Oberflächentopographie durch die Senkung der Rillenlänge nach der Mikrozerspanung mit unterbrochenem Schnitt und entsprechend die Erhöhung der Oberflächenisotropie.
- c) Erhöhung des Selbstschärfeffekts durch die Verstärkung der Beweglichkeit des magnetabrasiven Pulvers im Arbeitsspalt. Im Gegenteil zu weiteren abrasiven Finishverfahren mit fester Kornbindung (z.B. Honen, Superfinishen) wird beim MAP der Selbstschärfeffekt nicht durch das Ausbrechen der Körner aus der Bindung, sondern durch die Erhöhung der Kornumwälzung und -bewegung intensiviert [Baro86].

Die Ultraschallanregung beim magnetabrasiven Polieren kann theoretisch eine ähnliche Wirkung erzielen. Der Grundgedanke zum Einsatz von MAP-Verfahren auf Bearbeitungszentren besteht darin, die Werkzeugmaschine nur minimal zu modifizieren (z.B. Behälter für Pulveraufbewahrung, -präparation, Werkzeugreinigung) und die Einspannung des Werkstückes sowie die Spindelschnittstelle, den Werkzeugwechsel nicht zu beeinflussen. Aus diesem Grund wurde die niederfrequente Anregung in vorliegender Arbeit nicht untersucht. Allerdings existieren am Markt Sonderwerkzeugmaschinen wie z.B. die Ultrasonic-Serie von DMG MORI AG, die über eine Spindelschnittstelle mit Sonotrode zur Ultraschallanregung verfügen. Unter Nutzung der Werkzeugmaschine DMU 125 mit US-Spindel wurden die Versuche zum ultraschallunterstützten MAP durchgeführt. Dafür wurde die Gehäuse des Werkzeugtyps A für die Einspannung in einer US-Spannzangenaufnahme modifiziert, während der gleiche Permanentmagnet eingesetzt wurde. Die Konstruktion des neuen Werkzeugtyps F ist im Kap. 4.2.8 näher erläutert.

Am Anfang wurde die erreichte Schwingungsamplitude bei unterschiedlichen Stärken des Ultraschallgenerators für den Werkzeugtyp F mittels Vibrometer gemessen. Danach wurde das Schwingungsverhalten eines Vollhartmetallbohrers in Durchmesser von 10 mm gemessen und im Vergleich dargestellt. Die Messergebnisse sind im Bild 7.3 dargestellt und weisen eine logarithmische Abhängigkeit der Amplitude von der Ultraschallgeneratorstärke auf. Ab ca. 30% der Generatorstärke wird annähernd ein linearer Anstieg ermittelt. Die maximale Schwingungsamplitude liegt bei ca. 6,5 µm bei ca. 20 kHz für den Bohrer bei maximaler Generatorleistung. Die Amplitude beim MAP-Werkzeug weist deutlich geringere Werte innerhalb des Gesamtverlaufes auf und beträgt maximal ca. 2 µm bei ca. 36 kHz. Die geringere Amplitude wird aufgrund der größeren Dimensionen (besonders in Durchmesser), höheren Anzahl an Einzelbauteilen und dem lose gelagerten Permanentmagneten sowie der Schraubverbindung zwischen Deckel und Gehäuse erzeugt.



- | | | |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ● Bohrer
(Durchmesser 10 mm) ▲ MAP-Werkzeug | <p><u>Verfahren:</u> Plan-MAP
 <u>Werkzeugtyp:</u> F
 <u>Deckel:</u> A11</p> <p><u>Werkzeugaufnahme:</u>
 UAS-HSK63D86-ER20</p> | <p><u>Messrichtung:</u> axial
 <u>Vibrometer:</u> PSV-500</p> |
|--|---|---|

Bild 7.3: Erreichte Amplitude bei zunehmender Ultraschallgeneratorstärke für das MAP-Werkzeugtyp F und einen Bohrer als Referenz

Anschließend wurden die Versuche zum magnetabrasiven Polieren bei gleichen Prozessparametern ohne und mit Einsatz der Ultraschallunterstützung durchgeführt. Allerdings wurden keine Unterschiede in der erreichten Oberflächengüte festgestellt. Die Schwingungsamplitude von ca. 2 µm hat somit keinen Beitrag zur Erhöhung der Prozessintensität geleistet und wird als „zu gering“ bezeichnet.

Fazit: Eine Ultraschallanregung des MAP-Werkzeuges beeinflusst kaum den Prozess.

7.4 Einfluss der Ausgangsoberfläche

Die Ausgangsoberfläche vor dem Finishen beeinflusst bekanntermaßen die benötigte Bearbeitungszeit zur Erzeugung der finalen Oberflächengüte. Zu grobe bzw. raue Ausgangsoberflächen mit tiefen Rillen und Oberflächenbeschädigungen sind nicht für eine anschließende Finishbearbeitung geeignet. Feinere Ausgangsoberflächen reduzieren hingegen die Fertigungszeit des Finishverfahrens und entsprechend den Fertigungsaufwand.

Für die Ermittlung des Einflusses der Ausgangsoberfläche auf die endgültige Oberfläche nach dem magnetabrasiven Polieren wurden die Proben mit unterschiedlichen Verfahren und Werkzeugen jeweils bei zwei Parametervariationen vorbereitet (Tabelle 7.2). Dabei wurde die Bearbeitung mittels

- a) Schaftfräser in axialer (SF-A) und tangentialer (SF-T) Richtung,
- b) Planfräser (PF),
- c) Kugelfräser (KF) bei der senkrechten und schrägen Werkzeugachsenausrichtung,
- d) Schleifscheibe (S) bei grober und feiner Abrichtung auf einer separaten Schleifmaschine durchgeführt.

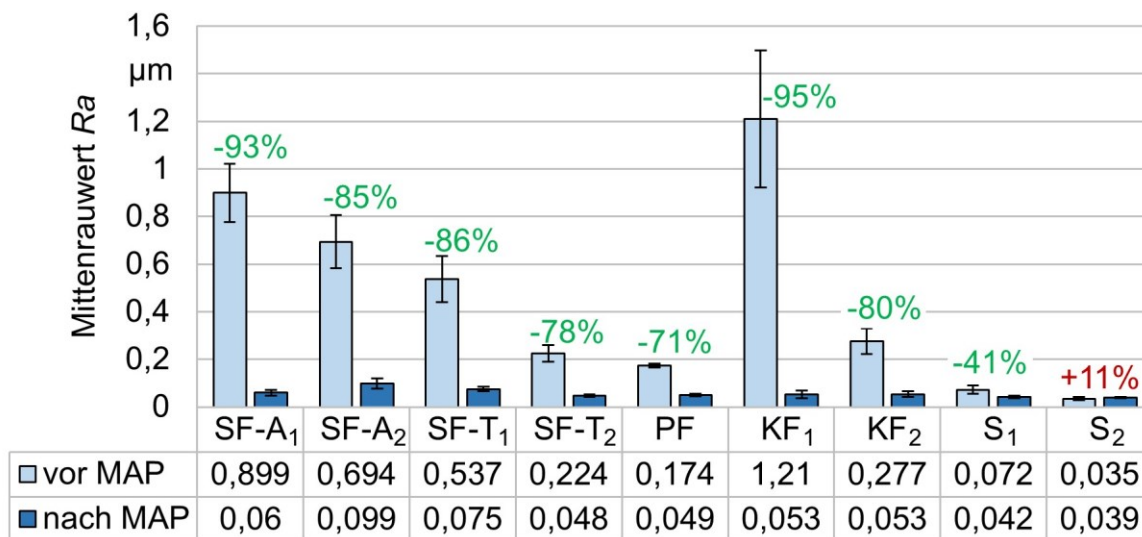
Anschließend wurden die Proben durch das MAP bei gleichen Prozessparametern bearbeitet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Bild 7.4 dargestellt.

Tabelle 7.2: Prozessparameter zur Herstellung unterschiedlicher Ausgangsoberfläche

Bezeichnung	SF-A	SF-T	PF	KF	S
Werkzeug	Schaftfräser z = 4	Schaftfräser z = 8	Planfräser z = 4	Kugelfräser z = 2	Schleif- scheibe
D [mm]	12	16	80	12	300
Schneidstoff	HM	HM	HM (1130)	HM	Tyrolit
Beschichtung	TiAlN (PVD)	TiAlN (PVD)	AlTiCrN (PVD)	TiAlN (PVD)	SU65A60 2HH9VB1
n_1/n_2 [U/min]	1300 / 3900	800 / 400	800	10.000	1300
v_{c1}/v_{c2} [m/min]	50 / 150	40 / 20	200	5 / 200	1200
f_1/f_2 [mm/min]	220 / 660	100 / 80	400	1000	300
a_{p1}/a_{p2} [mm]	0,1	50	0,3	0,1	0,002
a_{e1}/a_{e2} [mm]	9,6 / 3,6	0,1 / 0,05	50	0,1	2
ψ [°]	0	90	0	0 / 45	90
KSS	Novamet 900, Anteil 8%				

Die erzeugten Ausgangsoberflächen sind durch eine breite Streuung des Mittenrauwertes Ra von 0,035 μm nach dem Schleifen bis hin zu 1,21 μm nach dem Kopierfräsen bei senkrechter Werkzeugausrichtung gekennzeichnet. Trotzdem wurde bei den meisten Proben eine signifikante Rauheitsreduzierung durch das magnetabrasive Polieren erzielt. Generell wurde die Rauheit der gefrästen Oberflächen nach MAP um 70% bis 95% reduziert. Durch die Bearbeitung mittels Schafffräser wurde eine große Anzahl an tiefen Rillen erzeugt, was besonders stark bei SF-A₂, und SF-T₁ ausgeprägt war. Diese Rillen wurden durch die MAP-Bearbeitung nicht vollständig beseitigt, was eine abschließende Rauheitsanalyse belegte. Für die Bearbeitung von Oberflächen mit tiefen, häufigen Rillen wird ein zweistufiger Prozess mit grober und feiner Körnung empfohlen.

Die „grob“ geschliffene Oberfläche wurde von Ra = 0,072 μm auf Ra = 0,042 μm durch das MAP verbessert. Der Mittenrauwert der „fein“ geschliffenen Oberfläche wurde hingegen auf ca. Ra = 0,04 μm erhöht. Das weist auf die Grenze der erzeugten Oberflächengüte durch das magnetabrasive Polieren bei der verwendeten Kombination aus der Pulverart, Korngröße, Prozessparameter, dem Werkzeugtyp, der Deckelstruktur und dem bearbeitenden Werkstoff hin.



Verfahren: Plan-MAP

Werkzeugtyp: A

Deckel: A11

Werkstoff: 1.0037

Oberfläche verölt

(KMT 80)

Ausgangsoberfläche:

variabel

Werkzeug:

variabel

Schnittparameter MAP:

n 900 [U/min]

f 20 x2 [mm/min]

a_p 1,5 [mm]

Kühlluftdüse: ein

Pulver: FerroMAP 200/315 μm

Bild 7.4: Einfluss der Ausgangsoberfläche auf den MAP-Prozess

Drei typische Oberflächen nach dem Plan-, Schaff-, und Kugelfräsen sowie nach entsprechender Bearbeitung durch das MAP wurden optisch analysiert. Die Ergebnisse sind im Bild 7.5 dargestellt und zeigen, dass unabhängig von der Ausgangstopographie eine neue Oberfläche nach dem MAP erzeugt wird.

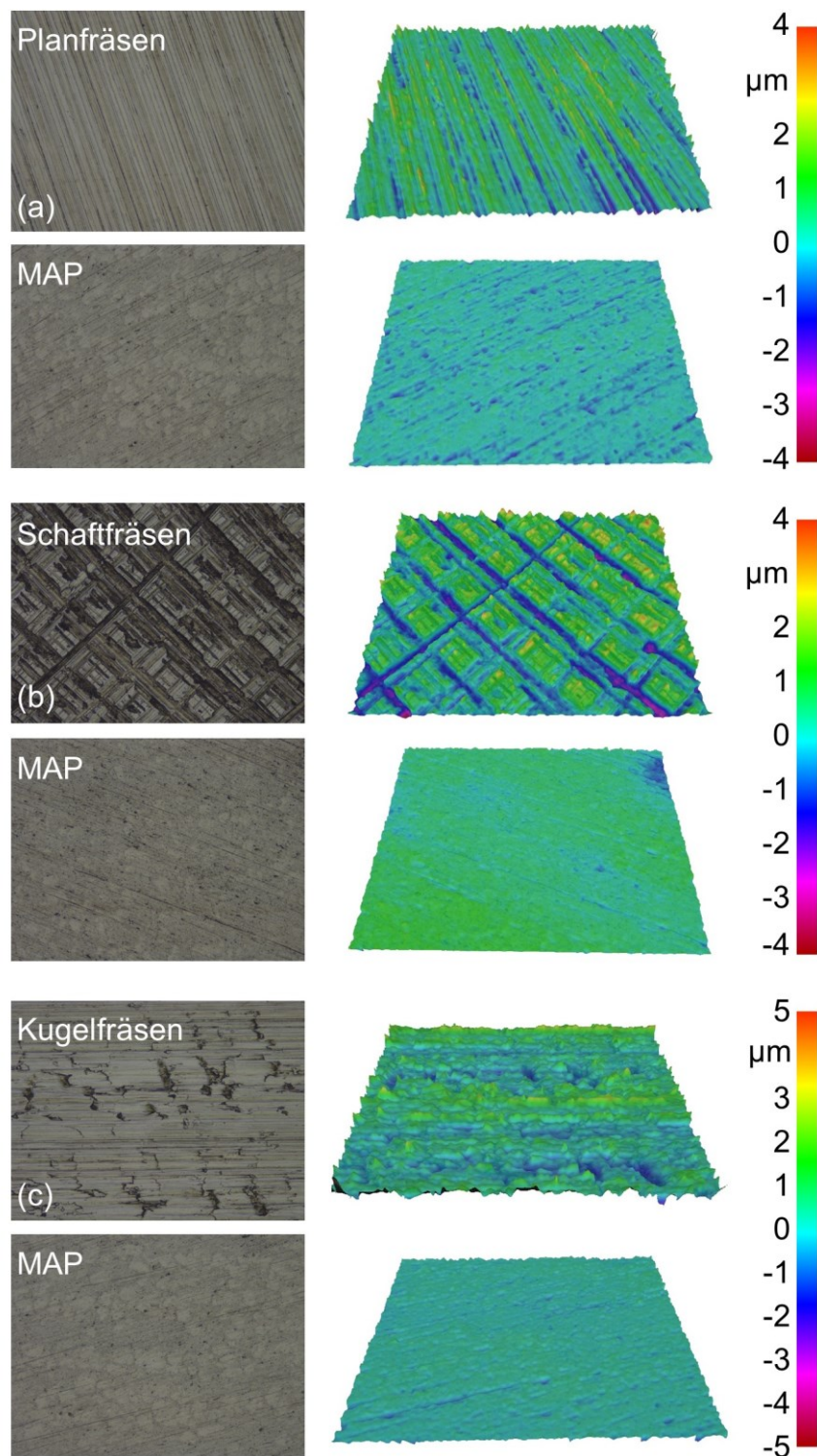


Bild 7.5: Optische Messung der Oberfläche nach: (a) Planfräsen, (b) Schafffräsen, (c) Kugelfräsen und entsprechend nach MAP; links – senkrechte Aufnahme, rechts – Auswertung der Ergebnisse

Eine weitere Messung der Rauheit wurde im Labor unter konstanter Temperatur beim Einsatz des hochpräzisen stationären, taktilen Rauheitsmessgerätes durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Bild 7.6 dargestellt und zeigen deutlich geringere Ra-Werte als nach der Messung mit dem mobilen taktilen Rauheitsmessgerät, da das Labormessgerät viel präziser und unter konstanten Temperaturbedingungen arbeitet. Der Mittenrauwert wurde von ca. $Ra = 0,09 - 0,5 \mu\text{m}$ nach dem Fräsen auf ca. $Ra = 0,02 - 0,026 \mu\text{m}$ nach dem MAP reduziert. Die Rq-Werte weisen entsprechend ein wenig höhere Werte in nm-Bereich auf. Die gemittelte Rautiefe wurde durch MAP von ca. $Rz = 0,43 - 2,2 \mu\text{m}$ auf ca. $Rz = 0,12 - 0,16 \mu\text{m}$ reduziert.

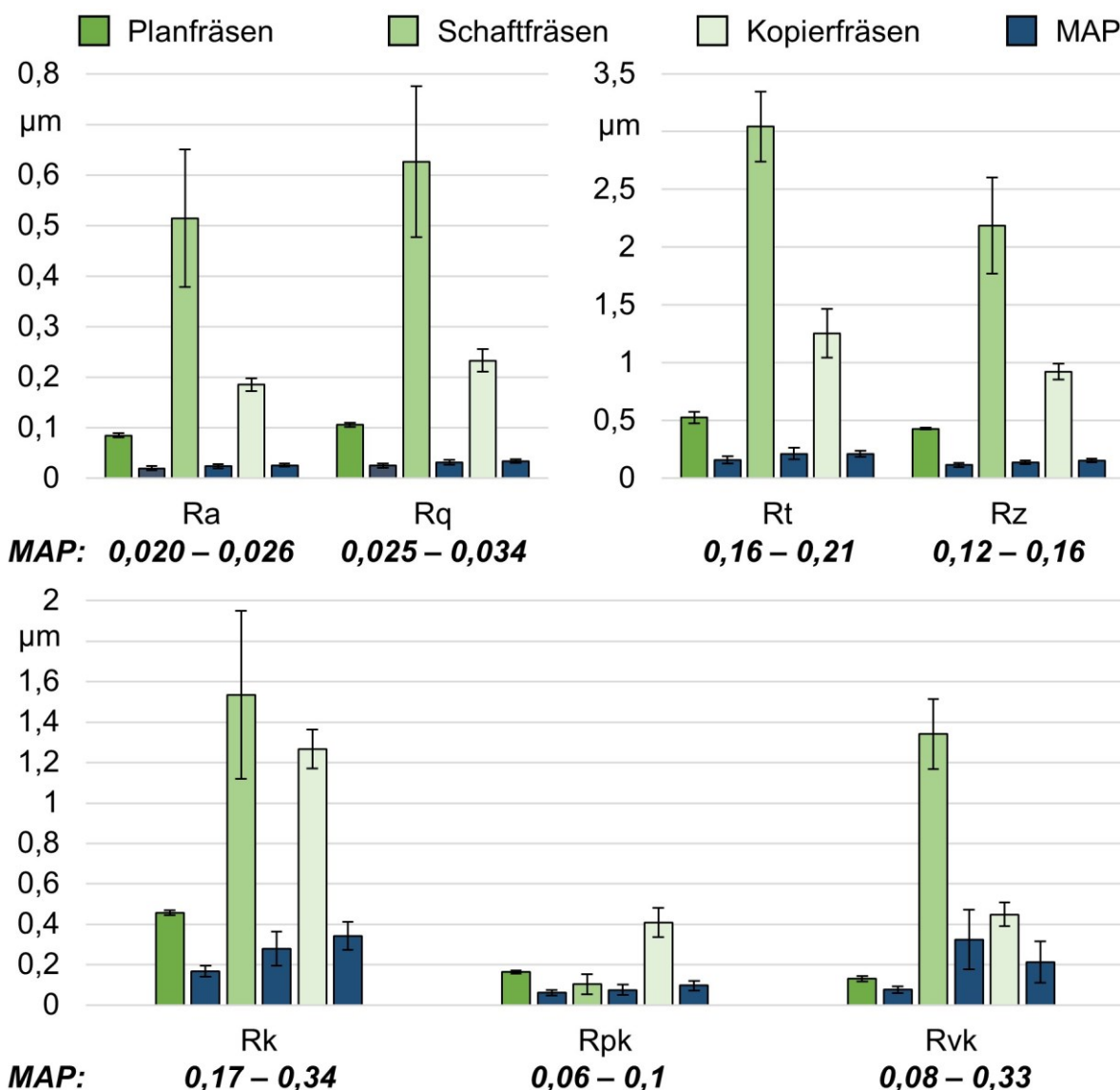


Bild 7.6: Taktile hochpräzise Messung unterschiedlicher Rauheitskenngrößen im Labor nach dem Plan-, Schaff-, Kugelfräsen und entsprechender MAP-Bearbeitung

Die Kernrautiefe R_k , reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} und reduzierte Riefentiefe R_{vk} sind viel stärker von der Ausgangsoberfläche abhängig und neigen dementsprechend zu höherer Schwankung. Die Spitzen werden durch das MAP sehr gut abgetragen, was an den sehr niedrigen R_{pk} -Werten (unter $0,1 \mu\text{m}$) deutlich wird. Tiefe Riefen werden hingegen mit der verwendete Korngröße $200/315 \mu\text{m}$ nicht vollständig entfernt, was die erhöhten R_{vk} -Werte nach dem MAP zeigen. Allerdings wird eine sehr niedrige reduzierte Riefentiefe von $R_{vk} = 0,08 \mu\text{m}$ erzeugt, wenn die Ausgangsoberfläche wie nach dem Planfräsen, keine tiefe Rillen aufweist.

Die Rauheitsprofile nach der Fräsbearbeitung mit dem Plan-, Schaft- und Kugelfräser sowie dem magnetabrasiven Polieren sind im Bild 7.7 dargestellt. Wichtiger Hinweis: der Maßstab für die Darstellung wurde mit steigender Rauheit vergrößert. Daher können die Rauheitsprofile nur vor und nach dem MAP (auf einer Ebene) miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass das MAP ein eigenes Rauheitsprofil mit geringerem Einfluss der Ausgangsoberfläche erzeugt.

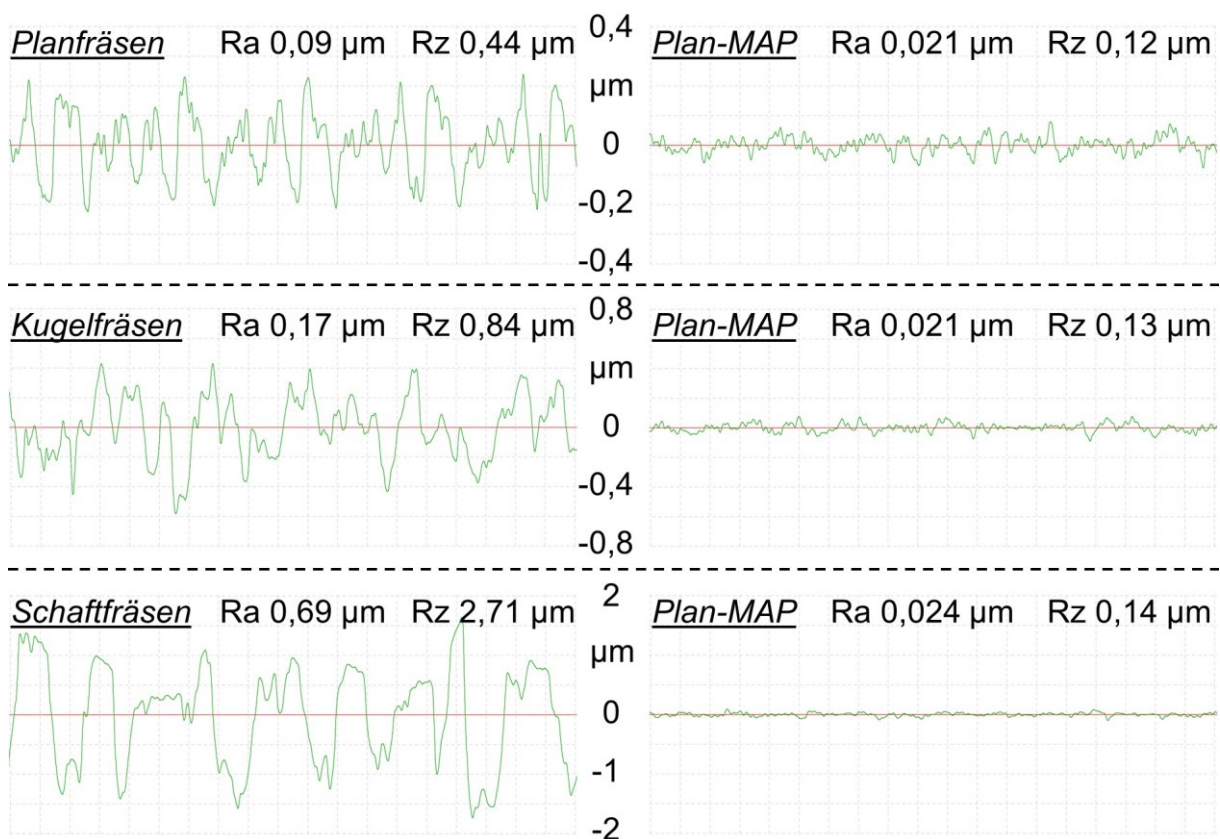
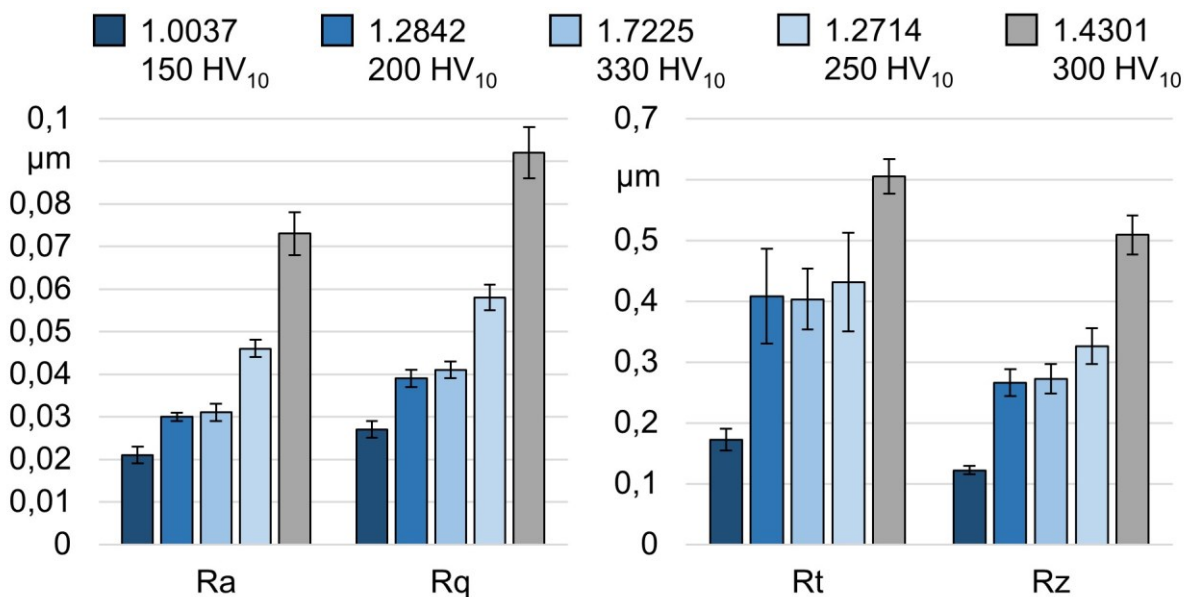


Bild 7.7: Rauheitsprofile nach dem Plan-, Schaft, Kugelfräsen und MAP-Bearbeitung

Fazit: Wenn die Ausgangsoberfläche keine tiefe Rillen aufweist, wird durch das magnetabrasive Polieren ein Rauheitsprofil mit annähernd homogener und sehr hoher Oberflächengüte (bis $R_a = 0,02 \mu\text{m}$, $R_z = 0,12 \mu\text{m}$) erzeugt.

7.5 Bearbeitbarkeit unterschiedlicher Stähle

Für die Ermittlung der Bearbeitbarkeit unterschiedlicher Stahlsorten wurden vier ferromagnetische Stähle und ein paramagnetischer Edelstahl 1.4301 plangefräst und durch das MAP bei gleichen Prozessparametern bearbeitet. Die Ergebnisse sind im Bild 7.8 dargestellt und zeigen eine hohe Oberflächengüte nach der MAP-Bearbeitung bei allen ferromagnetischen Werkstoffen, da die Magnetfeldlinien sich am Werkstück schließen und günstige Prozessbedingungen ermöglichen. Höhere Ra- und Rz-Werte beim MAP von 1.2842 und 1.7225 sind auf große Unterschiede in der Ausgangsrauheit zurückzuführen. Beispielweise wurde nach dem Planfräsen von 1.0037 eine gemittelte Rautiefe von $Rz = 0,43 \mu\text{m}$ erreicht, während bei 1.2842 und 1.7225 ein $Rz > 1 \mu\text{m}$ gemessen wurde. Bei der Bearbeitung von 1.2714 wurde die gleiche Tendenz festgestellt. Die Ergebnisse des magnetabrasiven Polierens mit Werkzeugtyp A in der Bearbeitung von paramagnetischem Edelstahl 1.4301 waren in Bezug auf die erreichte Oberflächenqualität nicht erfolgreich. Daher wird der Einsatz von anderen Werkzeugtypen für para- und diamagnetische Materialien empfohlen.



Verfahren: Plan-MAP

Werkzeugtyp: A

Deckel: A11

Werkstoff: variabel

Oberfläche verölt
(KMT 80)

Ausgangsoberfläche:

gefräst $Ra = 0,085 - 0,29 \mu\text{m}$

Werkzeug: CoroMill245

$D = 80 \text{ mm}$, $z = 4$

WSP: R245-12 T3 E-ML

Schneidstoff: HM (1130)

Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:

	gefräst	MAP	
n	2400	900	[U/min]
f	200	20 x2	[mm/min]
a _p	0,3	1,5	[mm]

Pulver: FerroMAP 200/315 μm

Bild 7.8: Oberflächenqualität nach dem magnetabrasiven Polieren unterschiedlicher Stahlsorten

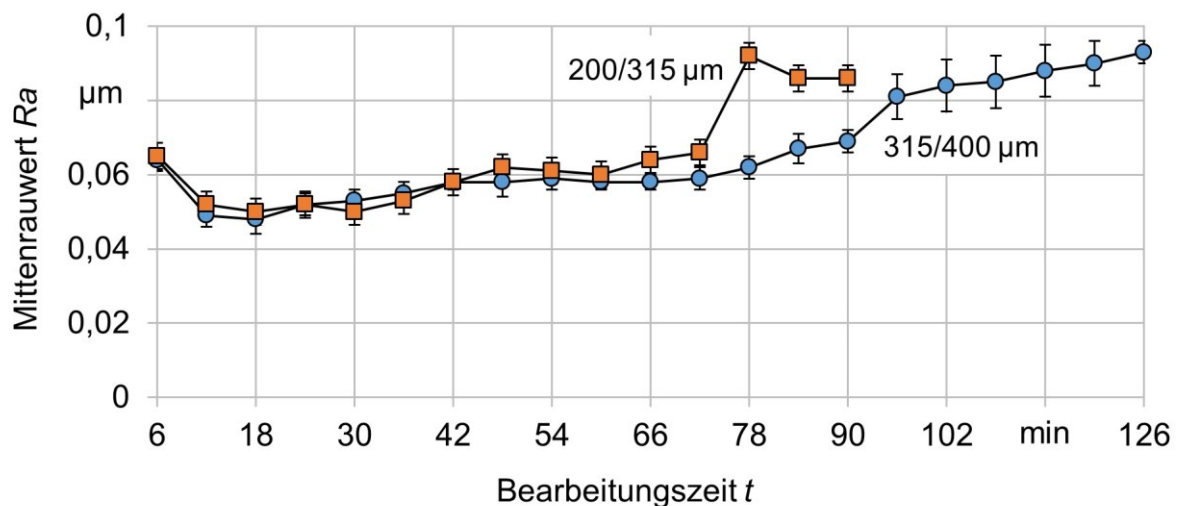
Fazit: Ferromagnetische Stähle werden mittels Werkzeugtyp A intensiv bearbeitet.

8 Kenngrößen

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Kenngrößen des magnetabrasiven Polierens, wie die Standzeit, der Abtrag und die Abtragsleistung sowie die wirkenden Kraftkomponenten mit und ohne magnetabrasives Pulver näher erläutert.

8.1 Standzeit des magnetabrasiven Pulvers FerroMAP

Das magnetabrasive Polieren ist durch eine aktive Pulverbewegung bzw. -umwälzung innerhalb der Arbeitszone gekennzeichnet. Dadurch werden ständig neue Körner und Schneidkanten zum Einsatz gebracht, was eine Art Selbstschärfwirkung initiiert. Allerdings werden die magnetabrasiven Körner mit zunehmender Bearbeitungszeit stumpfer, der Anteil der Mikrospäne in der Arbeitszone größer und die Schneidfähigkeit bzw. Abrasivität des Pulvers geringer. Daher sinkt die erzeugte Oberflächengüte einer Pulvermenge mit der Bearbeitungszeit. Um die Standzeit zu ermitteln, wurden zwei Korngrößen bei gleichen Prozessparametern untersucht (Bild 8.1). Als einzige unterscheidende Stellgröße dient der Arbeitsabstand (1,5 mm für 200/315 µm Korngröße und 1,8 mm für 315/400 µm), da dieser Abstand den optimalen Arbeitsbereich für die jeweilige Korngröße darstellt (Kap. 5.3). Nach jedem Durchlauf (ca. 6 Min) wurde die Oberflächengüte gemessen. Die Ergebnisse stellen die Bearbeitung mehrerer Proben mit einer Pulvermenge dar.



Verfahren: Plan-MAP
Werkzeugtyp: A
Deckel: A11
Werkstoff: 1.0037
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)

Ausgangsoberfläche:
 gefräst Ra = 0,135 ± 0,02 µm
Werkzeug: CoroMill245
 D = 80 mm, z = 1
WSP: R245-12 T3 E-ML
Schneidstoff: HM (1130)
Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:
 gefräst MAP
 n 2400 900 [U/min]
 f 200 30 x2 [mm/min]
 a_p 0,3 1,5 / 1,8 [mm]
Pulver: FerroMAP variabel

Bild 8.1: Standzeit des magnetabrasiven Pulvers (FerroMAP) mit zwei Korngrößen

Generell lässt sich die Standzeitkurve mit typischen Zerspanprozessen vergleichen und wird in drei Bereiche: Einlaufverschleiß, lineare Verschleißentwicklung und progressiver Verschleiß unterteilt. Der erste Durchlauf mit einer unbenutzten Pulvermenge erzeugt relativ schlechte Oberflächengüte, da das Pulver sich in einer Art Einarbeitungsphase befindet. In den nächsten ca. 30 Minuten wird die bestmögliche und in den darauffolgenden ca. 30 Minuten eine gute Oberflächenqualität (ca. $R_a < 0,06 \mu\text{m}$) erreicht. Insgesamt wurde eine hohe Prozessfähigkeit (über 1 Stunde) einer Pulvermenge nachgewiesen. Nach ca. 70 Minuten Prozesszeit sinkt die Prozessintensität der Korngröße 200/315 μm erheblich. Nach ca. 90 Minuten der Bearbeitungszeit wird die Oberflächenqualität sehr wenig beeinflusst. Die Korngröße 315/400 μm erreicht innerhalb der meisten Versuchen eine bessere Oberflächengüte und ist durch einen geringeren und späteren (nach ca. 90 Minuten) Einbruch der Prozessintensität gekennzeichnet. Sogar nach zwei Stunden im Einsatz fand eine abrasive Oberflächenbearbeitung statt. Schnellerer Verschleiß der Korngröße 200/315 μm im Vergleich zu 315/400 μm wird dadurch erklärt, dass bei geringerer Korngröße mehr Körner in gleichem Volumen der Pulvermenge vorhanden sind und daher während der Pulverbewegung eine erhöhte mechanische Interaktion stattfindet, welche wiederum die Verschleißgeschwindigkeit erhöht. Generell gibt es drei Gründe, die die Reduzierung der Oberflächengüte mit der Bearbeitungszeit erklären:

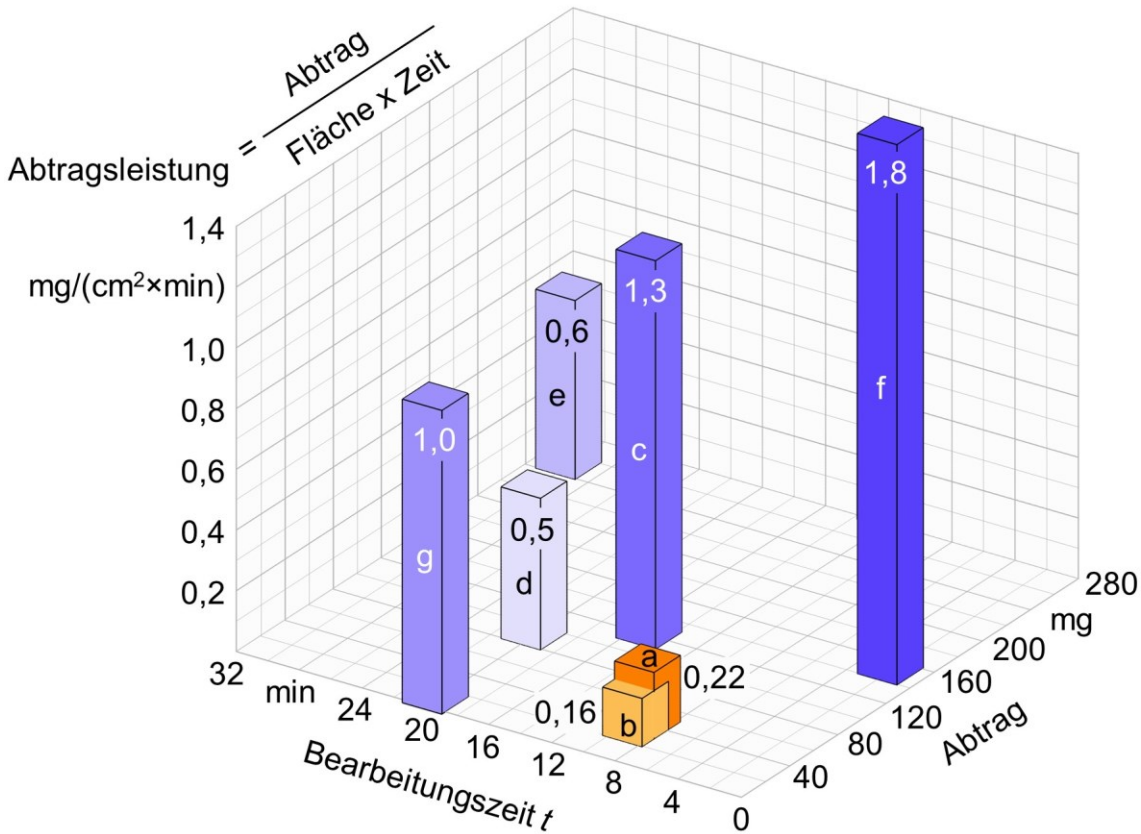
- 1) Mechanischer Pulververschleiß durch die Zerspanung und die Kornreibung innerhalb der Pulvermenge führt zur Senkung der Korngröße und entsprechend zur Reduzierung der magnetischen Wirkkraft auf die Körner sowie der mechanischen Pulververdichtung, da der optimale Arbeitsabstand geringere Werte annimmt. Darüber hinaus sinkt die Anzahl der scharfen Kanten mit der Bearbeitungszeit.
- 2) Eine Reduzierung der Pulvermenge im Prozess resultiert aus den verbliebenen Körnern im Schlamm und aus dem Kontakt entfernten Körner beim Prozessan- oder -wegfahren. Diese Pulverreduzierung ist verhältnismäßig gering, addiert sich jedoch bei der Großflächenbearbeitung und häufigem An- und Wegfahren.
- 3) Eine Sättigung der Pulvermenge resultiert aus den erzeugten Mikrospänen, die durch das Magnetfeld mitgenommen und mit dem Pulver vermischt werden. Dies führt zur Reduzierung der aktiven Schneidkanten im Prozess, findet jedoch nur während der Bearbeitung der ferromagnetischen Werkstoffe statt.

Fazit: Eine hohe Standzeit einer Pulvermenge des schmelzezerstäubten Pulvers FerroMAP wurde nachgewiesen und beträgt über 1 Stunde.

8.2 Abtrag und Abtragsleistung

Einerseits beschreibt der Abtrag bzw. die Abtragsleistung die Verfahrensproduktivität bei der Schruppbearbeitung. Andererseits stellt sich der Zusammenhang zwischen dem Abtrag und der finalen Oberflächengüte komplex dar. Zum einen wird die Oberflächentopographie durch eine hohe Abtragsleistung beim Schlichten neu definiert. Allerdings wird nicht die beste Oberflächenqualität durch tieferes Korneindringen bei abrasiver Zerspanung erzeugt. Zum anderen führt ein geringeres Korneindringen bzw. geringe Abtragsleistung zur besseren Oberflächengüte, wenn die Ausgangsoberfläche ein nicht zu grobes Profil aufweist. Für die Ermittlung des Abtrags beim Plan-MAP wurden die Proben auf die Breite von 40 mm gesägt, um das Gewicht unter 1,5 kg zu reduzieren, da eine Analyse mittels Präzisionswaage erfolgen sollte. Die Werkstücke wurden jeweils nach dem Fräsen und magnetabrasiven Polieren gewogen und die Gewichts Differenz einem Abtrag gleichgesetzt. Darüber hinaus wurde die Abtragsleistung in $\text{mg} / (\text{cm}^2 \times \text{min})$ umgerechnet, um die Ergebnisse unabhängig von der Bearbeitungszeit und Werkstückgröße quantitativ mit anderen wissenschaftlichen Arbeiten zu vergleichen. Alle drei Größen: der Abtrag, die Bearbeitungszeit und Abtragsleistung sind für die bessere Veranschaulichung in einem 3D-Balkendiagramm zusammengefasst (Bild 8.2). Für die Berechnung der Abtragsleistung wurde der Abtrag durch die Bearbeitungszeit und die Finishfläche aus der Tabelle im Bild 8.2 dividiert.

In Untersuchungen wurde ein relativ niedriger Abtrag von 30 und 40 mg für die Korngröße 315/400 μm und 200/315 μm gemessen. Höherer Abtrag bei feinerer Körnung und gleicher Bearbeitungszeit ist damit verbunden, dass mehrere Körner bzw. Schneidkanten gleichzeitig im Eingriff sind und entsprechend mehr Werkstoff abtragen. In den meisten Fällen wurde in vergleichbaren wissenschaftlichen Arbeiten bei längerer Bearbeitungszeit ein viel höherer Werkstoffabtrag erzielt [Chan02, Liu14, Wu18]. Der größte Materialabtrag von 450 mg [Yama17] wurde beim MAP des SLM-gefertigten Bauteiles erzeugt. Allerdings dauerte die Bearbeitung knapp 5 Stunden, daher wurden diese Ergebnisse in der Zusammenfassung nicht berücksichtigt. Der geringste Abtrag [Kang12a] bei langer Bearbeitungszeit scheint auf dem ersten Blick sehr unproduktiv. Aber es handelt sich um die Bearbeitung des Rohres mit Innendurchmesser von 1 mm und entsprechend sehr geringer Fläche, deswegen wird nach der Umrechnung eine relativ hohe Abtragsleistung erzielt.



Verfahren: Plan-MAP
Werkzeugtyp: A
Deckel: A11
Werkstoff: 1.0037
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)

Ausgangsoberfläche:
 gefräst Ra = 0,14 ± 0,02 µm
Werkzeug: CoroMill245
 D = 80 mm, z = 4
WSP: R245-12 T3 E-ML
Schneidstoff: HM (1130)
Beschichtung: AlTiCrN (PVD)

Schnittparameter:
 gefräst MAP
 n 2400 900 [U/min]
 f 200 30 x2 [mm/min]
 a_p 0,3 1,5 [mm]
Pulver: FerroMAP variiert

Quelle	200/315*	315/400*	Wu18	Liu14	Chan02	Shin90	Kang12a
Kinematik	Plan	Plan	Plan	Plan	Welle	Welle	Rohr
Werkstoff	1.0037	1.0037	1.4404	3.3211	1.2379	1.0114	1.4301
Abtrag [mg]	40	30	120	90	250	150	8
Zeit [min]	9	9	15	20	30	2	20
Fläche [mm ²]	2000 (a)	2000 (b)	625 (c)	900 (d)	1400 (e)	4200 (f)	40 (g)

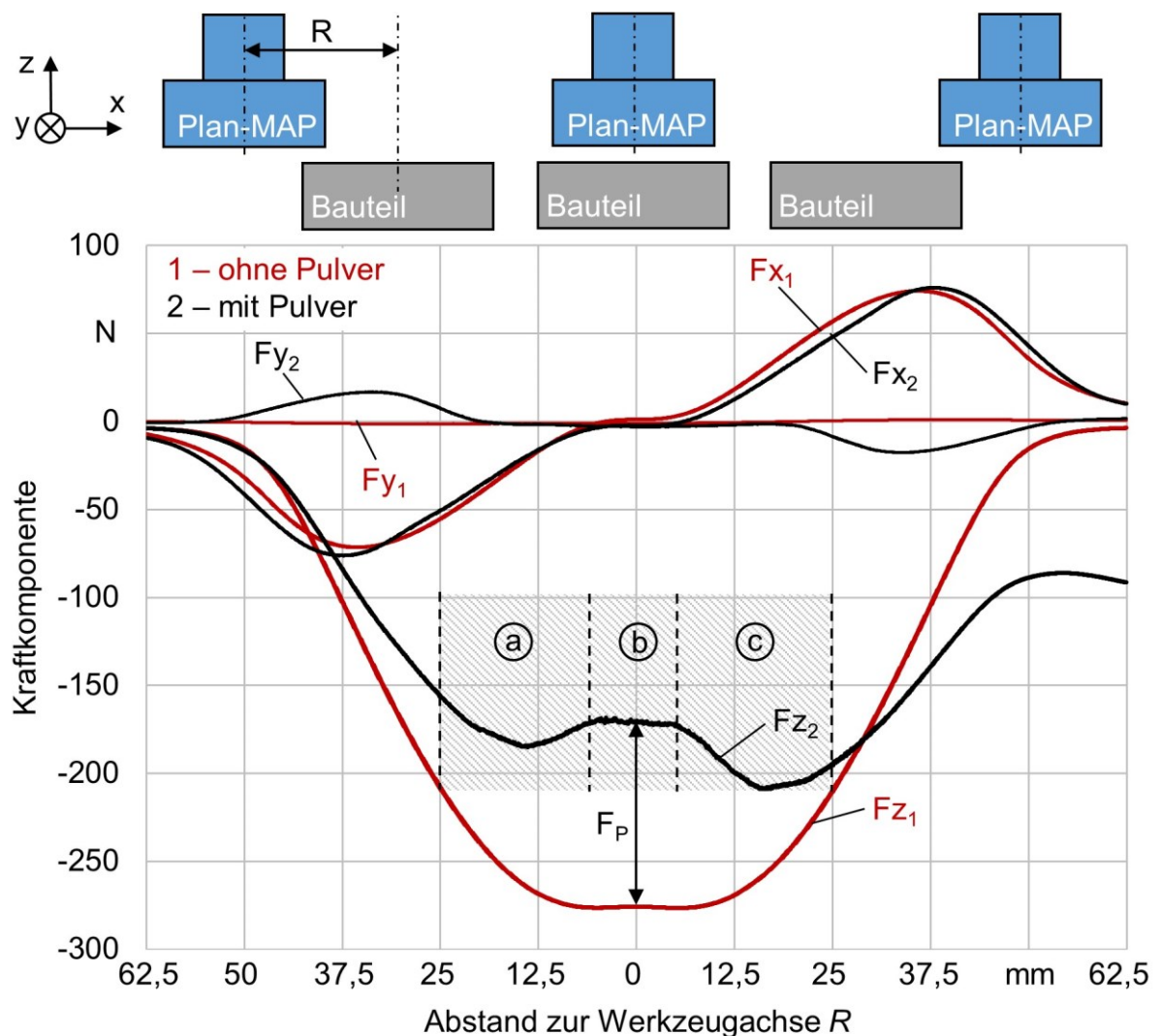
*eigene Untersuchungen

Bild 8.2: Der Abtrag, die Bearbeitungszeit und Abtragsleistung beim magnetabrasiven Polieren bei eigenen Untersuchungen und vergleichbaren wissenschaftlichen Arbeiten

Fazit: Der Abtrag beim MAP beträgt in den meisten Fällen zwischen 10 bis 250 µm während einer Bearbeitungszeit von 2 bis 30 Minuten. Die Abtragsleistung liegt bei ca. 0,2 bis 1,8 mg / (cm² x min) unabhängig von der Verfahrenskinematik.

8.3 Zerspankraft

Die Zerspankraft bei abrasiver Bearbeitung gibt Auskunft, wie stark die Körner in die Oberfläche eindringen und dementsprechend die Prozessintensität beeinflussen. Beim magnetabrasiven Polieren der ferromagnetischen Werkstücke ist die Messung der Zerspankraft nicht trivial, da die magnetische Kraft bzw. Anziehungskraft des Bauteiles zum Magnet die Ergebnisse verfälscht. Um die Zerspankraft von der Anziehungskraft zu trennen wurden zuerst die Messungen ohne Pulver und danach mit Pulver bei gleichen Prozessparametern durchgeführt. Ein typischer Verlauf der drei Kraftkomponenten ist im Bild 8.3 dargestellt, wobei die dargestellten Kurven aus jeweils 3000 Punkten bestehen (ein Punkt = ein Mittelwert von 100 Messwerten).



Verfahren: Plan-MAP

Werkzeugtyp: A

Deckel: A11

Werkstoff: 1.0037

Pulver: FerroMAP 200/315 μm

Messung:

Richtung: X, Y, Z

Abstand zum Magnet: 5,5 mm

Abtastfrequenz: 1000 Hz

Gerät: Kistler Typ 9257B

Schnittparameter MAP:

n 900 [U/min]

f 25 [mm/min]

a_p 1,5 [mm]

Bild 8.3: Gemessene Kraftkomponenten mit und ohne magnetabrasives Pulver

Die Kraftkomponenten weisen folgende Ausrichtung auf: X – parallel zur Vorschubbewegung, Y – orthogonal zur Vorschubbewegung, Z – parallel zur Rotationsachse des MAP-Werkzeuges. Aufgrund der Anziehungskraft entsteht eine sehr hohe negative F_{z1} -Kraftkomponente, die, bis der Permanentmagnet vollständig über dem Werkstück steht, kontinuierlich auf ca. 275 N bei 5,5 mm Abstand zum Magnet steigt. Für die F_{x1} -Kraftkomponente werden variierende Werte entsprechend der Position des Magneten bezüglich des Bauteiles detektiert. In der Y-Richtung übt der Magnet keine Wirkung aus, was aus den Werten (F_{y1}) ersichtlich wird.

Die Messung der Kraftkomponenten mit dem Pulver während des Prozesses liefert wesentliche Erkenntnisse. Während die F_{x2} -Kraftkomponente fast unverändert bleibt und die F_{y2} -Kraftkomponente beim Ein- bzw. Ausfahren leicht ansteigt (bis zu 20 N), ist die F_{z2} -Kraftkomponente durch einen komplexen Verlauf gekennzeichnet und kann in drei Zonen untergliedert werden: (a) – Einfahren, (b) – Überfahren, (c) – Ausfahren. Die Kraftkomponente in Z-Richtung weist generell niedrigere Werte mit Pulver als ohne auf, da die Zerspankraft entgegen der Anziehungskraft gerichtet ist. Die Differenz zwischen den gemessenen Kraftkomponenten in Z-Richtung mit und ohne Pulver bildet die Passivkraft (F_p) beim magnetabrasiven Polieren. Die maximale Passivkraft wirkt im Bereich (b) bei maximaler Kontaktfläche. Eine höhere Passivkraft im Bereich (a) als im Bereich (c) und ein fallender Kraftverlauf im Bereich (b) werden dadurch erklärt, dass der Temperatureinfluss an der Kraftmessplattform nur in der X- und Y-Achse ausgeglichen wird. In der Z-Achse werden die Ergebnisse durch die Wärmeentwicklung leicht verfälscht.

Weitere Kraftmessungen wurden bei unterschiedlichen Arbeitsabständen und Abständen zum Magnet sowie variierender Drehzahl durchgeführt, um die Wirkung der mechanischen Pulververdichtung und der magnetischen Flussdichte sowie der Schnittgeschwindigkeit zu untersuchen. Die Ergebnisse sind im Bild 8.4 dargestellt. Um den Einfluss des Arbeitsabstandes festzustellen, wurden Deckel unterschiedlicher Stärke bei gleichbleibendem Abstand zum Permanentmagnet eingesetzt (Bild 8.4d). Die Variation des Abstandes zum Magnet wurde bei konstantem Arbeitsabstand durchgeführt (Bild 8.4e). Die Änderung der Drehzahl erfolgte bei konstanter Deckelkonstruktion, also konstantem Abstand zum Magnet (Bild 8.4f). Die Ergebnisse im Bild 8.4 stellen die Zerspankraftkomponente in Z-Richtung (Passivkraft) als Differenz der Mittelwerte aus allen Werten innerhalb der gesamten Zone (b) zwischen F_{z2} und F_{z1} dar.

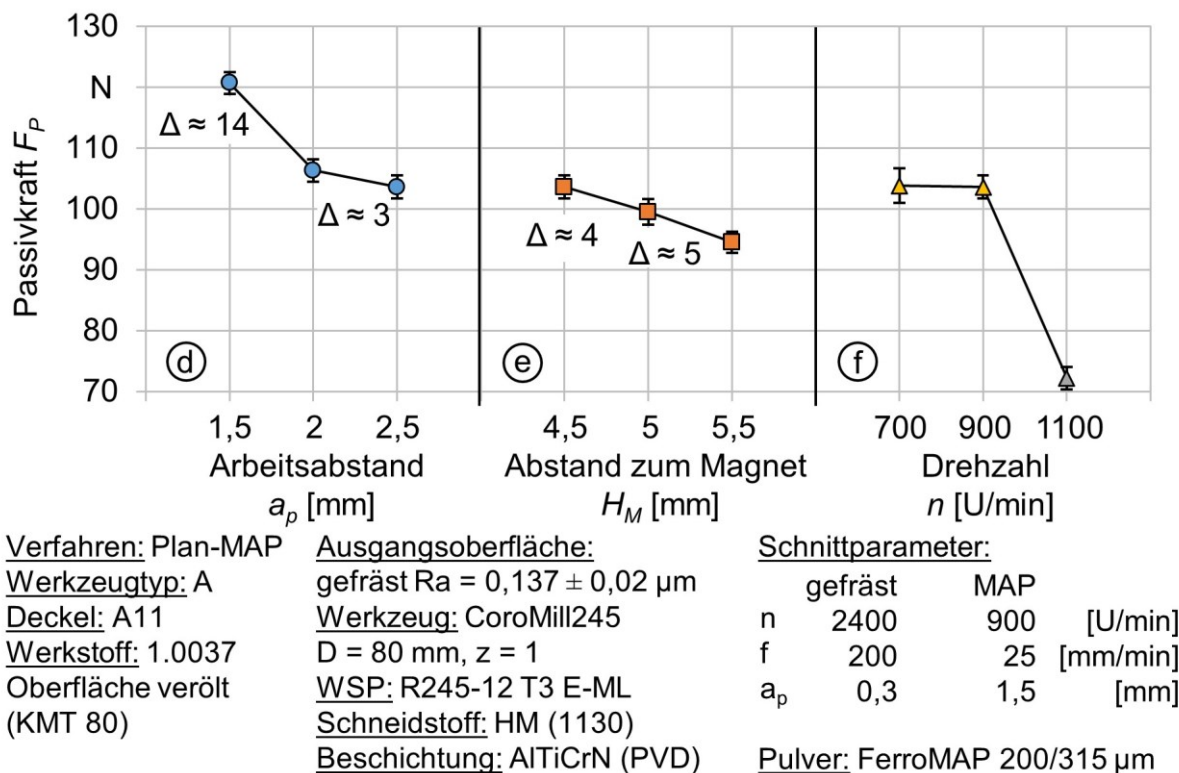


Bild 8.4: Einfluss des Arbeitsabstandes, Abstandes zum Magnet und der Drehzahl auf die Passivkraft

Die größte Reduktion der Passivkraft (ca. 14 N) wurde bei Erhöhung des Arbeitsabstandes von 1,5 auf 2 mm detektiert. Eine weitere Steigerung des Arbeitsabstandes senkt die Zerspankraft geringfügig. Dies korreliert mit den Untersuchungen zum Einfluss des Arbeitsabstandes aus Kap. 5.3 und bestätigt die sehr wichtige Rolle der mechanischen Pulververdichtung für eine hohe Prozessintensität. Die Erhöhung des Abstandes zum Magnet verursacht eine lineare Reduzierung der magnetischen Flussdichte im Arbeitsspalt (Kap. 5.5), der Oberflächengüte (Kap. 6.2) und der Zerspankraft. Die Ergebnisse der Kraft- und Oberflächenmessung stimmen somit überein. Die Drehzahl übt keinen signifikanten Einfluss auf die Passivkraft aus. Bei zu hoher Schnittgeschwindigkeit ($v_c > 130$ m/min) steigt die Prozess- und Werkstücktemperatur sehr schnell. Dies führt zur starken Verfälschung von Messergebnissen. Daher kann der Messpunkt bei einer Drehzahl von 1100 U/min nicht für statistische Betrachtungen genutzt werden.

Fazit: Die mechanische Pulververdichtung übt im Vergleich zur magnetischen Flussdichte einen größeren Einfluss auf Prozessintensität in Bezug auf die Passivkraft und die erreichte Oberflächengüte aus. Die Ergebnisse der Kraftmessung korrelieren mit den Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter.

9 Magnetabrasives Polieren der Freiformflächen

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Plan-MAP auf das Polieren der Freiformflächen übertragen. Ausgewählte Versuchsreihen zum Einfluss der Prozessparameter wie f , v_c , a_p und der Deckelstrukturen werden referenziert. Darüber hinaus wird das magnetabrasive Polieren unterschiedlicher Werkstückhöhen und -formen analysiert.

9.1 Werkstoffauswahl und Versuchsbeschreibung

Für die Bearbeitung von Freiformflächen wurde ein neues MAP-Werkzeug vom Typ G entwickelt, welches mit einem großen Kugelmagneten vom Durchmesser 40 mm ausgestattet ist. Das Werkzeug wird im definierten Arbeitsabstand unter Nutzung von magnetabrasivem Pulver analog eines Kugelfräasers über das Werkstück geführt (Bild 9.1). Die Deckelstruktur wurde entsprechend der vorherigen Erkenntnisse aus dem Plan-MAP konzipiert und mit sechs ununterbrochenen Hindernissen ausgestattet. In ersten Versuchen wurden Planflächen durch das Kugel-MAP bearbeitet. Der Werkzeugtyp G wurde unter einem Winkel von 60° zur Werkstückoberfläche geführt, um eine ausreichend hohe Schnittgeschwindigkeit bei hoher magnetischer Flussdichte zu gewährleisten, da die magnetische Flussdichte von der Mitte des Werkzeuges entlang des Radius abnimmt (Bild 4.9).

In umfangreichen Vorversuchsreihen wurden unterschiedliche Werkstoffe auf die Bearbeitbarkeit durch Kugel-MAP untersucht. Im ersten Ansatz konnte keine Oberflächenverbesserung beim ferromagnetischen Baustahl 1.0037 durch das Kugel-MAP erreicht werden. Hier wurde eine matte Oberfläche mit erhöhter Rauheit erzeugt und eine starke Schlamm- und Restkornbildung mit hoher Restkornverteilung war auf der Werkstückoberfläche nach dem magnetabrasiven Polieren zu verzeichnen. Diese Effekte können dadurch erklärt werden, dass auf der Werkstückoberfläche eine stärkere magnetische Flussdichte als auf der Deckeloberfläche induziert wird und daher nur ein kleinerer Pulveranteil direkt mit dem MAP-Werkzeug rotiert. Dies führte zu einem Pulverstau auf der Werkstückoberfläche. Durch die Werkzeugrotation wird das gestaute Pulver in die Werkstückoberfläche gepresst. Diese Prozessführung wurde demnach als ungeeignet klassifiziert.

Im zweiten Ansatz wurde ein paramagnetischer Edelstahl 1.4301 in Blockform bearbeitet. Dabei schließt sich das Magnetfeld nicht auf dem Werkstück, was zu einem sehr schwachen Abtrag führte, da die Zerspankraft und das Korneindringen in die

Werkstückoberfläche signifikant reduziert waren. Demnach konnte auch für diese Anwendung keine ausreichende Prozessfähigkeit dargelegt werden. Im dritten Ansatz wurde eine Platte in 2 mm Stärke aus paramagnetischem Edelstahl 1.4301 auf einem ferromagnetischen Unterteil aus dem Baustahl 1.0037 eingespannt und bearbeitet (Bild 9.1). In diesem Fall konnte ein Poliereffekt und eine günstige Prozessführung erreicht werden, da das Magnetfeld hinter dem Bauteil geschlossen wurde und eine zu hohe magnetische Flussdichte auf der Werkstückoberfläche vermieden wurde. Dabei versuchen die magnetabrasiven Körner durch das geschlossene Magnetfeld in das ferromagnetische Unterteil einzudringen und stoßen auf ein Hindernis in Form der paramagnetischen Platte, die durch den Aufprall der einzelnen Körner bearbeitet wird. Da das Magnetfeld auf der Plattenoberfläche nicht konzentriert wird, gleiten die Pulverpartikel über das Werkstück und werden mit dem MAP-Werkzeug mitgeführt. Somit werden die Vorteile des Magnetfeldes genutzt und eine sichere Bearbeitung durch das magnetabrasive Polieren gewährleistet. Daher wird diese Versuchsanordnung für weitere Untersuchungen verwendet.

Bei der Untersuchung zum Einsatz vom Werkzeugtyp G wurden zuerst die Prozessparameter für ebene Flächen optimiert und anschließend an Freiformflächen referenziert. Die Ausgangsoberfläche wurde mit einem VHM Kugelfräser erzeugt. Der Fräs- und MAP-Vorschub sind analog zum Plan-MAP orientiert. Da die effektive Kontaktfläche zwischen dem MAP-Werkzeug und dem Werkstück deutlich geringer als beim Plan-MAP ausgeprägt ist, wurden sechs Durchgänge beim Kugel-MAP mit einer radialen Zustellung von 0,5 mm in Doppelweg-Bearbeitungsstrategie bei jedem Versuch unternommen. Additiv gefertigte Unterplatten aus PLA wurden ausschließlich für die Höhenvariation der paramagnetischen Platte eingesetzt (Kap. 9.7).

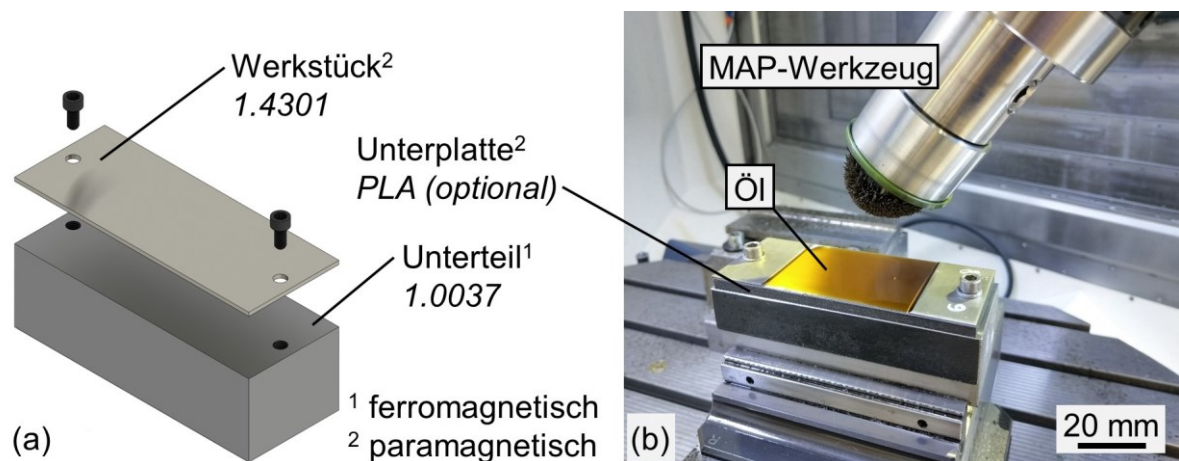
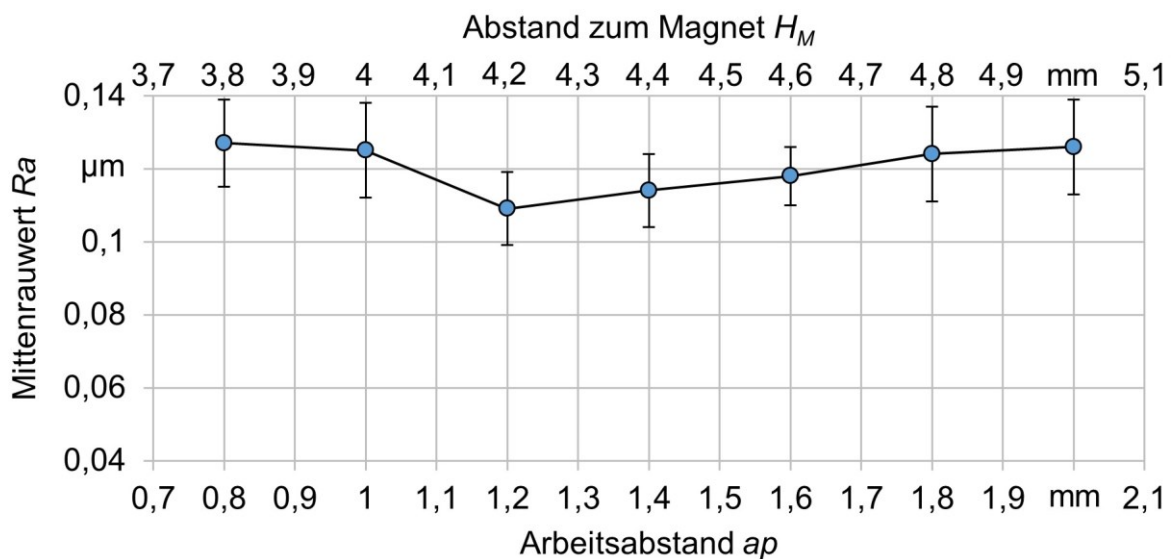


Bild 9.1: Werkstoffauswahl und Versuchsaufbau a) 3D-Modell, b) auf der Maschine

9.2 Einfluss des Arbeitsabstandes

Der Arbeitsabstand und dessen Auswirkung auf die mechanische Pulververdichtung hat maßgeblich die Prozessintensität beim Plan-MAP beeinflusst, daher wurde diese Prozessgröße als erste in den Fokus genommen. Ein optimaler Arbeitsabstand von 1,8 mm beim Plan-MAP unter Einsatz des Pulvers FerroMAP 315/400 μm wurde als Ausgangspunkt für den ersten Versuch gewählt. Danach wurde der Arbeitsabstand in 0,2 mm Schritten nach oben und nach unten angepasst, bis keine Oberflächenverbesserung mehr gemessen werden konnte. Die Ergebnisse sind im Bild 9.2 dargestellt und weisen auf einen ähnlichen Verlauf wie beim Plan-MAP hin. Jedoch ist der Effekt der mechanischen Pulververdichtung beim Kugel-MAP geringer ausgeprägt und der optimale Wert wurde deutlich reduziert. Das wird dadurch erklärt, dass der angegebene Arbeitsabstand nur punktuell gilt und über den Radius steigt. Darüber hinaus wird das magnetabrasive Pulver nicht großflächig durch die Deckelstruktur geführt bzw. gepresst, was beim Plan-MAP der Fall ist.



Verfahren: Kugel-MAP

Werkzeugtyp: G

Deckel: B1

Werkstoff: 1.4301

Oberfläche verölt
(KMT 80)

Plattenstärke: 1,9 mm

Ausgangsoberfläche:

gefräst $R_a = 0,22 \pm 0,03 \mu\text{m}$

Werkzeug: Kugelfräser

$D = 10 \text{ mm}$, $z = 2$

Schneidstoff: HM

Beschichtung: TiAlNi (PVD)

Schnittparameter:

gefräst MAP

n 5000 1000 [U/min]

f 1000 10 [mm/min]

a_p 0,1 variabel [mm]

a_e 0,1 0,5 [mm]

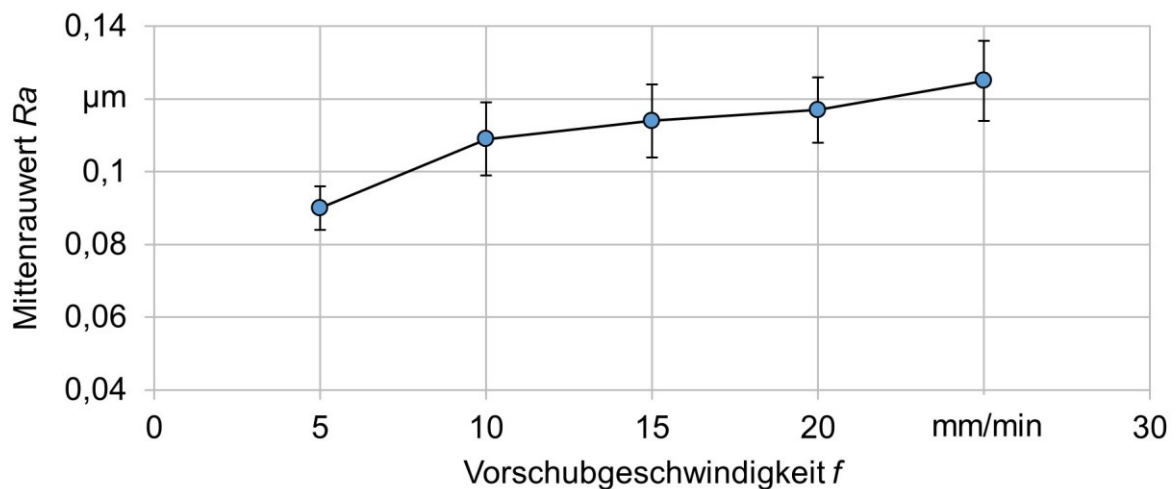
Pulver: FerroMAP 315/400 μm

Bild 9.2: Einfluss des Arbeitsabstandes auf den Mittenrauwert beim Kugel-MAP

Fazit: Die mechanische Pulververdichtung beim Kugel-MAP weist eine ähnliche Tendenz wie beim Plan-MAP auf (Kap. 5.3), wirkt sich jedoch nicht so signifikant auf die Prozessintensität aus.

9.3 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit übt einen signifikanten Einfluss auf die Produktivität des Verfahrens aus. Beim Plan-MAP wurde eine exponentielle Reduktion der Ausgangsrauheit mit Erhöhung der Bearbeitungszeit festgestellt, sodass die Oberflächengüte bei sehr niedriger Vorschubgeschwindigkeit $f < 20$ mm/min nicht wesentlich verbessert wurde. Beim Kugel-MAP hingegen wurde bei Verringerung des Vorschubs auf $f = 5$ mm/min eine signifikante Reduktion der Rauheit und Erhöhung der Gleichmäßigkeit der Oberflächengüte (geringere Standardabweichung) festgestellt (Bild 9.3). Das wird dadurch erklärt, dass das magnetabrasive Pulver beim Plan-MAP eine große Fläche gleichzeitig und intensiv bearbeitet, während beim Kugel-MAP die Bearbeitungsfläche viel geringer ausgeprägt ist sowie die mechanische Pulververdichtung ungleichmäßig und schwächer ausgebildet wird. Aus diesen Gründen wird ein großer Unterschied im Zeitaufwand für die Bearbeitung gleicher Flächen mittels Plan-MAP und Kugel-MAP festgestellt, vergleichbar mit Plan- und Kugelfräsen.



Verfahren: Kugel-MAP
Werkzeugtyp: G
Deckel: B1
Werkstoff: 1.4301
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)
Plattenstärke: 1,8 mm

Ausgangsoberfläche:
 gefräst $R_a = 0,22 \pm 0,04 \mu\text{m}$
Werkzeug: Kugelfräser
 $D = 10$ mm, $z = 2$
Schneidstoff: HM
Beschichtung: TiAlNi (PVD)

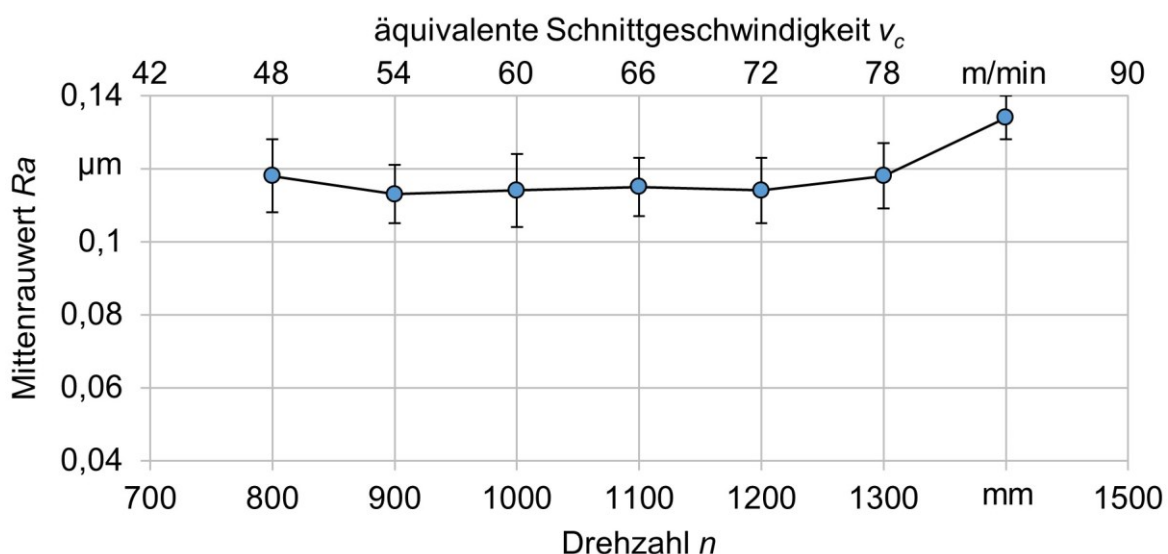
Schnittparameter:
 gefräst MAP
 n 5000 1000 [U/min]
 f 1000 variabel [mm/min]
 a_p 0,1 1,2 [mm]
 a_e 0,1 0,5 [mm]
Pulver: FerroMAP 315/400 μm

Bild 9.3: Einfluss der Vorschub auf den Mittenrauwert beim Kugel-MAP

Fazit: Eine sehr geringe Vorschubgeschwindigkeit von $f = 5$ mm/min erhöht signifikant die Oberflächengüte und deren Gleichmäßigkeit.

9.4 Einfluss der Schnittgeschwindigkeit

Die Schnittgeschwindigkeit beeinflusst die kinetische Energie und die tangentielle Kraft der einzelner Körner sowie den Werkstoffabtrag. Beim Plan-MAP wurde eine optimale Schnittgeschwindigkeit von ca. $v_c = 130$ m/min unabhängig vom Werkzeugtyp festgestellt. Eine höhere Drehzahl führte zu starker Wärmeentwicklung, was wiederum zur Überhitzung des MAP-Werkzeuges bzw. Permanentmagnetes sowie Reduzierung der magnetischen Flussdichte im Prozess beigetragen hat. Beim Kugel-MAP wurde annäherungsweise keine Temperaturerhöhung bei unterschiedlichen, erhöhten Drehzahlen (bis zu 1400 U/min) beobachtet. Dabei wurde ein breiter optimaler Schnittgeschwindigkeitsbereich von ca. 55 bis 70 m/min festgestellt (Bild 9.4). Dieser Effekt ist mit der Verfahrenskinetik verbunden, wobei das magnetabrasive Pulver beim Kugel-MAP regelmäßig aus dem Arbeitsspalt transportiert wird, wo das Magnetfeld nicht auf dem Bauteil geschlossen wird. Somit übt die wirkende Fliehkraft einen deutlich negativeren Einfluss aus.



Verfahren: Kugel-MAP

Werkzeugtyp: G

Deckel: B1

Werkstoff: 1.4301

Oberfläche verölt
(KMT 80)

Plattenstärke: 1,7 mm

Ausgangsoberfläche:

gefräst $R_a = 0,25 \pm 0,03 \mu\text{m}$

Werkzeug: Kugelfräser

$D = 10$ mm, $z = 2$

Schneidstoff: HM

Beschichtung: TiAlNi (PVD)

Schnittparameter:

gefräst MAP

n 5000 variabel [U/min]

f 1000 15 [mm/min]

a_p 0,1 1,2 [mm]

a_e 0,1 0,5 [mm]

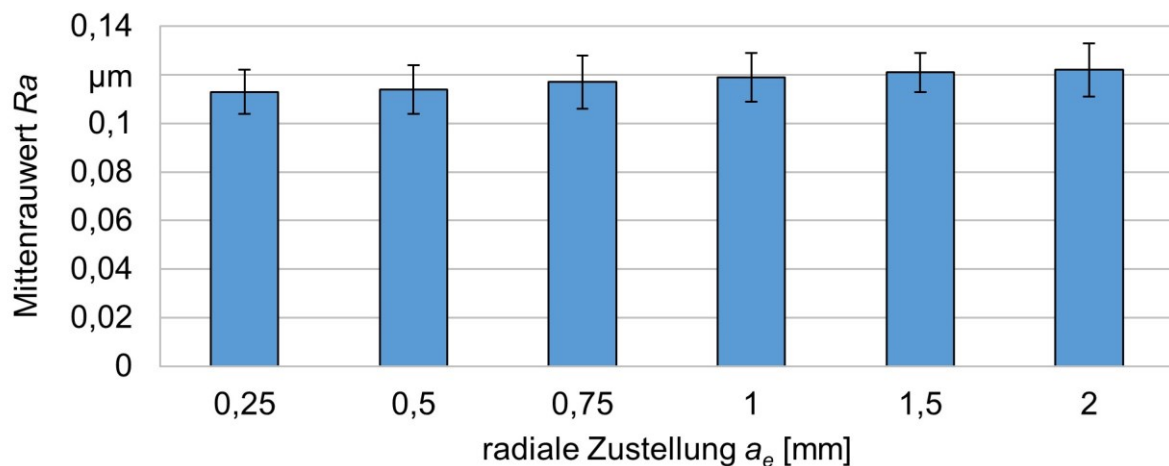
Pulver: FerroMAP 315/400 μm

Bild 9.4: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf den Mittentrauwert beim Kugel-MAP

Fazit: Die optimale Schnittgeschwindigkeit beim Kugel-MAP weist einen deutlich niedrigeren jedoch breiteren Bereich von ca. 55 – 70 m/min im Vergleich zum Plan-MAP auf (Kap. 5.2).

9.5 Einfluss der radialen Zustellung

Die radiale Zustellung beschreibt gemeinsam mit der Vorschubgeschwindigkeit die Produktivität des Verfahrens, da die Anzahl der notwendigen Verfahrensbewegungen für die Bearbeitung eines Formelementes bei der Erhöhung der radialen Zustellung sinkt, was die Gesamtbearbeitungszeit reduziert. Allerdings wird dabei z.B. beim Kugelfräsen eine niedrigere Oberflächengüte erreicht. Daher muss die radiale Zustellung auf die Anforderungen an die Oberflächenqualität angepasst werden. Das Kugel-MAP-Werkzeug wurde bei einer Neigung von 60° zur Werkstückoberfläche eingesetzt und hinterlässt eine Bearbeitungsspur von ca. 20 μm . Die Oberfläche wird jedoch ungleichmäßig bearbeitet, da die mechanische Pulververdichtung mit dem Radius stark abnimmt. Aus diesem Grund wird das Werkzeug mehrmals radial in geringeren Abständen zugestellt. Die Ergebnisse sind im Bild 9.5 dargestellt und weisen auf eine geringfügige Abweichung der Oberflächengüte mit steigender radialer Zustellung bis zu 2 mm hin, die deutlich über entsprechende Werte beim Schlichten mit einem Kugelfräser liegen.



Verfahren: Kugel-MAP
Werkzeugtyp: G
Deckel: B1
Werkstoff: 1.4301
 Oberfläche verölt
 (KMT 80)
Plattenstärke: 1,6 mm

Ausgangsoberfläche:
 gefräst $R_a = 0,23 \pm 0,03 \mu\text{m}$
Werkzeug: Kugelfräser
 $D = 10 \text{ mm}$, $z = 2$
Schneidstoff: HM
Beschichtung: TiAlNi (PVD)

Schnittparameter:

	gefräst	MAP	
n	5000	1000	[U/min]
f	1000	15	[mm/min]
a_p	0,1	1,2	[mm]
a_e	0,1	variabel	[mm]

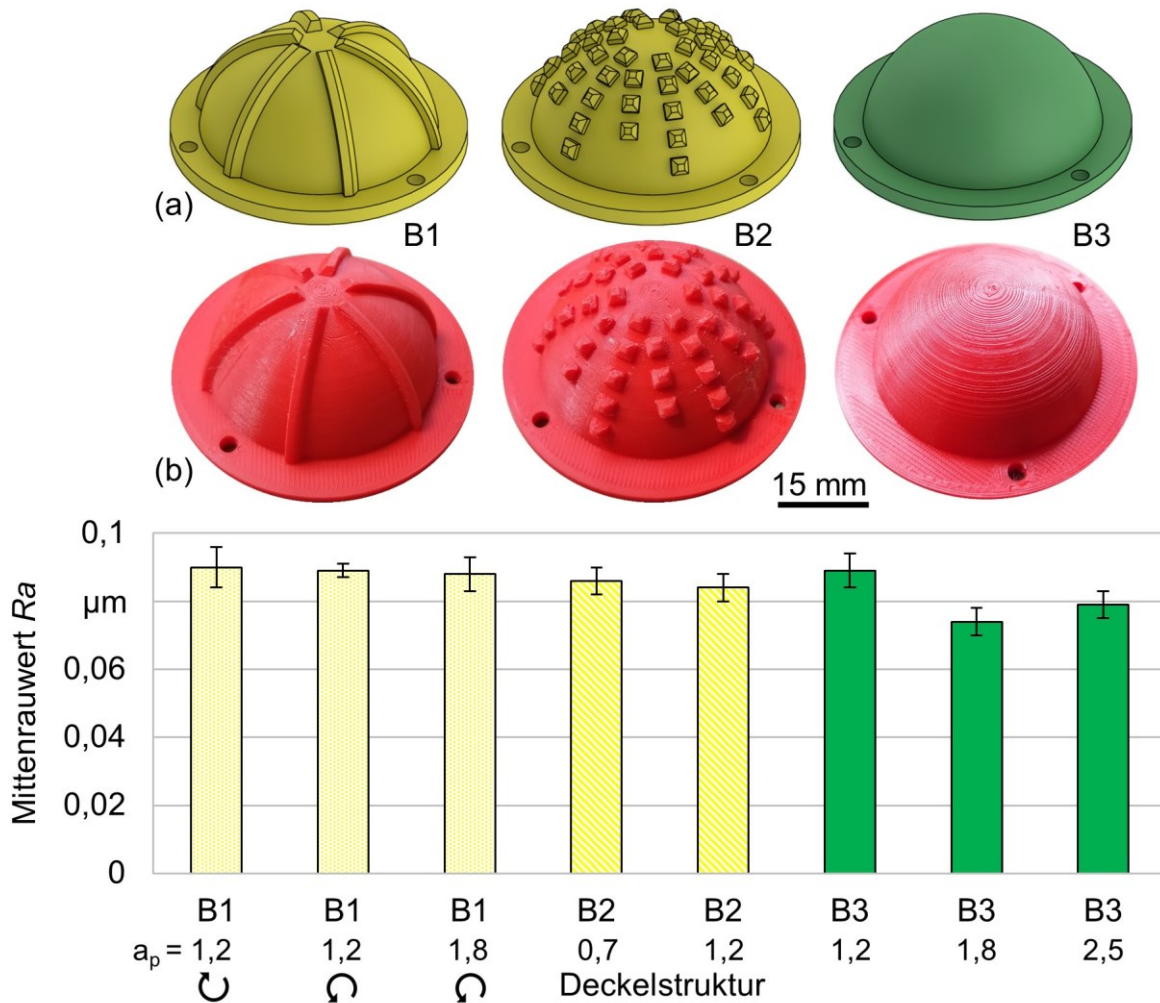
Pulver: FerroMAP 315/400 μm

Bild 9.5: Einfluss der radialen Zustellung auf den Mittenrauwert beim Kugel-MAP

Fazit: Die radiale Zustellung (bis zu 2 mm) reduziert die erreichte Oberflächengüte nur geringfügig, während ein Kugel-MAP-Werkzeug großen Durchmessers (über 40 mm) eingesetzt wird.

9.6 Deckelstruktur

Beim Plan-MAP wurden zahlreiche Deckelstrukturen (20 Arten) ausführlich untersucht und in drei Gruppen entsprechend der Hindernisstruktur unterteilt: ununterbrochene Hindernisse in Umfangsrichtung, unterbrochene Hindernisse und ungehinderte Umfangsbewegung. Beim Kugel-MAP wurden einzelne Gruppenvertreter ausgewählt entsprechend B1, B2 und B3 kategorisiert und bei unterschiedlichen Arbeitsabständen und niedriger Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min miteinander verglichen. Die Deckelstrukturen und Ergebnisse der Untersuchungen sind im Bild 9.6 dargestellt.



Verfahren: Kugel-MAP
Werkzeugtyp: G
Deckel: variabel
Werkstoff: 1.4301
 Oberfläche verölt (KMT 80)
Plattenstärke: 1,5 mm

Ausgangsoberfläche: gefräst $Ra = 0,22 \pm 0,03 \mu\text{m}$
Werkzeug: Kugelfräser
 $D = 10 \text{ mm}, z = 2$
Schneidstoff: HM
Beschichtung: TiAlNi (PVD)

Schnittparameter:
 gefräst MAP
 $n = 5000 \quad 1000 \quad [\text{U/min}]$
 $f = 1000 \quad 5 \quad [\text{mm/min}]$
 $a_p = 0,1 \quad \text{variabel} \quad [\text{mm}]$
 $a_e = 0,1 \quad 0,5 \quad [\text{mm}]$
Pulver: FerroMAP 315/400 μm

Bild 9.6: Einfluss der Deckelstruktur und des Arbeitsabstandes auf den Mittensrauwert beim Kugel-MAP: (a) 3D-Modell und (b) reale Fotos der Deckelstrukturen

Zuerst wurde die Deckelstruktur mit ununterbrochenem Hindernis (B1) bei $a_p = 1,2$ mm und $1,8$ mm in Gegenuhrzeigersinn eingesetzt, sodass das magnetabrasive Pulver durch die scharfe Kante (ohne Fase 60°) beeinflusst wurde. Dabei wurden vernachlässigbare Unterschiede in der Oberflächengüte festgestellt. Somit konnte durch die Deckelstruktur B1 bei optimalen Prozessparametern ein Mittenwert von $R_a = 0,09$ μm erzeugt werden. Danach wurde die Deckelstruktur mit unterbrochenem Hindernis (B2) getestet. Solche Strukturen haben beim Plan-MAP zu einer nicht optimalen aber erhöhten Prozessintensität beigetragen. Da für das magnetabrasive Pulver in diesem Fall mehr Platz zum Ausweichen zur Verfügung steht, wurde auch ein niedrigerer Arbeitsabstand von $a_p = 0,7$ mm eingesetzt. Allerdings wurde keine Oberflächenverbesserung im Vergleich zum Arbeitsabstand von $a_p = 1,2$ mm festgestellt. Die Deckelstruktur B2 hat beim Kugel-MAP sogar ein bisschen bessere Rauheit von $R_a = 0,085$ μm erzielt.

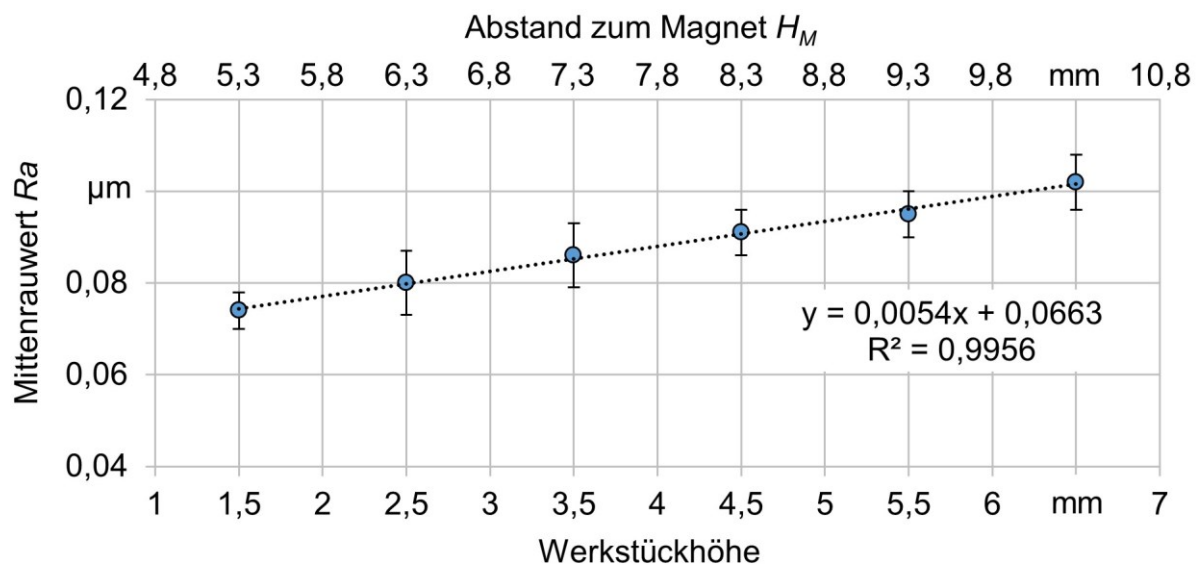
Zum Schluss wurde die Deckelstruktur ohne Hindernisse (B3) untersucht. Beim Plan-MAP unter Verwendung von Werkzeugtyp A hat diese Deckelstruktur eine sehr kontraproduktive Wirkung ausgeübt. In der Anwendung Kugel-MAP konnte die Deckelstruktur B3 beim Arbeitsabstand von $a_p = 1,2$ mm die gleiche Oberflächengüte wie die Deckelstruktur B1 erzeugen. Allerdings wurde eine stärkere Schlamm Bildung beobachtet, was auf zu starke mechanische Kornverdichtung und zu geringem Arbeitsabstand hinweist. Daher wurden weitere Versuche bei $a_p = 1,8$ mm und $2,5$ mm durchgeführt. Bei höherem Arbeitsabstand wurde tatsächlich eine verminderte Schlamm Bildung festgestellt und eine höhere Oberflächengüte (entsprechend $R_a = 0,075$ μm und $R_a = 0,09$ μm) erzeugt. Somit wurde festgestellt, dass die Deckelstruktur ohne Hindernis (B3) die beste Oberflächenqualität gewährleistet.

Abweichende Ergebnisse beim Einsatz der Deckelstrukturen für das Plan-MAP und Kugel-MAP sind der veränderten Verfahrens- und Pulverkinematik geschuldet. Beim Plan-MAP bleibt der Arbeitsabstand innerhalb der kompletten Bearbeitungszone konstant. Daher stellt dies eine sensible Prozessstellgröße dar. Beim Kugel-MAP ist der Arbeitsabstand ungleichmäßig ausgeprägt. Darüber hinaus konnte das Pulver sehr einfach in der Kontaktzone ausweichen. Aus diesem Grund wird eine hohe mechanische Pulververdichtung durch die Deckelstruktur nicht erreicht.

Fazit: Eine Strukturierung der Deckel beim Kugel-MAP zeigt im Gegensatz zum Plan-MAP keinen positiven Einfluss auf die Prozessintensität.

9.7 Einfluss der Werkstückhöhe

Durch eine größere Werkstückhöhe steigt der Abstand zwischen dem Permanentmagnet und dem ferromagnetischen Unterteil, was zur Reduzierung der magnetischen Flussdichte im Arbeitsspalt und somit zur Senkung der Zerspankraft führt. Dadurch wird eine schlechtere Oberflächengüte erreicht, was die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen (Bild 9.7), welche mit den Ergebnissen für das Plan-MAP aus dem Kap. 6.2 übereinstimmen. Die erreichte Oberflächenqualität sinkt linear mit steigender Werkstückhöhe (bzw. Abstand zum Magnet) von $R_a = 0,075 \mu\text{m}$ bei 1,5 mm ($H_m = 5,3 \text{ mm}$) bis ca. $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ bei 6,5 mm ($H_m = 10,3 \text{ mm}$). Einerseits weist dies auf eine eingeschränkte Oberflächenverbesserung bei Werkstücken hoher Wandstärke hin. Andererseits kann dieser Nachteil durch den Einsatz sehr starker Elektromagnete kompensiert werden und darüber hinaus die erreichte Oberflächengüte bei dünnwandigen Werkstücken sogar erhöhen. Aus diesem Grund wird das Potential des magnetabrasiven Polierens durch den Werkzeugtyp G nicht vollständig ausgeschöpft.



Verfahren: Kugel-MAP

Werkzeugtyp: G

Deckel: B3

Werkstoff: 1.4301

Oberfläche verölt

(KMT 80)

Plattenstärke: 1,4 mm

Ausgangsoberfläche:

gefräst $R_a = 0,23 \pm 0,03 \mu\text{m}$

Werkzeug: Kugelfräser

$D = 10 \text{ mm}$, $z = 2$

Schneidstoff: HM

Beschichtung: TiAlNi (PVD)

Schnittparameter:

gefräst MAP

n 5000 1000 [U/min]

f 1000 5 [mm/min]

a_p 0,1 1,8 [mm]

a_e 0,1 0,5 [mm]

Pulver: FerroMAP 315/400 μm

Bild 9.7: Einfluss der Werkstückhöhe auf den Mittenrauwert beim Kugel-MAP

Fazit: Ein höherer Abstand zum Magnet führt wie beim Plan-MAP zur linearen Reduzierung der erreichten Oberflächengüte.

9.8 MAP der Freiformflächen

Nachdem die optimalen Prozessparameter wie Arbeitsabstand, Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit, radiale Zustellung und die Deckelart in der Bearbeitung von Planfläche für Kugel-MAP ermittelt wurden, können die Ergebnisse bei der Bearbeitung den drei komplexen Formelementen wie Innen-, Außenradius und Freiformfläche praktisch referenziert werden. Dabei wurden die Platten in 2 mm Stärke aus vollem Material (paramagnetischer Edelstahl 1.4301) sowie die ferromagnetischen Unterteile (Baustahl 1.0037) entsprechender Form gefräst (Bild 9.8). Die Platten komplexer Form wurden mittels Schraubverbindung eingespannt und mit dem Kugelfräser in Längsrichtung durch eine Doppelweg-Bearbeitungsstrategie vorbereitet. Sowohl der Kugelfräser als auch der Werkzeugtyp G wurden parallel zur Z-Achse der Werkzeugmaschine (vertikal) geführt, um die Verfahrbewegung zu erleichtern und die Kollision mit dem Schraubenkopf zu vermeiden. Die Innen- und Außenradiusplatten wurden mittels Kugel-MAP in Querrichtung bearbeitet, während bei der Freiformplatte der Werkzeugtyp G in Längsrichtung mit der Kontur geführt wurde.

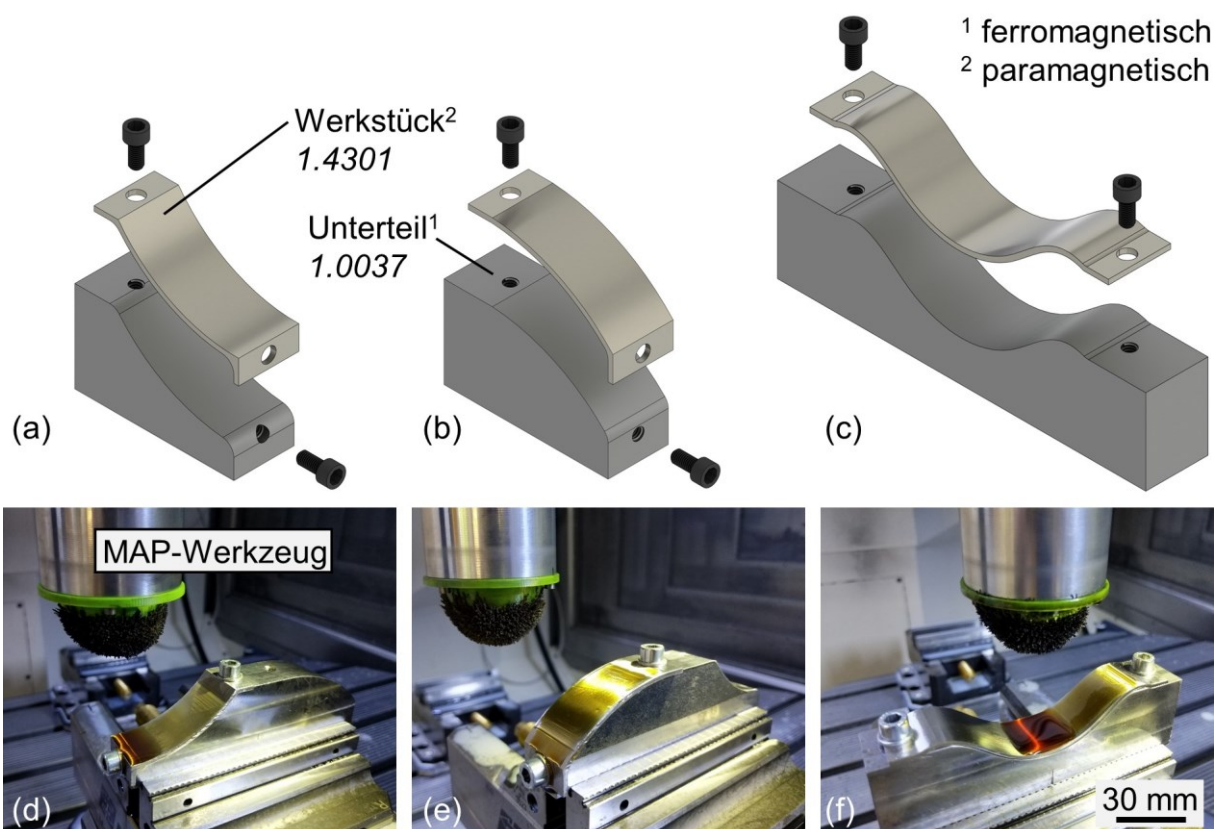


Bild 9.8: Bearbeitung der Werkstücke komplexer Form (a, d) Innenradius, (b, e) Außenradius, (c, f) Freiform, erste Reihe – 3D-Modelle, zweite Reihe – reale Fotos

Die Ergebnisse des magnetabrasiven Polierens von Freiformflächen in Relation zur Planfläche sind im Bild 9.9 dargestellt und weisen auf eine sehr ähnliche erreichte Oberflächengüte unabhängig von der Freiformflächenart hin. Dabei wurde generell eine höhere Rauheit als bei der ebenen Platte gemessen. Der Mittenrauwert liegt bei $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ im Vergleich zu $R_a = 0,07 \mu\text{m}$ und die gemittelte Rautiefe bei ca. $R_z = 0,6 \mu\text{m}$ im Vergleich zu $R_z = 0,47 \mu\text{m}$. Allerdings ist eine höhere Rauheit nach dem Kugel-MAP immer im Verhältnis zu einer vergleichsweise schlechten Ausgangsoberflächengüte nach dem Kugelfräsen der Freiformflächen zu betrachten. Dies ist auf Schwingungen infolge der Einspannung der Bleche zurückzuführen. Hierbei wurden Riefen erzeugt, die nicht durch das MAP vollständig entfernt werden konnten. Würden die Platten schwingungsarm vorgefräst und eine homogene rillenarme Oberflächentopographie erzeugt, dann würden sehr ähnliche Ergebnisse wie beim Kugel-MAP der Planflächen generiert. Eine Übertragbarkeit der Bearbeitung von Plan- zu Freiformflächen wäre demnach gegeben. Somit können die zukünftigen Untersuchungen und weitere Technologieentwicklung des Kugel-MAPs hauptsächlich auf den Planflächen durchgeführt werden, um den Mess- und Versuchsaufwand bzw. die Probenvorbereitung zu reduzieren. Die Referenzversuche bei komplexen Freiformflächen bleiben nach wie vor notwendig, um die erreichten Fortschritte zu bestätigen.

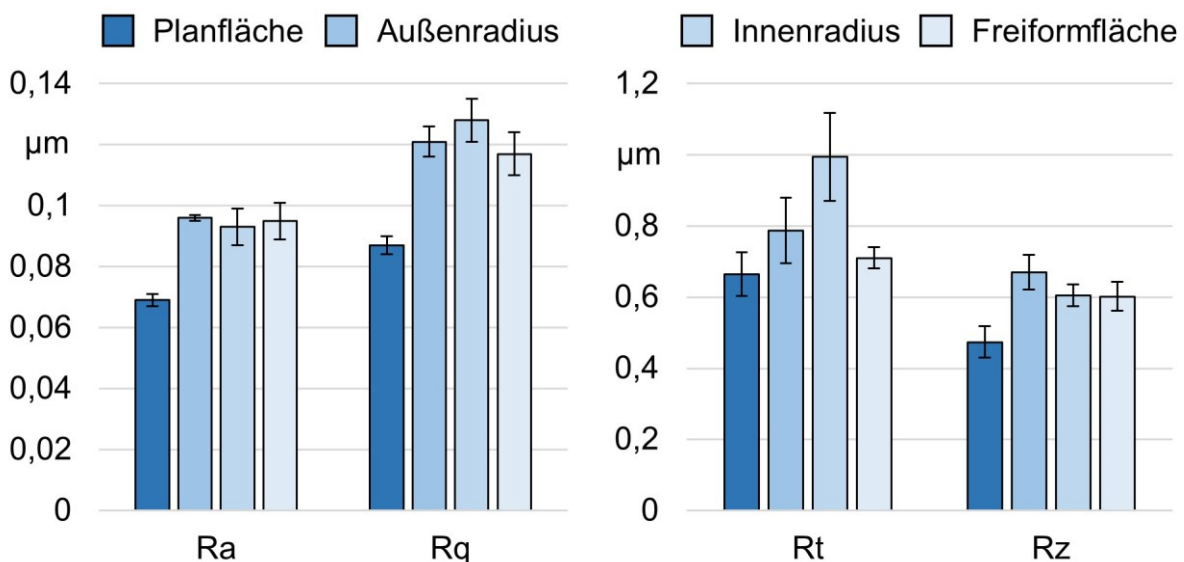


Bild 9.9: Rauheitskenngrößen nach dem Kugel-MAP unterschiedlicher Freiformflächen in der Relation zur Planfläche

Die Rauheitsmessung an Planflächen erfolgte mittels mobilem taktilen Messgerät in Fräsrichtung ($R_a < 0,25 \mu\text{m}$). Für die Freiformflächen besteht nur die Möglichkeit quer

zur Fräsrichtung die Rauheit zu messen. Aus diesem Grund wurden viel höhere Rauheitskenngrößen (ca. $R_a = 0,07 \mu\text{m}$) bei der Messung der Platte mittels stationärem hochpräzisiertem taktilen Rauheitsmessgerät ermittelt. Dies schränkt die Vergleichbarkeit der Rauheitsmessungen ein. Die Rauheitsprofile sind im Bild 9.10 dargestellt und verdeutlichen das Problem mit tiefen Rillen bei den Freiformflächen nach dem Fräsen. Obwohl die R_a - und R_z -Werte nach dem Kugelfräsen der Freiformfläche nur ein wenig über den Werten der Planfläche liegen, sind deutliche Unterschiede im Profil zu erkennen wie z.B. viel breitere Rillen. Durch das Kugel-MAP konnte in beiden Fällen der Mittenrauwert um das Zehnfache reduziert werden. Trotzdem haben tiefe und breite Fräsrillen bei den Freiformflächen dafür gesorgt, dass die Oberflächengüte nicht wie bei der Planfläche erreicht werden konnte. In der Bearbeitung von Platten mit Innen- und Außenradius werden vergleichbare Ergebnisse festgestellt (Bild 9.11).

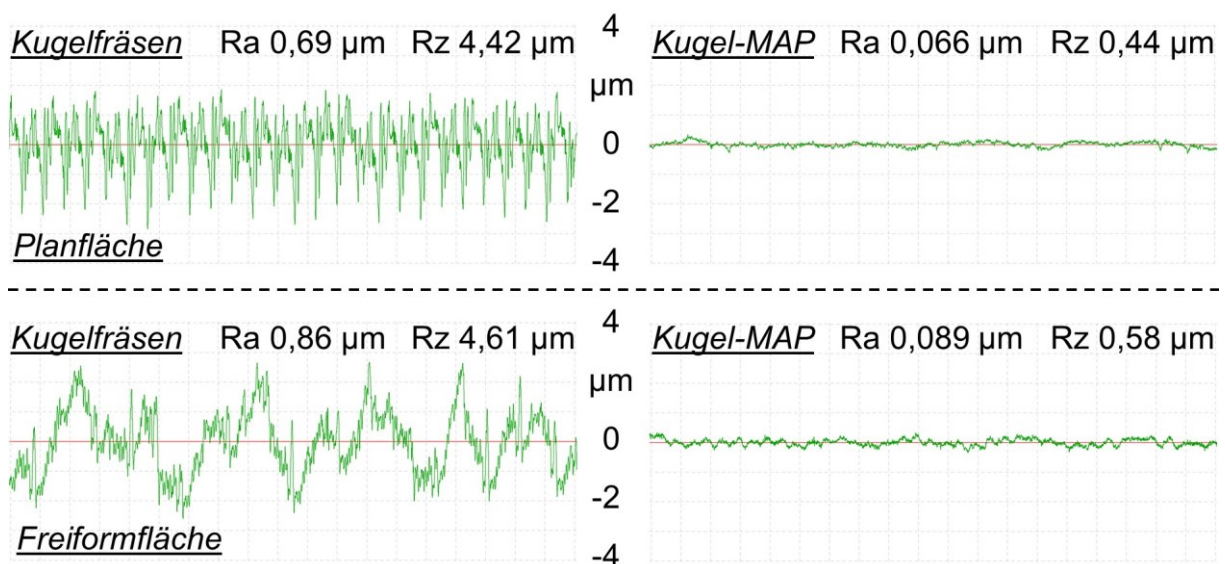


Bild 9.10: Rauheitsprofile nach dem Fräsen und Kugel-MAP

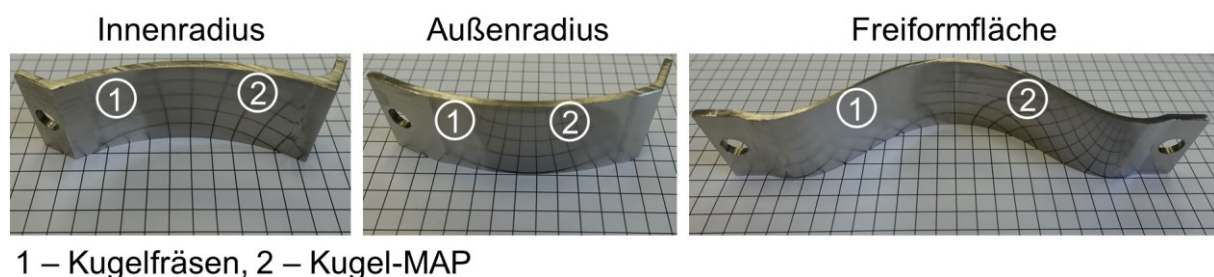


Bild 9.11: Fotos der Freiformplatten nach dem Fräsen und Kugel-MAP

Fazit: Das magnetabrasive Polieren mittels Kugelwerkzeug ist für die Bearbeitung von Freiformflächen beliebiger Komplexität geeignet.

10 Praxisrelevante Erkenntnisse

Die wichtigsten Versuchsergebnisse werden nachfolgenden zusammengefasst.

- a) Der Werkzeugtyp A wird für das MAP von ferromagnetischen Werkstoffen empfohlen, während bei den para- und diamagnetischen Werkstoffen ein weiterer Untersuchungsbedarf besteht und ein MAP-Werkzeug mit geschlossenem Magnetfeld auf einer Oberfläche empfohlen wird (z.B. Typ C, D, E).
- b) Die mechanische Pulververdichtung wird durch eine gezielte Deckelstruktur mit ununterbrochenen Hindernissen in Umfangsrichtung und einem optimalen Arbeitsabstand für die jeweiligen Korngrößen (4 – 6 mittleren Korngrößen) beim Plan-MAP an ferromagnetischen Werkstoffen erzeugt und intensiviert die Prozessintensität signifikant. Der optimale Arbeitsabstand (1,5 mm für FerroMAP 200/315 μm und 1,8 mm für FerroMAP 315/400 μm) sollte für eine effiziente Prozessführung, zur Vermeidung von Oberflächenbeschädigungen und tiefen Kratzern nicht unterschritten werden.
- c) Das Plan-MAP verfügt über eine hohe Produktivität im Vergleich zu anderen Finishverfahren und erzeugt eine sehr hohe Oberflächengüte schon bei $f = 25 \text{ mm/min}$.
- d) Die äquivalente Schnittgeschwindigkeit liegt bei ca. 130 m/min unabhängig vom Werkzeugtyp. Deren Überschreitung führt meistens zur hohen Temperaturentwicklung, Überhitzung des MAP-Werkzeuges und Prozessstörungen, wenn keine Prozesskühlung stattfindet.
- e) Eine Erhöhung der magnetischen Flussdichte führt zum linearen Anstieg der Oberflächenqualität und der Passivkraft.
- f) Die Anzahl von Überfahrten spielt eine vernachlässigbare Rolle auf die erreichte Oberflächengüte, insofern die Gesamtbearbeitungszeit konstant bleibt.
- g) Deckelwerkstoff und -mikrostruktur beeinflussen die Prozessintensität maßgeblich. Der Einsatz einer rauen, elastischen, additiv-gefertigten Deckelstruktur mit niedriger Wärmeleitfähigkeit aus PLA hat sich bei den Untersuchungen bewährt.
- h) Eine weitere Optimierung der Deckelstruktur mit ununterbrochenen Hindernissen, der Einsatz unterschiedlicher Ölsorten und die Nutzung einer Ultraschallunterstützung (2 μm Amplitude, 36 kHz Frequenz) zeigten keine signifikanten Prozessverbesserungen.

- i) Ein nicht ferromagnetisches Zusatz-Abrasiv in Form von einer Paste oder losen Körnern wird durch das magnetabrasive Pulver im Prozess mitgenommen und kann Vorteile bei passender chemischer Zusammensetzung für das System Werkstoff-Schneidstoff-KSS bringen (z.B. höhere Oberflächengüte beim Einsatz vom Walnussgranulat).
- j) Die Pulverstandzeit des schmelzezerstäubten FerroMAP beträgt über 1 Stunde und ist weiterhin abhängig von der Korngröße.
- k) Wenn die Ausgangsoberfläche (sogar bei $R_a = 1,2 \mu\text{m}$ nach dem Kugelfräsen) keine tiefen Rillen aufweist, wird durch das Plan-MAP in einem Fertigungsschritt mit relativ zu anderen abrasiven Finishverfahren grober Korngröße (über $200 \mu\text{m}$) ein eigenes Rauheitsprofil mit annähernd homogener und sehr hoher Oberflächengüte (bis $R_a = 0,02 \mu\text{m}$, $R_z = 0,12 \mu\text{m}$, $R_{pk} = 0,06 \mu\text{m}$, $R_{vk} = 0,08 \mu\text{m}$) erzeugt.
- l) Beim Kugel-MAP wurde eine zehnfache Reduzierung der Rauheit von $R_a = 0,69 \mu\text{m}$, $R_z = 4,42 \mu\text{m}$ auf $R_a = 0,066 \mu\text{m}$, $R_z = 0,44 \mu\text{m}$ bei der Bearbeitung paramagnetischer Platten (2 mm Stärke) auf ferromagnetischem Unterteil erreicht.

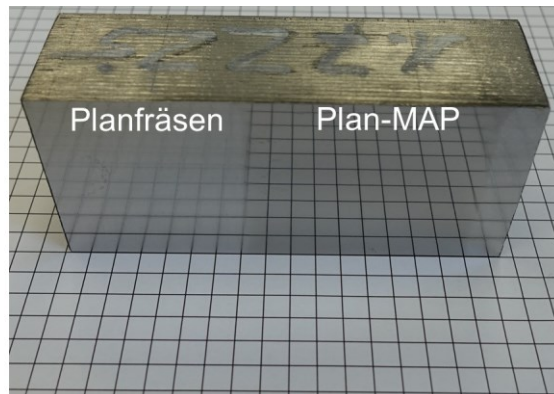


Bild 10.1: Foto des Bauteiles nach dem Planfräsen und magnetabrasiven Polieren

11 Zusammenfassung und Ausblick

Die Anforderungen an die Oberflächenqualität von Bauteilen und dementsprechend an die verwendeten Finishverfahren nehmen explizit in den Branchen Werkzeug-, Formenbau, Medizintechnik, Luftfahrt, Optik und Astronomie zu. Obwohl zahlreiche Finishverfahren heutzutage industriell umgesetzt werden, weisen die meisten Technologien eine sehr niedrige Produktivität und prozessspezifische Nachteile auf sowie benötigen häufig komplexe und kostenintensive Anlagen. Die grundlegenden anwendungsbezogenen Untersuchungen des magnetabrasiven Polierens auf Bearbeitungszentren in Form von MAP-Werkzeugen mit neuartigen Deckelstrukturen zeigen signifikante Oberflächenverbesserungen von gefrästen Planflächen ferromagnetischer Werkstücke bis zu $R_a = 0,02 \mu\text{m}$ und $R_z = 0,12 \mu\text{m}$ in einem Fertigungsschritt.

In der vorliegenden Arbeit wurden der Einfluss der Prozessparameter zahlreiche Deckelstrukturen und -werkstoffe, unterschiedliche MAP-Werkzeugtypen mit variiertes Art, Anzahl und Anordnung der Permanentmagnete, Prozessmodifikationen mit Zugabe von zusätzlichen abrasiven Mitteln und Ultraschallanregung, Werkstückeigenschaften, wie die Stahlsorte und Ausgangsoberfläche nach dem Plan-, Schaft-, Kugelfräsen und Schleifen sowie die Kenngrößen, wie die Standzeit, Abtragsleistung und Kraftkomponenten analysiert und die Erkenntnisse auf das magnetabrasive Polieren von Freiformflächen übertragen. Insbesondere wird der Effekt der mechanischen Pulververdichtung, der durch eine definierte Deckelstruktur und einen optimalen Arbeitsabstand für die jeweilige Korngröße wirksam wird sowie die Prozessintensität signifikant erhöht, und der Einfluss des Deckelwerkstoffes und dessen Mikrostruktur auf die erreichte Oberflächengüte analysiert. Das magnetabrasive Polieren kann unter Nutzung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse einen höheren Technologiereifegrad erlangen und weist ein hohes Potential zum Einsatz in der Industrie auf.

Ausblickend besteht weiterer Forschungsbedarf des MAPs der Planflächen der para- und diamagnetischen Werkstoffe ohne ferromagnetische Unterlage auf BAZ. Außerdem ergibt sich aus weiteren Verfahrenskinetiken ein breites Forschungsfeld vom MAP der Freiformflächen sowohl ferro- als auch paramagnetischer Werkstoffe. Darüber hinaus zeichnet sich ein weiterer F&E Bedarf für neue MAP-Werkzeugtypen für das Finishen weiterer Formelemente wie z.B. Welle und Bohrung auf BAZ ab.

12 Literaturverzeichnis

- [Alta01] Altan, T.; Lilly, B.; Yen, Y.C.: Manufacturing of Dies and Molds, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 50/2, S. 405-423, 2001
- [Axi19] Axinte, D.; Guo, Y.; Liao, Z.; Shih, A.J.; M'Saoubi, R.; Sugita, N.: Machining of biocompatible materials - Recent advances, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 68/2, S. 629-652, 2019
- [Bart12] Bartolo, P.; Kruth, J.P.; Silva, J.; Levy, G.; Malshe, A.; Rajurkar, K.; Mitsuishi, M.; Ciurana, J.; Leu, M.: Biomedical production of implants by additive electro-chemical and physical processes, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 61/2, S. 635-655, 2012
- [Barm17] Barman, A.; Das, M.: Design and fabrication of a novel polishing tool for finishing freeform surfaces in magnetic field assisted finishing (MFAF) process, in Precision Engineering 49, S. 61-68, 2017
- [Baro86] Baron, Y.M.: Magnetabrasive und magnetische Bearbeitung der Werkstücke und Zerspanwerkzeugen, Sankt Petersburg, Maschinenbauverlag, 1986
- [Beau11] Beaucamp, A.; Namba, Y.; Inasaki, I.; Combrinck, H.; Freeman, R.: Finishing of optical moulds to $\lambda/20$ by automated corrective polishing, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 60/1, S. 375-378, 2011
- [Beau13] Beaucamp, A.; Namba, Y.: Super-smooth finishing of diamond turned hard X-ray molding dies by combined fluid jet and bonnet polishing, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 62/1, S. 315-318, 2013
- [Bier13a] Biermann, D.; Wolf, M.; Heymann, T.: Magnetfinishen zur Präparation von VHM-Werkzeugen, Teil 1, in Wissenschaft & Forschung 5, S. 24-29, 2013
- [Bier13b] Biermann, D.; Wolf, M.; Heymann, T.: Magnetfinishen zur Präparation von VHM-Werkzeugen, Teil 2, in Wissenschaft & Forschung 5, S. 32-37, 2013
- [Brin10] Brinksmeier, E.; Mutlugünes, Y.; Klocke, F.; Aurich, J.C.; Shore, P.; Ohmori, H.: Ultra-precision grinding, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 59/2, S. 652-671, 2010

- [Buhm20] Buhmann, M.; Roth, R.; Liebrich, T.; Frick, K.; Carelli, E.; Marxer, M.: New positioning procedure for optical probes integrated on ultra-precision diamond turning machines, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 69/1, S. 473-476, 2020
- [Böge14] Böge, A.; Böge, W.: *Handbuch Maschinenbau, Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*, 22. Auflage, Berlin, Springer, 2014
- [Chan02] Chang, G.W.; Yan, B.H.; Hsu, R.T.: Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives, in *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42, S. 575-583, 2002
- [Chom06] Chomytch, N.S.: *Magnetabrasive Bearbeitung der Werkstücke*, Minsk, BNTU, 2006
- [Chou16] Chou, S.H.; Wang, A.C.; Lin, Y.C.: Elucidating the rheological effect of gel abrasives in magnetic abrasive finishing, in *Procedia CIRP* 42, S. 866-871, 2016
- [Coey20] Coey, J.M.D.: Perspective and Prospects for Rare Earth Permanent Magnets, in *Engineering* 6, S. 119-131, 2020
- [Cong15] Cong, L.; Jin, H.; Fitsos, P.; McIntyre, T.; Yih, Y.; Zhao, F.; Sutherland, J.W.: Modeling the Value Recovery of Rare Earth Permanent Magnets at End-of-Life, in *Procedia CIRP* 29, S. 680-685, 2015
- [Cui18] Cui, J.; Kramer, M.; Zhou, L.; Liu, F.; Gabay, A.; Hadjipanayis, G.; Balasubramanian, B.; Sellmyer, D.: Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets, in *Acta Materialia* 158, S. 118-137, 2018
- [Deng20] Deng, T.; Li, J.; Zheng, Z.: Fundamental aspects and recent developments in metal surface polishing with energy beam irradiation, in *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 148, 2020
- [Diet16] Dietrich, J.: *Praxis der Zerspantechnik, Verfahren, Werkzeuge, Berechnung*, 12. Auflage, Berlin, Springer, 2016

- [Duva18] Duval-Chaneac, M.S.; Han, S.; Claudin, C.; Salvatore, F.; Bajolet, J.; Rech, J.: Characterization of maraging steel 300 internal surface created by selective laser melting (SLM) after abrasive flow machining (AFM), in *Procedia CIRP* 77, S. 359-362, 2018
- [Döbb20] Döbberthin, C.; Müller, R.; Meichsner, G.; Welzel, F.; Hackert-Oschätzchen M.: Experimental Analysis of the Shape Accuracy in Electrochemical Polishing of Femoral Heads for Hip Endoprosthesis, in *Procedia Manufacturing* 47, S. 719-724, 2020
- [Erik12] Eriksen, R.S.; Arentoft, M.; Grønbæk, J.; Bay, N.: Manufacture of functional surfaces through combined application of tool manufacturing processes and Robot Assisted Polishing, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61/1, S. 563-566, 2012
- [Evan03] Evans, C.J.; Paul, E.; Dornfeld, D.; Lucca, D. A.; Byrne, G.; Tricard, M.; Klocke, F.; Dambon, O.; Mullany, B. A.: Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52/2, S. 611-633, 2003
- [Fang13] Fang, F.Z.; Zhang, X.D.; Weckenmann, A.; Zhang, G.X.; Evans, C.: Manufacturing and measurement of freeform optics, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62/2, S. 823-846, 2013
- [Fox94] Fox, M.; Agrawal, K.; Shinmura, T.; Komanduri, R.: Magnetic Abrasive Finishing of Rollers, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 43/1, S. 181-184, 1994
- [Frit18] Fritz, A.H.: *Fertigungstechnik*, 12. Auflage, Berlin, Springer, 2018
- [GioL15] Giorleo, L.; Ceretti, E.; Giardini, C.: Ti surface laser polishing: effect of laser path and assist gas, in *Procedia CIRP* 33, S. 446-451, 2015
- [GioC16] Giorgi, C.D.; Furlan, V.; Demir, A.G.; Tallarita, E.; Candiani, G.; Previtali, B.: Laser micro-polishing of stainless steel for antibacterial surface applications, in *Procedia CIRP* 49, S. 88-93, 2016
- [Gong19] Gong, H.; Ao, S.; Huang, K.; Wang, Y.; Yan, C.: Tool path generation of ultra-precision diamond turning: A state-of-the-art review, in *Nanotechnology and Precision Engineering* 2, S. 118-124, 2019

- [Gran15] Grandguillaume, L.; Lavernhe, S.; Quinsat, Y.; Tournier, C.: Mold manufacturing optimization: a global approach of milling and polishing processes, in *Procedia CIRP* 31, S. 13-18, 2015
- [Guo16] Guo, J.; Kum, C.W.; Au, K.H.; Tan, Z.E.; Wu, H.; Liu, K.: New vibration-assisted magnetic abrasive polishing (VAMAP) method for microstructured surface finishing, in *Optics Express* 24, S. 242-254, 2016
- [Guo18] Guo, J.; Jong, H.J.; Kang, R.; Guo, D.: Novel localized vibration-assisted magnetic abrasive polishing method using loose abrasives for V-groove and Fresnel optics finishing, in *Optics Express* 26, S. 316-327, 2018
- [Han20] Han, S.; Salvatore, F.; Rech, J.; Bajolet, J.; Courbon, J.: Surface integrity in abrasive flow machining (AFM) of internal channels created by selective laser melting (SLM) in different building directions, in *Procedia CIRP* 87, S. 315-320, 2020
- [Hash15] Hashimoto, F.; Johnson, S.P.: Modeling of vibratory finishing machines, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64/1, S. 345-348, 2015
- [Hash16a] Hashimoto, H.; Yamaguchi, H.; Krajnik, P.; Wegener, K.; Chaudhari, R.; Hoffmeister, H.W.; Kuster, F.: Abrasive fine-finishing technology, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65/2, S. 597-620, 2016
- [Hash16b] Hashimoto, F.; Johnson, S.P.; Chaudhari, R.G.: Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65/1, S. 325-328, 2016
- [Hild11] Hildebrand, J.; Hecht, K.; Bliedtner, J.; Müller, H.: Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces, in *Physics Procedia* 12, S. 452-461, 2011
- [Horn18] Hornbogen, E.; Warlimont, H.; Skrotzki, B.: *Metalle, Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*, 7. Auflage, Berlin, Springer, S. 341-360, 2018
- [Hung10] Hung, C.L.; Ku, W.L.; Yang, L.D.: Prediction System of Magnetic Abrasive Finishing (MAF) on the Internal Surface of a Cylindrical Tube, in *Materials and Manufacturing Processes* 25, S. 1404-1414, 2010

- [Jain09] Jain, V.K.: Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing, in *Journal of Materials Processing Technology* 209, S. 6022-6038, 2009
- [Jain10] Jain, V.K.; Ranjan, P.; Suri, V.K.; Komanduri, R.: Chemo-mechanical magneto-rheological finishing (CMMRF) of silicon for microelectronics applications, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59/1, S. 323-328, 2010
- [Jain11] Jain, V.K.; Sidpara, S.; Sankar, M.R.; Das, M.: Nano-finishing techniques: a review, in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 226, S. 327-346, 2011
- [Jain19] Jain, S.; Corliss, M.; Tai, B.; Hung, W.N.: Electrochemical polishing of selective laser melted Inconel 718, in *Procedia Manufacturing* 34, S. 239-246, 2019
- [Jha04] Jha, S.; Jain, V.K.: Design and development of the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process, in *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44, S. 1019-1029, 2004
- [Jiao19] Jiao, A.; Liu, W.: Study of Manufacturing Process of Holes in Aeroengine Heat Shield, in *International Journal of Aerospace Engineering*, S. 145-156, 2019
- [Juda13] Judal, K.B.; Yadava, V.; Pathak, D.: Experimental Investigation of Vibration Assisted Cylindrical - Magnetic Abrasive Finishing of Aluminum Workpiece, in *Materials and Manufacturing Processes* 28, S. 1196-1202, 2013
- [Kaki19] Kakinuma, Y.; Konuma, Y.; Fukuta, M.; Tanaka, K.: Ultra-precision grinding of optical glass lenses with La-doped CeO₂ slurry, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 68/1, S. 345-348, 2019
- [Kall08] Kallenbach, E.; Eick, R.; Quendt, P.; Ströhla, T.; Feindt, K.; Kallenbach, M.: *Elektromagnete, Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung*, 3. Auflage, Wiesbaden, Vieweg+Teubner, 2008

- [Kala14] Kala, P.; Pandey, P.M.: Experimental Study On Finishing Forces In Double Disk Magnetic Abrasive Finishing Process While Finishing Paramagnetic Workpiece, in *Procedia Materials Science* 5, S. 1677-1684, 2014
- [Kala15] Kala, P.; Pandey, P.M.: Comparison of finishing characteristics of two paramagnetic materials using double disc magnetic abrasive finishing, in *Journal of Manufacturing Processes*, S. 63-77, 2015
- [Kang12a] Kang, J.; George, A.; Yamaguchi, H.: High-speed Internal Finishing of Capillary Tubes by Magnetic Abrasive Finishing, in *Procedia CIRP* 1, S. 414-418, 2012
- [Kang12b] Kang, J.; Yamaguchi, H.: Internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing using a multiple pole-tip system, in *Precision Engineering* 36, S. 510-516, 2012
- [Kani17] Kanish, T.C.; Narayanan, S.; Kuppan, P.; Ashok, D.S.: Investigations on the finishing forces in Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing of SS316L, in *Procedia Engineering* 174, S. 611-620, 2017
- [Kans18] Kansal, H.; Singh, A.K.; Grover, V.: Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool, in *Precision Engineering* 51, S. 30-39, 2018
- [Karp09] Karpuschewski, B.; Byelyayev, O.; Maiboroda, V.S.: Magneto-abrasive machining for the mechanical preparation of high-speed steel twist drills, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58/1, S. 295-298, 2009
- [Kend11] Kenda, J.; Pusavec, F.; Kermouche, J.; Kopac, J.: Surface Integrity in Abrasive Flow Machining of Hardened Tool Steel AISI D2, in *Procedia Engineering* 19, S. 172-177, 2011
- [Kend14] Kenda, J.; Pusavec, F.; Kopac, J.: Modeling and Energy Efficiency of Abrasive Flow Machining on Tooling Industry Case Study, in *Procedia CIRP* 13, S. 13-18, 2014
- [Khan16] Khan, D.A.; Alam, Z.; Jha, S.: Nanofinishing of copper using ball end magnetorheological finishing (BEMRF) process, in *Proceedings of the ASME*, S. 84-88, 2016

- [Klim17] Klimenko, S.A.; Kopeikina, M.Y.; Lavrinenko, V.I.; Maiboroda, V.S.; Akulovitch, L.M.; Levin, M.L.; Cheifez, M.L.; Chudolei, A.L.; Tchygyk, S.A.: Oberflächenfinishbearbeitung, Minsk, Weißrussische Wissenschaft, 2017
- [Klin18] Klink, A.; Arntz, K.; Johannsen, L.; Holsten, M.; Chrubasik, L.; Winands, K.; Wollbrink, M.; Bletek, T.; Gerretz, V.; Bergs, T.: Technology-based assessment of subtractive machining processes for mold manufacture, in *Procedia CIRP* 71, S. 401-406, 2018
- [KliU15] Klink, U.: Honen, Umweltbewusst und kostengünstig Fertigen. München, Carl Hanser, S. 175-186, 2015
- [Kloc07] Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 3, Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung*, 4. Auflage, Berlin, Springer, 2007
- [Kloc14] Klocke, F.; Klink, A.; Veselovac, D.; Aspinwall, D.K.; Soo, S.L.; Schmidt, M.; Schilp, J.; Levy, G.; Kruth, J.P.: Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63/2, S. 703-726, 2014
- [Kloc15] Klocke, F.; Soo, S.L.; Karpuschewski, B.; Webster, J.A.; Novovic, D.; Elfizy, A.; Axinte, D.A.; Tönissen, S.: Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64/2, S. 581-604, 2015
- [Kloc18a] Klocke, F.; Dambon, O.; Bletek, T.; Höche, T.; Naumann, F.; Hutzler, T.: Surface Integrity in Ultra-Precision Grinding of Transparent Ceramics, in *Procedia CIRP* 71, S. 177-180, 2018
- [Kloc18b] Klocke, F.: *Fertigungsverfahren 2, Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide*, 6. Auflage, Berlin, Springer, S. 341-360, 2018
- [Kuma15] Kumar, S.; Jain, V.K.; Sidpara, A.: Nanofinishing of freeform surfaces (knee joint implant) by rotational-magnetorheological abrasive flow finishing (R-MRAFF) process, in *Precision Engineering* 42, S. 165-178, 2015

- [Kuma16] Kumar, S.; Hiremath, S.: A Review on Abrasive Flow Machining (AFM), in *Procedia Technology* 25, S. 1297-1304, 2016
- [Kums13] Kumstel, J.; Kirsch, B.: Polishing titanium- and nickel-based alloys using cw-laser radiation, in *Physics Procedia* 41, S. 362-371, 2013
- [Kums15] Kumstel, J.: Polieren von SLM-Bauteilen mit kontinuierlicher Laserstrahlung, in *Neue Entwicklungen in der Additiven Fertigung*, Witt + Wegner + Sehrt (Hrsg.), S. 143-158, 2015
- [Liu14] Liu, G.Y.; Guo, Z.N.; Jiang, S.Z.; Qu, N.S.; Li, Y.B.: A study of processing Al 6061 with electrochemical magnetic abrasive finishing, in *Procedia CIRP* 14, S. 234-238, 2014
- [Maki19] Makiuchi, Y.; Hashimoto, F.; Beaucamp, A.: Model of material removal in vibratory finishing, based on Preston's law and discrete element method, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 68/1, S. 365-368, 2019
- [Malk20] Malkorra, I.; Salvatore, F.; Rech, J.; Arrazola, P.; Tardelli, J.; Mathis, A.: Influence of lubrication condition on the surface integrity induced during drag finishing, in *Procedia CIRP* 87, S. 245-250, 2020
- [Meij02] Meijer, J.; Du, K.; Gillner, A.; Hoffmann, D.; Kovalenko, V.S.; Masuzawa, T.; Ostendorf, A.; Poprawe, R.; Schulz, W.: Laser Machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51/2, S. 531-550, 2002
- [Misu13] Misumi, S.; Okada, A.; Okamoto, Y.; Inoue, M.: Fundamental study on sputter deposition of ceramic film by large-area electron beam irradiation, in *Procedia CIRP* 6, S. 486-491, 2013
- [Mits13] Mitsuishi, M.; Cao, J.; Bartolo, P.; Friedrich, D.; Shih, A.J.; Rajurkar, K.; Sugita, N.; Harada, K.: Biomanufacturing, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62/2, S. 585-606, 2013

- [Muli11] Mulik, R.S.; Pandey, P.M.: Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel using unbonded SiC abrasives, in *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 29, S. 68-77, 2011
- [Mull17] Mullany, B.; Shahinian, H.; Navare, J.; Azimi, F.; Fleischhauer, E.; Tkacik, P.; Keanini, R.: The application of computational fluid dynamics to vibratory finishing processes, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66/1, S. 309-312, 2017
- [Murr13] Murray, J.W.; Kinnell, P.K.; Cannon, A.H.; Bailey, B.; Clare, A.T.: Surface finishing of intricate metal mould structures by large-area electron beam irradiation, in *Precision Engineering* 37, S. 443-450, 2013
- [Nagd16] Nagdeve, L.; Jain, V. K.; Ramkumar, J.: Experimental Investigations into nano-finishing of freeform surfaces using negative replica of the knee joint, in *Procedia CIRP* 42, S. 793-798, 2016
- [Namb08] Namba, Y.; Shimomura, T.; Fushiki, A.; Beaucamp, A.; Inasaki, I.; Kunieda, H.; Ogasaka, Y.; Yamashita, K.: Ultra-precision polishing of electroless nickel molding dies for shorter wavelength applications, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57/1, S. 337-340, 2008
- [Nave18] Naveen, K.; Vignesh; Shanbhag, V.; Balashanmugam, N.; Vinod, P.: Ultra-Precision Finishing by Magnetic Abrasive Finishing Process, in *Materials Today: Proceedings* 5, S. 12426-12436, 2018
- [Ntez14] Nteziyaremye, V.; Wang, Y.; Li, W.; Shih, A.; Yamaguchi, H.: Surface Finishing of Needles for High-Performance Biopsy, in *Procedia CIRP* 14, S. 48-53, 2014
- [Okad08] Okada, A.; Uno, Y.; McGeough, J.A.; Fujiwara, K.; Doi, K.; Uemura, K.; Sano, S.: Surface finishing of stainless steels for orthopedic surgical tools by large-area electron beam irradiation, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57/1, S. 223-226, 2008
- [Okad11] Okada, A.; Kitada, R.; Okamoto, Y.; Uno, Y.: Surface modification of cemented carbide by EB polishing, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60/1, S. 575-578, 2011

- [Olik84] Olik, W.E.: Anwendung, Klassifizierung und Tendenz der Entwicklung abrasiver Bearbeitung mit ferromagnetischem Pulver, Kyiv, 1984
- [Olik90] Olik, W.E.: Pulver für die magnetabrasive Bearbeitung und verschleißbeständige Beschichtung, Moskau, Metallurgieverlag, 1990
- [Owen17] Owen, J.D.; Shultz, J.A.; Suleski, T.J.; Davies, M.A.: Error correction methodology for ultra-precision three-axis milling of freeform optics, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 66/1, S. 97-100, 2017
- [Pave17] Pavel, C.C.; Lacal-Arantequi, R.; Marmier, A.; Schüler, D.; Tzimas, E.; Buchert, M.; Jenseit, W.; Blagoeva, D.: Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines, in Resources Policy 52, S. 349-357, 2017
- [Pauc08] Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.; Tikal, F.: Zerspantechnik, Prozesse, Werkzeuge, Technologien, 12. Auflage, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2008
- [Peng18] Peng, C.; Fu, Y.; Wei, H.; Li, S.; Wang, X.; Gao, H.: Study on Improvement of Surface Roughness and Induced Residual Stress for Additively Manufactured Metal Parts by Abrasive Flow Machining, in Procedia CIRP 71, S. 386-389, 2018
- [Pfef14] Pfefferkorn, F.E.; Duffie, N.A.; Morrow, J.D.; Wang, Q.: Ti surface laser polishing: effect of laser path and assist gas, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 63/1, S. 237-240, 2014
- [Piln15] Pilny, L.; Bissacco, G.: Development of on the machine process monitoring and control strategy in Robot Assisted Polishing, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 64/1, S. 313-316, 2015
- [Popo18] Popov, V.; Koptug, A.; Radulov, I.; Maccari, F.; Muller, G.: Prospects of additive manufacturing of rare-earth and non-rare-earth permanent magnets, in Procedia Manufacturing 21, S. 100-108, 2018
- [Rama02] Ramasawmy, H.; Blunt, L.: 3D surface topography assessment of the effect of different electrolytes during electrochemical polishing of EDM surfaces, in International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, S. 567-574, 2002

- [Rose19] Rosemann, B.; Schleicher, A.: Automatisierung der Oberflächenfeinbearbeitung auf CNC-Bearbeitungszentren – Strategieableitung zur Verringerung manueller Nacharbeit, in Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 69. Auslage, Essen, Hoffmeister + Denkena (Hrsg.), S. 256-270, 2019
- [Saku81] Sakulevitch, F.Y.: Grundlagen der magnetabrasiven Bearbeitung, Minsk, Wissenschaft und Forschung Verlag, 1981
- [Saou15] M'Saoubi, R.; Axinte, D.; Soo, S.L.; Nobel, C.; Attia, H.; Kappmeyer, G.; Engin, S.; Sim, W.M.: High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 64/2, S. 557-580, 2015
- [Schm18] Schmidt, M.; Zäh, M.; Li, L.; Duflou, J.; Overmeyer, L.; Vollertsen, F.: Advances in macro-scale laser processing, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 67/2, S. 719-742, 2018
- [Schö20] Schönemann, L.; Berger, D.; Dörgeloh, T.; Riemer, O.; Brinksmeier, E.; Krüger, R.; Schreiber, P.; Denkena, B.; Hochbein, J.; Parsa, N.; Schenck, C.; Kuhfuß, B.: Synergistic approaches to ultra-precision high performance cutting, in CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 28, S. 38-51, 2020
- [Shar21] Sharma, V.K.: Modeling and analysis of a novel rotational magnetorheological abrasive flow finishing process, in International Journal of Lightweight Materials and Manufacture 4, S. 290-301, 2021
- [Shin90] Shinmura, T.; Takazawa, K.; Hatano, E.; Matsunaga, M.: Study on Magnetic Abrasive Finishing, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 39/1, S. 325-328, 1990
- [Shor10] Shore, P.; Cunningham, C.; DeBra, D.; Evans, C.; Hough, J.; Gilmozzi, R.; Kunzmann, H.; Morantz, P.; Tonnellier, X.: Precision engineering for astronomy and gravity science, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 59/2, S. 694-716, 2010

- [Shuk17] Shukla, V.C.; Pandey, P.M.; Dixit, U.S.; Roy, A.; Silberschmidt, V.: Modeling of normal force and finishing torque considering shearing and ploughing effects in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process with sintered magnetic abrasive powder, in *Wear* 390-391, S. 11-22, 2017
- [Sidp11] Sidpara, A.; Jain, V.K.: Experimental investigations into forces during magnetorheological fluid based finishing process, in *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51, S. 358-362, 2011
- [Siha15] Sihag, N.; Kala, P.; Pandey, P.M.: Chemo Assisted Magnetic Abrasive Finishing: Experimental Investigations, in *Procedia CIRP* 26, S. 539-543, 2015
- [Siha17] Sihag, N.; Kala, P.; Pandey, P.M.: Analysis of Surface Finish Improvement during Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing on chemically treated Tungsten substrate, in *Procedia Manufacturing* 10, S. 136-146, 2017
- [Simo18] Simon, T.R.; Cong, L.; Zhai, Y.; Zhu, Y.; Zhao, F.: A semi-automatic system for efficient recovery of rare earth permanent magnets from hard disk drives, in *Procedia CIRP* 69, S. 916-920, 2018
- [Solh18] Solheid, J.S.; Seifert, H.J.; Pfleging, H.: Laser surface modification and polishing of additive manufactured metallic parts, in *Procedia CIRP* 74, S. 280-284, 2018
- [Su18] Su, J.; Yuan, J.; Zhang, S.; Lv, B.: Optimization experiment on eccentric lapping of cylindrical rollers, in *Nanotechnology and Precision Engineering* 1, S. 197-204, 2018
- [Suet18] Suetomi, T.; Kakinuma, Y.; Fukuta, M.; Tanaka, K.: Influence of servo characteristics on crack generation in ultra-precision grinding of optical glass lenses, in *Procedia CIRP* 77, S. 130-133, 2018
- [Sun18] Sun, X.; Zou, Y.: Study on Electrolytic Magnetic Abrasive Finishing for Finishing Stainless Steel SUS304 Plane with a Special Compound Machining Tool, in *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2, S. 41-53, 2018

- [Suya18] Suyang, T.; Yuli, S.; Yuanshuai, L.; Yang, X.; Wenzhuang, L.; Jun, L.; Dunwen, Z.: Study on the influence of ambient temperature on surface/subsurface damage of monocrystalline germanium lapping wafer, in *Procedia CIRP* 71, S. 435-439, 2018
- [Suzu06] Suzuki, H.; Moriwaki, M.; Okino, T.; Ando, Y.: Development of Ultrasonic Vibration Assisted Polishing Machine for Micro Aspheric Die and Mold, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55/1, S. 385-389, 2006
- [Suzu14] Suzuki, H.; Okada, M.; Lin, W.; Morita, S.; Yamagata, Y.; Hanada, H.; Araki, H.; Kashima, S.: Fine finishing of ground DOE lens of synthetic silica by magnetic field-assisted polishing, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63/1, S. 313-316, 2014
- [Swat14] Swat, M.; Brünnet, H.; Lyubenova, N.; Schmitt, J.; Diebels, S.; Bähre, D.: Improved process control and model of axial forces of one-way abrasive flow machining, in *Procedia CIRP* 14, S. 19-24, 2014
- [Temm20] Temmler, A.; Liu, D.; Preußner, J.; Oeser, S.; Luo, J.; Poprawe, R.; Schleifenbaum, J.H.: Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11, in *Materials and Design* 192, 2020
- [Tika09] Tikal, F.: *Schneidkantenpräparation – Ziele, Verfahren und Messmethoden*, Kassel, Unidruckerei der Universität Kassel, S. 53-70, 2009
- [Tren20] Trench, A.; Sykes, J.P.: Rare Earth Permanent Magnets and Their Place in the Future Economy, in *Engineering* 6, S. 115-118, 2020
- [Uhlm14] Uhlmann, E.; Dethlefs, A.; Eulitz, A.: Investigation of material removal and surface topography formation in vibratory finishing, in *Procedia CIRP* 14, S. 25-30, 2014
- [Uhlm18a] Uhlmann, E.; Eulitz, A.: Influence of ceramic media composition on material removal in vibratory finishing, in *Procedia CIRP* 72, S. 1445-1450, 2018
- [Uhlm18b] Uhlmann, E.; Roßkamp, S.: Surface integrity and chip formation in abrasive flow machining, in *Procedia CIRP* 71, S. 446-452, 2018

- [Ukar13] Ukar, E.; Lamikiz, A.; Martinez, S.; Estalayo, F.; Taberbero, I.: Laser polishing of GGG70L cast iron with 2D scan-head, in *Procedia Engineering* 63, S. 53-59, 2013
- [Vahd16] Vahdati, M.; Rasouli, S.A.: Evaluation of Parameters Affecting Magnetic Abrasive Finishing on Concave Freeform Surface of Al Alloy via RSM Method, in *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016
- [Verm17] Verma, G.C.; Kala, P.; Pandey, P.M.: Experimental investigations into internal magnetic abrasive finishing of pipes, in *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88, S. 1657-1668, 2017
- [Want02] Wantuch, E.T.; Lutze, H.G.: Magnetabrasive Bearbeitung, in *ZWF – Neue Fertigungstechnologien* 5, S. 232-237, 2002
- [Wang11] Wang, A.C.; Tsai, L.; Liu, C.H.; Liang, K.Z.; Lee, S.J.: Elucidating the Optimal Parameters in Magnetic Finishing with Gel Abrasive, in *Materials and Manufacturing Processes* 26, S. 786-791, 2011
- [Wang18] Wang, A.C.; Cheng, K.C.; Chen, K.Y.; Lin, Y.C.: A Study on the abrasive gels and the application of abrasive flow machining in complex-hole polishing, in *Procedia CIRP* 68, S. 523-528, 2018
- [Wang19] Wang, K.; Dailami, F.; Matthews, J.: Towards collaborative robotic polishing of mould and die sets, in *Procedia Manufacturing* 38, S. 1499-1507, 2019
- [Wu18] Wu, P.Y.; Yamaguchi, H.: Material Removal Mechanism of Additively Manufactured Components Finished using Magnetic Abrasive Finishing, in *Procedia Manufacturing* 26, S. 394-402, 2018
- [Xing18] Xingjun, W.; Liping, W.; Wei, W.; Linshan, H.: Study on Surface Quality factors of ^{10}B / Al Composite In Ultra - Precision Turning, in *Procedia CIRP* 71, S. 75-78, 2018
- [Yama05] Yamaguchi, H.; Shinmura, T.; Sekine, M.: Uniform Internal Finishing of SUS304 Stainless Steel Bent Tube Using a Magnetic Abrasive Finishing Process, in *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 127, S. 605-611, 2005

- [Yama07] Yamaguchi, H.; Shinmura, T.; Ikeda, R.: Study of Internal Finishing of Austenitic Stainless Steel Capillary Tubes by Magnetic Abrasive Finishing, in *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 129, S. 885-892, 2007
- [Yama11] Yamaguchi, H.; Kang, J.; Hashimoto, F.: Metastable austenitic stainless steel tool for magnetic abrasive finishing, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60/1, S. 339-342, 2011
- [Yama12] Yamaguchi, H.; Srivastava, A.K.; Tan, M.A.; Riveros, R.E.; Hashimoto, F.: Magnetic abrasive finishing of cutting tools for machining of titanium alloys, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61/1, S. 311-314, 2012
- [Yama14a] Yamaguchi, H.; Graziano, A.A.: Surface finishing of cobalt chromium alloy femoral knee components, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63/1, S. 309-312, 2014
- [Yama14b] Yamaguchi, H.; Srivastava, A.K.; Tan, M.; Hashimoto, F.: Magnetic Abrasive Finishing of cutting tools for high-speed machining of titanium alloys, in *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 7, S. 299-304, 2014
- [Yama15] Yamaguchi, H.; Nteziyaremye, V.; Stein, M.; Li, W.: Hybrid tool with both fixed-abrasive and loose-abrasive phases, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64/1, S. 337-340, 2015
- [Yama17] Yamaguchi, H.; Fergani, O.; Wu, P.Y.: Modification using magnetic field-assisted finishing of the surface roughness and residual stress of additively manufactured components, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66/1, S. 305-308, 2017
- [Zhao18] Zhao, F.; Zhou, L.; Fan, Z.; Dai, Z.: Research on Surface Processing of Quartz Wafer Based on Magnetorheological Finishing and Ion Beam Figuring, in *Procedia CIRP* 71, S. 496-499, 2018
- [ZhaX18] Zhang, X.; Li, Z.; Zhang, G.: High performance ultra-precision turning of large-aspect-ratio rectangular freeform optics, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 67/1, S. 543-546, 2018

- [ZhaY18] Zhang, Y.; Fang, F.; Huang, W.; Wang, C.; Fan, W.: Polishing technique for potassium dihydrogen phosphate crystal based on magnetorheological finishing, in Procedia CIRP 71, S. 21-26, 2018
- [Zhih18] Zhihao, F.; Libin, L.; Longfei, C.; Yingchun, G.: Laser Polishing of Additive Manufactured Superalloy, in Procedia CIRP 71, S. 150-154, 2018

Internetquellen

Die Internetquellen wurden herangezogen, um für die Beschreibung des Marktvolumens aktuelle Informationen für die unterschiedlichen Industriezweige berücksichtigen zu können.

- [N.N.20a] N.N.: Webseite von Market Data Forecast: Injection Molding Market Analysis Report, <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/injection-molding-marke>, Zugriff am 23.09.2020
- [N.N.20b] N.N.: Webseite von Statista: Health, Pharma & Medtech, <https://www.statista.com/statistics/646258/global-hip-and-knee-reconstruction-market-value-by-region/>, Zugriff am 13.07.2020
- [N.N.20c] N.N.: Webseite von Market Watch: LED Secondary Optic Market Size, <https://www.marketwatch.com/press-release/led-secondary-optic-market-size-2020-to-2024-by-manufactures-types-applications-regions-and-fore>, Zugriff am 17.09.2020
- [N.N.20d] N.N.: Webseite von Market Data Forecast: Smartphone Camera Lens Market, <https://www.marketwatch.com/press-release/smartphone-camera-lens-market-2020-top-countries-data-market-size-defination-brief-analysis-of-gl>, Zugriff am 17.09.2020
- [N.N.20e] N.N.: Webseite von Bundesministerium für Bildung und Forschung, <https://www.bmbf.de/de/e-elt-das-groesste-auge-der-menschheit-3789.html>, Zugriff am 22.06.2020
- [N.N.20f] N.N.: Webseite von 3M Deutschland GmbH, <https://www.schleifprofi.com/schleifverfahren/laeppen/>, Zugriff am 04.06.2020

- [N.N.20g] N.N.: Webseite von Precifast, <https://www.precifast.de/laeppen/>, Zugriff am 04.06.2020
- [N.N.20h] N.N.: Webseite von Kiffe Engineering GmbH, https://kiffe.net/laeppen/?gclid=EAlaIQobChMI5Izwsejn6QIVSOd3Ch1CTg-KEAAYASAAEqJAJ_D_BwE, Zugriff am 04.06.2020
- [N.N.20i] N.N.: Webseite von Oberflächenbearbeitung, <https://oberflaechenbearbeitung.de/fertigungsverfahren/laeppen/>, Zugriff am 04.06.2020
- [N.N.20j] N.N.: Webseite von FachwissenTechnik, <https://www.fachwissen-technik.de/verfahren/laeppen.html>, Zugriff am 04.06.2020
- [N.N.20k] N.N.: Webseite von OTEC Präzisionsfinish GmbH, <https://www.otec.de/de/produkte/verfahrensmittel/>, Zugriff am 05.06.2020
- [N.N.21a] N.N.: Webseite von VIOPROTO c/o Cast-Solut GmbH, <https://vioproto.de/spritzgusswerkzeug/#>, Zugriff am 29.09.2021
- [N.N.21b] N.N.: Webseite von Market Watch: Aircraft Power Unit Market Size, <https://www.marketwatch.com/press-release/aircraft-auxiliary-power-unit-market-size-in-2021-41-cagr-with-top-countries-data-competitive-landscape-corporate-strategy-share-industry-analysis-by-top-manufactures-growth-insights-and-forecasts-to-2026-2021-08-08>, Zugriff am 29.09.2021

Die Ergebnisse aus den Kapiteln 2.3.1-2.3.3, 4.1, 4.2.1-4.2.7, 4.2.10, 4.3.1-4.3.3, 4.4, 5.5, 6.1, 6.4 und 6.5 wurden zum Teil zuerst in Production Engineering von Springer Nature publiziert:

Zelinko, A.; Welzel, F.; Biermann, D.; Maiboroda, V.: Tool type and macrostructure for magnetic abrasive finishing of flat surfaces on CNC machine tools. Production Engineering, 2022

Bisher erschienene Bände in der Schriftenreihe des ISF

- Band H3 Surmann, T.: *Simulation der Dynamik von Dreh- und Fräsprozessen*. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8794-2
- Band H2 Zabel, A.: *Prozesssimulation in der Zerspanung – Modellierung von Dreh- und Fräsprozessen*. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8752-2
- Band H1 Mehnen, J.: *Mehrkriterielle Optimierverfahren für produktionstechnische Prozesse*. Habilitationsschrift, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 978-3-8027-8760-9
- Band 106 Bücken, M.: *Neue Methoden zur Entwicklung und Herstellung von Hochleistungswerkzeugen für die Bohrbearbeitung von Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2021, ISBN 978-3-8027-8922-9
- Band 105 Jaeger, J.-P.: *Wendeltiefbohren kleinster Durchmesser in schwer zerspanbare Werkstoffe mit kryogener Minimalmengenschmierung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2021, ISBN: 978-3-8027-8921-2
- Band 104 Bathe, T.: *Untersuchungen zur Topographie- und Umfangsgestaltoptimierung von Einlippentiefbohrwerkzeugen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2020, ISBN: 978-3-8027-8920-5 , dx.doi.org/10.17877/DE290R-21668
- Band 103 Hannich, S.: *Experimentelle und simulative Untersuchungen zum stirnseitigen Fließbohren von Leichtbauwerkstoffen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019
- Band 102 Kansteiner, M.: *Grundlagenuntersuchungen zum Einsatzverhalten von diamantprägnierten Werkzeugen beim Kernbohren von hochfestem Beton*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8918-2 , <http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-20351>

- Band 101 Fuß, M.: *Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von tiefen nicht kreisförmigen Bohrungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8917-5
- Band 100 Metzger, M.: *Innenkonturieren und Walzen tiefgebohrter Grundbohrungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8916-8
- Band 99 Aßmuth, R.: *Schneidkantenpräparation durch Druckluft-Nassstrahlspanen mit Industrierobotern*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8915-1
- Band 98 Wolf, M.: *Abstimmung der Präparationsprozesse in der Herstellungskette von PVD-beschichteten Vollhartmetall-Wendelbohrern*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8913-7
- Band 97 Freiburg, D.: *Hochvorschubfräsen zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen für die Blechmassivumformung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3802789120
- Band 96 Tiffe, M.: *Charakterisierung grundlegender Mechanismen für die Simulation der Spanbildung mithilfe der FEM*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8911-3
- Band 95 Schumann, S.: *Mehrskalige Modellierung und Simulation des Hochleistungs-Innenrundschälenschleifens*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8914-4 , <http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-20295>
- Band 94 Böhmer, J. C.: *Untersuchung und Simulation des Randschichtverhaltens inhomogener Spritzschichtstrukturen beim Honen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN: 978-3-8027-8799-7
- Band 93 Hense, R.: *Simulation und Optimierung der Fräsbearbeitung von Verdichterschaukeln*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8798-0

- Band 92 Krebs, E.: *Simulationsgestützte Mikrofräsbearbeitung gehärteter Werkzeugstähle zur Herstellung filigraner Formelement und funktionaler Oberflächenstrukturen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8797-3
- Band 91 Habermeier, J.: *Technologische Untersuchungen der Bearbeitung nickelreduzierter Stahlgusslegierungen für Turbinengehäuse*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8796-6
- Band 90 Liu, Y.: *Technologische Untersuchungen zum flexiblen Einsatz des Fließbohrens*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8795-9
- Band 89 Özkaya, E.: *FEM-based software system for the efficient 3D tapping simulation and tool optimization using CFD simulation*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8793-5
- Band 88 Abrahams, H.: *Untersuchungen zum Führungsleistenverschleiß und zur Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren austenitischer Stähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8792-8
- Band 87 Kirschner, M.: *Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmessern*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8791-1
- Band 86 Goeke, S.: *Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Mikrofinishen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8790-4
- Band 85 Iovkov, I.: *Technologische Analyse des Tiefbohrens mit Minimalmengenschmierung und simulationsbasierte Kompensation des Mittenverlaufs*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8787-4
- Band 84 Rautert, C.: *Untersuchungen zum Bohrschleifen faserverstärkter Werkstoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8789-8

- Band 83 Hartmann, H.: *Analyse der Außenlängsdreh- und Einlippentiefbohrbearbeitung hochfester bainitischer und vergüteter Stähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8788-1
- Band 82 Rausch, S.: *Modellgestützte Endbearbeitung hartstoffbeschichteter Tiefziehwerkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8785-0
- Band 81 Beer, N.: *Systematische Untersuchung von Vollhartmetall-Wendelbohrern zum Bearbeiten von Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8784-3
- Band 79 Steiner, M.: *Grundlagenuntersuchungen zur Mikrofräsbearbeitung des austenitischen Edelstahl X5CrNi18-10*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8783-6
- Band 78 Bleckmann, T.: *Simulationsbasierte Auslegung von Fräsprozessen für die Großserienfertigung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8781-2
- Band 77 Heymann, T.: *Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8778-2
- Band 76 Ungemach, E.: *Simulationsbasierte Adaption von NC-Fräsprogrammen zur Vermeidung von Ratterschwingungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8780-5
- Band 75 Upmeier, T.: *Einlippentiefbohren teilkristalliner thermoplastischer Kunststoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8782-9
- Band 74 Peuker, A.: *Werkzeugentwicklung für die Transplantation thermisch gespritzter mikrostrukturierter Funktionsschichten auf Druckgusswerkstücke*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8779-9

- Band 73 Schlenker, J.: *Spanende Mikrobearbeitung von Titan und Titanlegierungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8777-5
- Band 72 Zhang, L. J.: *Untersuchungen zum Drehen und Bohren der Nickelbasislegierung Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2014, ISBN 978-3-8027-8776-8
- Band 71 Wagner, T.: *Planning and Multi-Objective Optimization of Manufacturing Processes by Means of Empirical Surrogate Models*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8775-1
- Band 70 Sacharow, A.: *Kompensation von Formabweichungen durch adaptive Freiformdeformation der CAD/CAM-Daten*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8774-4
- Band 69 Baschin, A.: *Analyse und Simulation der Prozessdynamik und -stabilität beim NC-Mikrofräsen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8773-7
- Band 68 Feldhoff, M.: *Modellgestützte Werkzeug- und Prozessentwicklung des Bohrschleifens faserverstärkter Duromere*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8771-3
- Band 67 Machai, C.: *Grundlagenuntersuchung zur Zerspanung von β -Titanlegierungen unterschiedlicher Mikrostruktur*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8772-0
- Band 66 Heilmann, M.: *Tiefbohren mit kleinen Durchmessern durch mechanische und thermische Verfahren – Prozessgestaltung und Verfahrenskombination*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8770-6
- Band 65 Scheidler, A. V.: *Simulation des NC-Formschleifprozesses mit unterschiedlichen CBN-Schleifscheibenformen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8768-3

- Band 64 Pantke, K.: *Entwicklung und Einsatz eines temperatursensorischen Beschichtungssystems für Zerspanwerkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8769-0
- Band 63 Terwey, I.: *Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8766-9
- Band 62 Würz, E.: *Schleifbearbeitung von Keramik-Hartmetall-Verbunden*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8767-6
- Band 61 Engbert, T.: *Fließbohrbearbeitung und Innengewindefertigung an Leichtbaustrukturen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8764-5
- Band 60 Felderhoff, J. F.: *Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8765-2
- Band 59 Kessler, N.: *Thermische Mittenverlaufsbeeinflussung beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8763-8
- Band 58 Paffrath, K.-U.: *Untersuchungen zum kraftgeregelten Langhubhonen auf multifunktionalen Bearbeitungszentren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8762-1
- Band 57 Faraz, A.: *Experimental Study on Delamination, Mechanical Loads and Tool Wear in Drilling of Woven Composite Laminates*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8761-4
- Band 56 Hossam, M.: *Chatter Occurrence at Different Natural Frequencies of Milling Machine Axes*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8759-1

- Band 55 Kersting, P.: *Simulation und Analyse regenerativer Werkstückschwingungen bei der NC-Fräsbearbeitung von Freiformflächen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8757-7
- Band 54 Marschalkowski, K.: *Beitrag zur Prozessentwicklung für das Hochleistungsinnenrund-Schälschleifen mit galvanisch gebundenen CBN-Schleifscheiben*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8758-4
- Band 53 Weckerle, T.: *Konzeption und Entwicklung einer standardisierten Datenübertragung von Schleifoperationen für Werkzeugschleifmaschinen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8756-0
- Band 52 Kahleyß, F.: *Grundlagenuntersuchungen und simulationsbasierte Optimierung zur fünffachsigen Mikrofräsbearbeitung von NiTi-Formgedächtnislegierungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8753-9
- Band 51 Mohn, T.: *Schleifen thermisch gespritzter Verschleißschutzschichten auf Bearbeitungszentren – Prozessgestaltung und Simulation*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8751-5
- Band 49 Rautenberg, J.: *Simultane fünffachsige Fräsbearbeitung von Aluminiumstrukturbauteilen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8754-6
- Band 48 Enk, D.: *Untersuchungen zum dynamischen Stabilitätsverhalten von Fräsworkzeugen zur HSC-Bearbeitung*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8748-5
- Band 47 Kersting, M.: *Entwicklung und Anwendung eines adaptiven Schwingungsdämpfers für das Einlippentiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8749-2
- Band 46 Bergmann, S.: *Beitrag zur Zerspanung intermetallischer γ -Titanaluminide durch Bohren, Gewindebohren und Fräsen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8746-1

- Band 45 Kahnis, P.: *Analyse von Größeneinflüssen bei einer Herabskalierung des Fräsprozesses in den Mikrobereich*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8745-4
- Band 44 Noyen, M.: *Analyse der mechanischen Belastungsverteilung in der Kontaktzone beim Längs-Umfangs-Planschleifen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8744-7
- Band 43 Jansen, T.: *Entwicklung einer Simulation für den NC-Formschleifprozess mit Torusschleifscheiben*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8743-0
- Band 42 Hammer, N.: *Spanende Bearbeitung endlos stahlverstärkter Aluminiummatrixstrangpressprofile*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8742-3
- Band 41 Kress, J.: *Auswahl und Einsatz von polykristallinem kubischem Bornitrid beim Drehen, Fräsen und Reiben*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8741-6
- Band 40 Wittkop, S.: *Einlippentiefbohren nichtrostender Stähle*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8740-9
- Band 39 Webber, O.: *Untersuchungen zur bohrtiefenabhängigen Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8739-3
- Band 38 Zhang, L.: *Accuracy Enhancement of a Hexapod Machine Tool*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8738-6
- Band 37 Petzoldt, V.: *Formgedächtnistechnik – Tiefbohren und Mikrofräsen von Ni-Ti*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8737-4, 978-3-8027-8737-9
- Band 36 Kötter, D.: *Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8736-6, 978-3-8027-8736-2

- Band 35 Hesterberg, S.: *Trockenbearbeitung nichtrostender Stähle – Prozessgestaltung für das Drehen und Bohren mit Wendeschneidplatten*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8735-8, 978-3-8027-8735-5
- Band 34 Damm, P.: *Rechnergestützte Optimierung des 5-Achsen-Simultanfräsens von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8734-X, 978-3-8027-8734-8
- Band 33 Surmann, T.: *Geometrisch-physikalische Simulation der Prozessdynamik für das fünfachsiges Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8733-1, 978-3-8027-8733-1
- Band 32 Stautner, M.: *Simulation und Optimierung der mehrachsigen Fräsbearbeitung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8732-3, 978-3-8027-8732-4
- Band 31 Peters, C.: *Herstellung und Einsatzverhalten von Keramik-Hartmetall-Verbundbohrwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8731-5, ISBN 978-3-8027-8731-7
- Band 30 Hagedorn, M.: *Herstellung von Verbundbauteilen durch Einwalzen – Verfahrensentwicklung und experimentelle Grundlagen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8730-7, ISBN 978-3-8027-8730-0
- Band 29 Kalveram, M.: *Analyse und Vorhersage der Prozessdynamik und Prozessstabilität beim Hochgeschwindigkeitsfräsen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 3-8027-8729-3, 978-3-8027-8729-4
- Band 28 Koehler, W.: *Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8728-5
- Band 27 Loichinger, A.: *Analyse und Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung rotierender Werkzeuge*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9

- Band 26 Du, S.: *Simulation and Tool Path Optimization for the Hexapod Milling Machine*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9
- Band 25 Schulte, M.: *Profilschleifen von Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffen mit konventionellen Schleifmitteln*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8725-0
- Band 24 Lange, M.: *Prozessgestaltung bei der spanenden Bearbeitung von kurzfaserverstärkten Magnesiumlegierungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8724-2
- Band 23 Guntermann, G.: *Aspekte des Hochgeschwindigkeits-Hartfräsens im Werkzeugund Formenbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8723-4
- Band 22 Johlen, G.: *Prozessoptimierung für die Hartfeinbearbeitung durch die Kombination von Hartdrehen und Schleifen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8722-6
- Band 21 Schwietering, C.: *Technologische Aspekte der mikromechanischen Fräsbearbeitung mit Schaftwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8721-8
- Band 20 Zabel, A.: *Simulationsgestützte Vorhersage des Verschleißverhaltens von Fräsworkzeugen beim Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8720-x
- Band 19 Opalla, D.: *Hochleistungsbohren metallischer Werkstoffe mit Wendelbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8716-1
- Band 18 Löbbe, H.: *Tiefbohren auf Bearbeitungszentren*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8718-8
- Band 17 Finke, M.: *Untersuchungen zur Auslegung und Optimierung des Innenrund-Längsschleifens von Futterteilen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8717-X

- Band 16 Liedschulte, M.: *Untersuchungen zum Bohren von Magnesiummatrix-Verbundwerkstoffen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8719-6
- Band 15 Buschka, M.: *Formgedächtnistechnik – Prozessgestaltung beim Drehen und Bohren von NiTi-Formgedächtnislegierungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2002, ISBN 3-8027-8715-3
- Band 14 Meng, J.: *Freiformflächenmanipulation für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8714-5
- Band 13 Bruchhaus, T.: *Tribologische Untersuchungen zur Optimierung von BTA-Tiefbohrwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8713-7
- Band 12 Mehnen, J.: *Evolutionäre Flächenrekonstruktion*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8712-9
- Band 11 Schulte, K.: *Stahlbearbeitung mit Wendeschneidplatten-Bohrern bei reduziertem Kühlschmierstoffeinsatz*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8710-2
- Band 10 Schroer, M.: *Reiben von Vergütungsstahl mit Einschneiden-Reibahlen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8711-0
- Band 9 Schneider, M.: *Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8708-0
- Band 8 Albersmann, F.: *Simulationsgestützte Prozessoptimierungen für die HSC-Fräsbearbeitung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8709-9
- Band 7 Mumm, A.: *Analyse und Gestaltung von Werkzeugversorgungssystemen in der spanenden Fertigung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8705-6

- Band 6 Gillmeister, F.: *Passive und aktive sekundäre Maßnahmen zur Reduzierung der Hand-Arm-Schwingungsbelastung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8706-4
- Band 5 Thamke, D.: *Technologische und ökonomische Aspekte der Trocken- und Minimalmengenbearbeitung am Beispiel des Einlippentiefbohrens*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN: 3-8027-8707-2
- Band 4 Enselmann, A.: *HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8703-X
- Band 3 Willsch, C.: *Außenrund-Einsteichschleifen von Cermet*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1998, ISBN 3-8027-8702-1
- Band 2 Friedhoff, J.: *Aufbereitung von 3D-Digitalisierdaten für den Werkzeug-, Formen und Modellbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1997, ISBN 3-8027-8701-3
- Band 1 Adams, F.-J.: *Einsatzverhalten von symmetrischen, hartmetallbestückten Kurzlochbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1996, ISBN 3-8027-8700-5