

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Christoph Ruhs

**Automatisierte Prozessabfolge zur
qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten
mittels Mikrobahnerosion**

Band 172

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Christoph Ruhs
aus Lörrach

Tag der mündlichen Prüfung: 22.02.2013
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Korreferent: Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, in dem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

An erster Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze für die Übernahme des Hauptreferats bedanken. Während meiner Zeit am wbk hat er durch seine Anregungen maßgebliche Impulse für das Gelingen meiner Untersuchungen gegeben. Zudem bedanke ich mich für die Förderung und das mir entgegengebrachte Vertrauen, das entscheidend zu meiner beruflichen Entwicklung beigetragen hat.

Herrn Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann danke ich für die Übernahme des Korreferats, das entgegengebrachte Interesse und die fachkundige Durchsicht meiner Arbeit.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei allen Mitarbeitern des wbk. Die hervorragende Arbeitsatmosphäre und Kollegialität habe ich immer zu schätzen gewusst. Ganz besonders danke ich Herrn Rolf Philipps für die gemeinsame Zeit an den Erodiermaschinen. Neben dem wissenschaftlichen Arbeiten habe ich auch immer die teilweise fachfremden Diskussionen innerhalb der FWT bei diversen gemeinsamen Mittagessen und Kuchenterminen genossen.

Mein Dank gilt zudem den zahlreichen Studien- und Diplomarbeitern sowie wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich während meiner Zeit am wbk unterstützt haben. Ohne sie wäre mir das Anfertigen der vorliegenden Arbeit nicht möglich gewesen.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern Johanna Ruhs und Dr. Alexander Ruhs, die mir immer jede erdenkliche Unterstützung und familiären Rückhalt zukommen ließen.

Mein größter Dank gilt meiner lieben Frau Katharina und meiner Tochter Lea. Sie haben mich durch den steinigen Weg des Promotionsprozesses begleitet. Sie richteten mich auf, wenn ich auf dem Boden lag und holten mich auf den Boden der Tatsachen zurück, wenn es nötig war. Aus diesem Grund widme ich ihnen diese Arbeit.

Rastatt, im März 2013

Christoph Ruhs

Abstract

During the last decades Microsystem Technology has established itself as a technology needed by many different industrial sectors. Due to further development of the functionality of products and the increase of products power density the demand for suitable manufacturing techniques for the mass production of mechanical micro parts grows. For this application commonly forming processes are used to realize a high out-put at a low unit cost. For this kind of technologies, like powder injection moulding or micro moulding, high quality micro moulds made of wear resistant materials are needed. Micro Electrical Discharge Machining (micro EDM) is an established manufacturing process because, based on the thermal material removal mechanism, a high level of accuracy during the machining of hard materials can be reached. The most flexible process variant of the micro EDM process is micro EDM-milling because when using this technique the geometry of a cavity is defined by a NC-Code. Therefore there is no need for the manufacturing of form electrodes.

The efficiency of a production process when using micro EDM-milling is mainly influenced by the workload of preparation activities and the quality insurance after the actual manufacturing procedure. So the main goal is to manufacture a good part by the first attempt.

Along the whole approach for the manufacturing of micro cavities the biggest challenges are the time-consuming investigation of the process parameters for the erosion process and the infeed of the electrode as well as the correct compensation of the electrode wear. For the wear compensation many different controllers have been developed and tested. But until now, there is no concept which guarantees a reliable manufacturing process, so a separate quality control is needed afterwards.

In this work an automated process sequence for the manufacturing of micro cavities using micro EDM-milling is developed, based on the described challenges. Starting with the development of an automated parameter search using DOE-methods and a non-linear regression, the infeed and the lateral feed rate of the tool electrode were optimized for the manufacturing of 2,5D-cavities to guarantee high accuracy and low surface roughness on sloping walls. The last step of the developed sequence is a process control for the micro EDM-milling process. After the manufacturing process the work piece is measured by a confocal white-light sensor directly on the EDM-machine and can be reworked automatically without unclamping. This iterative procedure provides a reliable manufacturing of micro moulds with strict tolerances at the first attempt.

Kurzfassung

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Mikrosystemtechnik als eine branchenübergreifende Technologie etabliert. Bedingt durch die Weiterentwicklung von Produkten aus unterschiedlichsten Bereichen und die kontinuierliche Erhöhung ihrer Leistungsdichte steigt der Bedarf an massentauglichen Produktionstechnologien für die Herstellung von kleinsten mechanischen Bauteilen. Um diesem Trend gerecht zu werden, bieten sich vorwiegend urformende Verfahren an, mit denen eine hohe Ausbringung bei geringen Stückkosten erreicht werden kann. Für diese Technologien, wie das Pulverspritzgießen oder der Mikroguss, ist es erforderlich Mikroformwerkzeuge in hoher Güte und aus verschleißfesten Materialien herzustellen. Die Mikrofunktenerosion ist dafür ein etabliertes Verfahren, da hier, bedingt durch den thermischen Abtragsprozess, Kavitäten mit kleinen Toleranzen in harte Materialien eingebracht werden können. Die flexibelste Prozessvariante ist die Mikrobahnerosion, da hier die Geometrie mittels eines NC-Codes erzeugt wird und damit keine Formelektrodenherstellung erforderlich ist.

Die Effizienz einer Formeinsatzfertigung mittels Mikrobahnerosion ist maßgeblich durch den Umfang arbeitsvorbereitender Maßnahmen und die Sicherstellung der Qualität bestimmt. Die Zielsetzung dabei ist, bei dem ersten Fertigungsanlauf ein Gutteil im geforderten Toleranzbereich und mit hinreichender Oberflächengüte zu erzeugen.

Bei dem gesamten Prozess der Formerstellung sind die größten Herausforderungen die meist aufwändige Erarbeitung der Erosionsparameter und der kinematischen Größen sowie die korrekte Kompensation des Elektrodenverschleißes. Für letztere Aufgabe wurden bereits verschiedene Reglerkonzepte entwickelt und im mikrobahnerosiven Prozess eingesetzt, jedoch ist durch keinen eine nachweislich prozesssichere Fertigung möglich und damit eine anschließende Qualitätssicherung erforderlich.

Aufbauend auf den beschriebenen Herausforderungen wurde innerhalb dieser Arbeit eine automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion entwickelt. Ausgehend von einer automatisiert ablaufenden Parametersuche geeigneter Prozessgrößen basierend auf DOE-Methoden und einer nichtlinearen Regression wurden optimierte kinematische Parameter für die Fertigung von schrägen Wänden in 2,5D-Kavitäten erarbeitet, um eine hohe und homogene Oberflächengüte an den Wänden einer Kavität zu erzeugen. Der letzte Schritt der entwickelten Vorgehensweise stellt eine prozessübergreifende Abtragsregelung dar. Bei diesem abschließenden Schritt wird das Fertigungsergebnis direkt an der Mikrofunktenerosionsmaschine mit einem nach dem konfokalen Prinzip arbeitenden Sensor gemessen und automatisiert eine Nachbearbeitung bei derselben Einspannung des Werkstücks eingeleitet. Durch diese iterativ stattfindende Qualitätskontrolle direkt an der Werkzeugmaschine kann das Einhalten engster Toleranzfelder und damit eine prozesssichere Herstellung von Kavitäten gewährleistet werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
Formelzeichen	V
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Kenntnisstand	4
2.1 Mikrofunkenerosion	4
2.2 Ausgewählte Prozessvarianten	8
2.2.1 Mikrosenkerosion	8
2.2.2 Mikrobahnerosion	10
2.3 Zusammenfassung und Fazit	20
3 Versuchsstand und Methodik	22
3.1 Elektrodenmaterial und Dielektrikum	22
3.1.1 Werkzeugelektrode	22
3.1.2 Werkstückelektrode	22
3.1.3 Dielektrikum	23
3.2 Probenherstellung	23
3.2.1 Mikrofunkenerodiermaschine	23
3.2.2 Integrierter konfokaler Weißlichtsensor	26
3.2.3 Erfassung der Erosionsparameter	29
3.3 Probenbewertung	29
3.3.1 Lichtmikroskopische Messungen	29
3.3.2 Konfokale Weißlichtmikroskopie	30
3.3.3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen	30
3.4 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung	30
3.4.1 Auswahl der geeigneten DOE-Methode	31
3.4.2 Zentral zusammengesetzter Versuchsplan	33
3.5 Nichtlineare Regression	36

4	Automatisierte Parametersuche	37
4.1	Auswahl der zu beurteilenden Ergebnisgröße	38
4.2	Auswahl der betrachteten Prozessparameter	38
4.3	Definition einer Testgeometrie	41
4.4	Implementierung einer automatisierten Parametersuche	42
4.4.1	Vorgehensweise bei der Parametersuche	43
4.4.2	Mathematische Auswertung der Messergebnisse	47
4.5	Validierung	49
4.6	Fazit	52
5	Optimierte Zustellwerte für die Bearbeitung von 2,5D-Kavitäten	53
5.1	Versuchsdurchführung	54
5.1.1	Probengeometrie und -herstellung	54
5.1.2	Korrekturfaktor für die Verschleißkompensation	55
5.1.3	Messdatenerfassung und -auswertung	55
5.2	Schrubbearbeitung von schrägen Wänden	56
5.2.1	Einfluss auf die Oberflächenrauheit	57
5.2.2	Einfluss auf den Kantenradius der Werkzeugelektrode	59
5.2.3	Einfluss der Zustellung auf den Wandwinkel	61
5.3	Schlichtbearbeitung von schrägen Wänden	61
5.3.1	Einfluss auf die Oberflächenrauheit	62
5.3.2	Einfluss auf den Kantenradius der Werkzeugelektrode	64
5.3.3	Einfluss der Zustellung auf den Wandwinkel	66
5.4	Feinschlichtbearbeitung von schrägen Wänden	66
5.4.1	Einfluss auf die Oberflächenrauheit	67
5.4.2	Einfluss auf den Kantenradius der Werkzeugelektrode	69
5.4.3	Einfluss der Zustellung auf den Wandwinkel	70
5.5	Regressionsfunktionen	71
5.6	Validierung an einer sphärischen Geometrie	72
5.7	Optimierte Vorschubgeschwindigkeiten	74
5.7.1	Schruppen	76
5.7.2	Schlichten	78
5.8	Fazit	79

6	Prozessübergreifende Abtragsregelung	82
6.1	Kategorisierung der Geometrieabweichungen	83
6.1.1	Abweichung von der Solltiefe	83
6.1.2	Fehlerhafte Oberflächenausprägung	84
6.2	Definition von Testkavitäten	87
6.3	Vorgehensweise bei der Abtragsregelung	88
6.3.1	Messung und Weiterbearbeitung der gefertigten Tiefe	91
6.3.2	Messung und Weiterbearbeitung fehlerhafter Oberflächenausprägungen	93
6.4	Implementierung einer NC-Code-basierten Abtragsregelung	95
6.4.1	Modul 1: Regelungseinstellungen	95
6.4.2	Modul 2: Datenauswertung Tiefe	98
6.4.3	Modul 3: Datenauswertung Oberfläche	99
6.4.4	Modul 4: Weiterbearbeitungsprogramme	100
6.4.5	Ablauf der Abtragsregelung	101
6.5	Validierung der Abtragsregelung	103
6.5.1	Validierung an einer 2,5D-Testgeometrie	103
6.5.2	Validierung an einer sphärischen Geometrie	106
6.6	Fazit	109
7	Zusammenfassung und Ausblick	110
7.1	Zusammenfassung	110
7.2	Ausblick	112
	Literaturverzeichnis	I

Abkürzungen

Kurzzeichen	Begriff
2,5D	2,5-dimensional
3D	dreidimensional
BDD	Buffered Digital Differential
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAS	Computer Algebra System
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNC	Computer Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOE	Design Of Experiment
ECM	Electro Chemical Machining
EDM	Electrical Discharge Machining
FK	Faktorkombination
FWW	Faktorwechselwirkung
fsolve	Mathematischer Ansatz mittels „floating-point arithmetic“
HM	Hartmetall
HV	Härte nach Vickers
NWA	Nutzwertanalyse
nD	numerical Differential
REM	Rasterelektronenmikroskop
VSS	Variable Structure System
WEDG	Wire Electrical Discharge Grinding
WS	Werkstück
WZ	Werkzeug

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
$\pm a$	Extremstellen der Faktoren im Sternpunkt	[-]
a_p	Zustelltiefe der Werkzeugelektrode (in Anlehnung an die Zerspanung)	[μm]
$a_{p,cal}$	Berechnete Zustelltiefe der Werkzeugelektrode	[μm]
B	Breite einer Kavität	[μm]
C	Kapazität des Relaxationsgenerators	[F]
D	Durchmesser	[μm]
D_n	Durchmesser der Düsenöffnung	[mm]
f	Freiheitsgrad	[-]
f_a	Abtastfrequenz	[Hz]
f_e	Entladefrequenz	[Hz]
f_o	Ortsfrequenz	[Hz]
f_p	Pulsfrequenz	[Hz]
I	Maschinenparameter für den Entladestrom	[-]
i_e	Entladestrom	[A]
k	Anzahl der Faktoren	[-]
L	Länge einer Kavität	[μm]
L_A	Induktivität im Aufladekreis	[H]
L_e	Induktivität im Entladekreis	[H]
L_F	Größe des Funkenspalts	[μm]
L_{krit}	Kritische Länge des abgeschatteten Bereichs	[μm]
L_s	Messstrecke	[mm]
L_z	Induktivität in der Zuleitung	[H]
MRR	Abtragsrate	[mm^3/min]
p_b	Luftdruck zum Abblasen einer Kavität	[bar]

R_A	Widerstand im Aufladekreis	[Ω]
R_a	Mittelwert des arithmetischen Mittenrauwerts	[μm]
R_a	Arithmetischer Mittenrauwert	[μm]
$R_{a_{\min}}$	Kleinster Arithmetischer Mittenrauwert	[μm]
R_e	Widerstand im Entladekreis	[Ω]
R_m	Zugfestigkeit	[MPa]
r	Radius	[mm]
r_k	Kantenradius	[μm]
T	Tiefe der Kavität	[μm]
T_1-T_5	Tiefensegmente einer sphärischen Testkavität	[mm]
T_{ist}	Gemessene Isttiefe	[μm]
T_s	Segmenttiefe	[mm]
T_{soll}	Solltiefe	[μm]
t_0	Pausendauer	[s]
t_b	Zeit zum Abblasen einer Kavität	[s]
t_d	Zündverzögerung	[s]
t_e	Entladedauer	[s]
t_i	Impulsdauer	[s]
t_p	Periodendauer	[s]
u_0	Leerlaufspannung	[V]
u_C	Kondensatorspannung	[V]
u_D	Durchbruchspannung	[V]
u_e	Entladespannung	[V]
v_f	Laterale Vorschubgeschwindigkeit der Werkzeugelektrode	[mm/s]
W_e	Entladeenergie	[J]
W_t	Welligkeitsprofil	[μm]
x_n	Faktoren des Modells	[-]

y	Zielgröße des Modells	[-]
α	Wandwinkel	[°]
α_{mess}	Gemessener Wandwinkel	[°]
β_k	Koeffizienten zur Beschreibung linearer Effekte	[-]
$\bar{\beta}_k$	Mittelwert der Koeffizienten	[-]
β_{kk}	Koeffizienten zur Beschreibung quadratischer Effekte	[-]
ΔMRR	Unterschied der Abtragsrate	[mm ³ /min]
ΔRa	Unterschied gemittelter arithmetischer Mittenrauwerte	[μm]
Δr_k	Unterschied der Kantenverrundung an der Werkzeugelektrode	[μm]
ΔT	Tiefenabweichung	[μm]
Δz	Messunsicherheit des konfokalen Sensors	[nm]
$\Delta\alpha$	Abweichung vom Wandwinkel	[°]
λ	Wellenlänge	[nm]
λ_{min}	Minimale Grenzwellenlänge	[nm]
λ_{max}	Maximale Grenzwellenlänge	[nm]
ρ	Reflexionsgrad	[%]
φ	Winkel der Anströmung zum Werkstück	[°]

1 Einleitung und Zielsetzung

Heutzutage müssen sich Industrieunternehmen extremen wirtschaftlichen und finanzpolitischen Herausforderungen stellen, um dem international stattfindenden Wissenswettbewerb gerecht zu werden [Bun-10]. Aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung, zukunftssträchtige Technologien zu identifizieren und diese durch innovative Ideen mitzugestalten. Laut Expertenmeinungen wird dabei die Mikrosystemtechnik als eine der Schlüsseltechnologien bis zum Jahr 2020 angesehen [Bun-10]. Schon heute werden mikromechanische Systeme in den Kernbranchen der Hightech-Strategie mit den Hauptfeldern Medizin, Gesundheit, Kommunikation, Produktion und Mobilität vielseitig verwendet [Dic-09, Gub-08], da der derzeitige Käufermarkt nach immer kleineren Produkten und einer höheren Funktionsdichte der Systeme verlangt. Gleichzeitig weist die Mikrosystemtechnik einen Querschnittscharakter nicht nur zwischen unterschiedlichen Branchen, sondern auch zu anderen Technologiefeldern, wie der Nanotechnik, auf [Heß-08]. Die benötigte Produktionstechnik ist dabei eng mit dem eigentlichen Produkt verzahnt, da der Entwicklungsprozess von mikromechanischen Produkten stark technologiegetrieben abläuft und somit einem Bottom-Up-Prozess folgt [Dic-09]. Durch diese Herangehensweise ist es erforderlich, die bestehenden Herstellungstechnologien zu optimieren und durch eine weiterentwickelte Maschinenteknik neue Möglichkeiten für die Produktion immer kleinerer und komplexerer Mikrosysteme zu schaffen [Cuh-09]. So stellen optimierte oder gänzlich neue Produktionsprozesse die Basis für die voranschreitende Miniaturisierung dar [Eld-04].

Um aktuelle und auch zukünftige Absatzmärkte bedienen zu können und den internationalen Herausforderungen gerecht zu werden, muss die wirtschaftliche Herstellung von Produkten mit Strukturdetails im Mikrometerbereich gewährleistet werden. Dabei ist es wichtig, ein komplettes Verständnis der gesamten Prozesskette der Produktion aufzubauen. Es müssen sämtliche Prozessschritte und dazwischen liegende Schnittstellen definiert und verstanden sein, damit darauf aufbauend eine prozesssichere Fertigung von Mikrosystemen abgeleitet werden kann. Da bei großen Stückzahlen die Primärstrukturierung unwirtschaftlich ist, kommen bei der Massenproduktion von Mikrobauteilen häufig urformende Verfahren wie das Pulverspritzgießen oder der Mikroguss zum Einsatz.

Bei dieser Prozesskette stellt die Formeinsatzherstellung den Ausgangspunkt der Produktion dar. Eine präzise Strukturierung des Formeinsatzes legt den Grundstein für die Maßhaltigkeit der mit ihm erzeugten Bauteile. Zur Produktion

von großen Stückzahlen sind die Härte und damit die Verschleißfestigkeit des Formeinsatzmaterials von besonderer Wichtigkeit, um einen frühzeitigen verschleißbedingten Ausfall der Kavität zu vermeiden.

Die Mikrofunkenerosion ist für diesen Anwendungsfall eine prädestinierte Fertigungstechnologie, da hier der Materialabtrag nicht von den mechanischen Eigenschaften des Werkstückwerkstoffs beeinflusst wird [Mas-00, Mic-00, Sch-09]. Dabei ist die Mikrobahnerosion eine besonders flexible Verfahrensvariante der Funkenerosion, bei der die Geometrie der Kavität durch eine zylinderförmige Werkzeugelektrode in Kombination mit einem NC-Code erzeugt wird [Yas-10, Sch-08]. Dies hat den Vorteil, dass keine aufwändige Werkzeugelektrodenstrukturierung im Vorfeld des eigentlichen Herstellungsprozesses erfolgen muss.

Da bei der Mikrobahnerosion das Prozessergebnis unmittelbar durch die korrekte Wahl der Prozessparameter bestimmt wird, ist es von zentraler Bedeutung, optimale Erosionsparameter für die abschließende Feinschlichtbearbeitung bei jeder möglichen Materialkombination von Werkzeugelektrode und Werkstück bereit zu stellen. Liegen diese nicht vor, so ist es von Vorteil, eine Methode zu besitzen, um geeignete Feinschlichtparameter für den abschließenden Bearbeitungsschritt effizient zu erarbeiten und so eine gute Oberflächenqualität am Bauteil zu erzielen. Durch diese Vorgehensweise kann der Aufwand für nicht wertschöpfende Prozesse minimiert werden. Diese fallen bei der Formeinsatzherstellung besonders ins Gewicht, da es sich hier meist um die Herstellung von genau einem Gutteil handelt. Andernfalls kann die Arbeitsvorbereitung den Aufwand der eigentlichen Bauteilfertigung schnell übersteigen.

Um darauf aufbauend ein optimales Prozessergebnis zu erzielen, ist es wichtig, neben den Erosionsparametern auch die kinematischen Größen sowie deren Einfluss auf die gefertigte Geometrie und die Oberflächenrauheit zu kennen. Insbesondere bei der Bearbeitung von schrägen Wänden in 2,5D-Geometrien ist die erzielbare Oberflächenrauheit ein zentraler Faktor, da diese bei der Mikrobahnerosion - bedingt durch den ebenenweisen Materialabtrag - bei gleichen Erosionsparametern durch die Wandwinkelschräge beeinflusst wird. Dabei ist es erforderlich vor allem in randnahen Bereichen schon bei der Schrupp- und Schlichtbearbeitung ein bestmögliches Prozessergebnis zu erzielen, um optimale Voraussetzungen für den nachgelagerten Feinschlichtprozess zu schaffen. Durch die Optimierung der Oberflächengüte kann die Entformbarkeit der Kavität im Spritzgießprozess wesentlich verbessert werden.

Wie schon erwähnt, wird bei der Herstellung von Formeinsätzen meist genau ein Gutteil benötigt. Demnach ist es erstrebenswert, beim ersten Fertigungsprozess der Kavität innerhalb des geforderten Toleranzbereichs zu liegen, der in der Mikrosystemtechnik sehr klein ausfallen kann. Bei der Fertigung einer Kavität mittels Mikrobahnerosion ist die Hauptfehlerquelle einer Geometrieabweichung eine nicht korrekte Kompensation des Werkzeugelektrodenverschleißes während der Bearbeitung. Aus diesem Grund ist es anzustreben, den verschleißbedingten Fertigungsfehler direkt an der Erodiermaschine zu erfassen und die Kavität nachzubearbeiten.

Aufbauend auf den beschriebenen Herausforderungen hat diese Arbeit zum Ziel, eine automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion zu entwickeln (Abbildung 1.1). Ausgehend von einer automatisch ablaufenden Parametersuche geeigneter Prozessgrößen für die abschließende Feinschlichtbearbeitung soll eine Zuordnung der optimalen kinematischen Größen für die Fertigung von schrägen Wänden erfolgen, um eine bestmögliche bzw. konstante Oberflächengüte bei der Schrupp-, Schlicht oder Feinschlichtbearbeitung in einer Kavität erzeugen zu können. Abschließend soll der Fertigungsprozess durch eine prozessübergreifende Abtragsregelung begleitet werden, um elektrodenverschleißbedingte Geometrieabweichungen zu vermeiden und damit die Maßhaltigkeit der entstehenden Kavität zu gewährleisten.

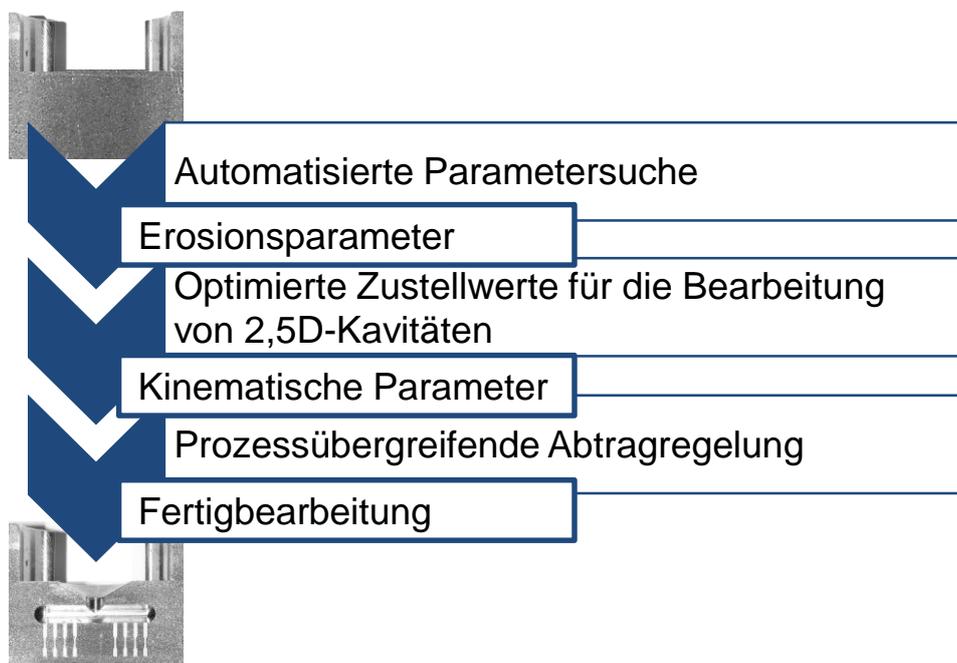


Abbildung 1.1: Aufbau der automatisierten Prozessabfolge

2 Kenntnisstand

2.1 Mikrofunkenerosion

Der abtragende Effekt einer elektrischen Entladung ist schon seit Ende des 18ten Jahrhunderts bekannt. Jedoch wurde das Phänomen des funkenerosiven Abtrags erstmals im Jahr 1944 durch das Ehepaar Lazarenko mit der elektrothermische Theorie beschrieben [Laz-44, Laz-47]. Durch ihre Untersuchungen wurde der Grundstein für die Nutzung des Verschleißeffektes aufgrund elektrischer Entladungen als Fertigungsverfahren gelegt und die Voraussetzung für die Entwicklung unterschiedlicher Verfahrensvarianten geschaffen.

Heutzutage findet die Funkenerosion dort Anwendung, wo die klassischen Fertigungsverfahren an ihre Grenzen stoßen. Gerade in den letzten Jahren wurden Materialien, wie spezielle Hartmetalle, Titanbasislegierungen, Nickelbasislegierungen, Werkzeugstähle, rostfreie Stähle und andere Superlegierungen weiterentwickelt, um neue Anwendungsfelder zu erschließen. Diese Materialien werden immer härter, zäher, hitze-, verschleiß- sowie korrosionsbeständiger und werden heutzutage nicht mehr nur für Spezialanwendungen eingesetzt [Ben-07, Yas-04]. Genau hier liegt das Einsatzgebiet der Funkenerosion. Sie ist eine der wichtigsten und kosteneffektivsten der alternativen Fertigungstechnologien zur Bearbeitung von spröden und harten Werkstoffen [Gui-97].

Die Funkenerosion oder abgekürzt EDM (Electrical Discharge Machining) wird nach DIN 8590 den thermischen Fertigungsverfahren zugeordnet. Der Materialabtrag basiert dabei auf dem gepulsten Funkenüberschlag zwischen zwei leitfähigen Elektroden, wobei eine davon die formgebende Werkzeug- und die andere die zu strukturierende Werkstückelektrode darstellt [Jah-11, Jam-01]. Zwischen den Elektroden ist während der Bearbeitung immer ein Arbeitsspalt im Mikrometerbereich vorhanden, so dass nur minimale mechanische Kräfte zwischen den Elektroden wirken. Dadurch findet nahezu keine Abdrängung oder Vibration der Werkzeugelektrode während des Prozesses statt [Tsa-04, Ho-03]. Somit können mit diesem Verfahren sehr komplexe und filigrane Strukturen mit einem hohen Aspektverhältnis erzeugt werden. Der Arbeitsspalt wird kontinuierlich von einem dielektrischen Fluid durchströmt, um die Abtragpartikel zu entfernen und den Bereich zwischen den Elektroden zu isolieren [Jah-11, Lla-01].

Die Spannung zwischen den Elektroden ist in einem Frequenzbereich bis zu 10 MHz gepulst [Uhl-05]. Somit finden pro Sekunde viele Einzelentladungen statt. Eine Entladung bzw. ein einzelner Funkenüberschlag findet immer an der Stelle des geringsten Abstandes zwischen den Elektroden statt [Jam-01]. Durch den punktförmigen Energieeintrag in die beiden Elektroden wird das Material stets lokal aufgeschmolzen und von beiden Elektroden abgetragen. Dabei hinterlässt jede Einzelentladung einen Krater auf der bearbeiteten Oberfläche [Jah-11].

Die während des Erosionsprozesses stattfindenden Einzelentladungen lassen sich in drei Phasen unterteilen (Abbildung 2.1) [Sch-04]:

- die Aufbauphase
- die Entladephase
- Abbauphase

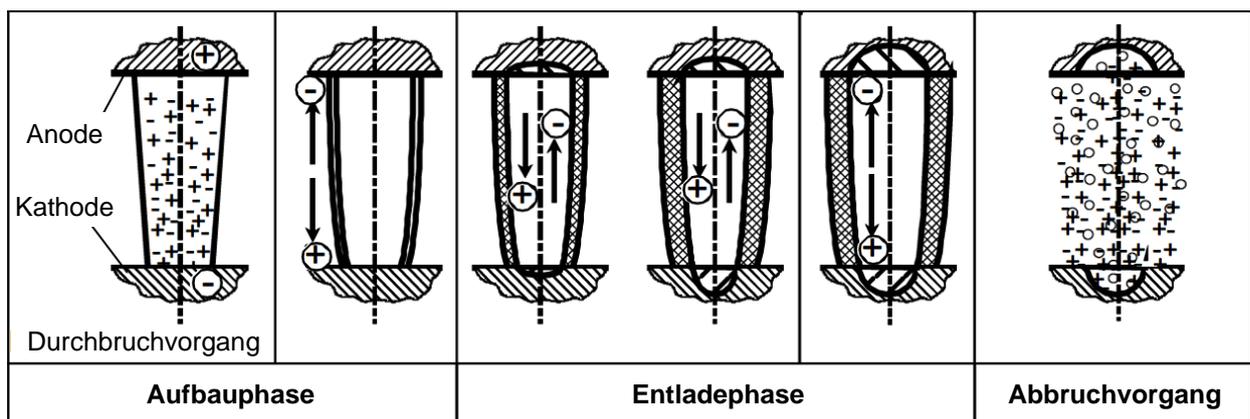


Abbildung 2.1: Die drei Phasen einer Funkenentladung [Klo-07]

Wenn die Spannung zwischen der Werkzeugelektrode und dem Werkstück angelegt wird, baut sich ein elektrisches Feld zwischen ihnen auf. Die **Aufbauphase** ist durch eine große zeitliche Änderung von Strom und Spannung charakterisiert, die zu einer Ausbildung eines Entlade- bzw. Plasmakanals an der Stelle des geringsten Elektrodenabstands führt. Dabei werden durch das elektrische Feld freie Ladungsträger im Funkenspalt zu den jeweiligen Elektroden hin beschleunigt. Diese treffen wiederum auf neutrale Teilchen, bei denen durch den Impuls des Einschlags ein Elektron herausgeschleudert wird [Hau-08]. Sobald diese sogenannte Stoßionisierung initiiert wurde, wird das Dielektrikum durchschlagen und es bildet sich ausgehend von positiven oder negativen Streamern [Tho-07] der Entladungskanal bzw. Plasmakanals aus. Durch das Überwinden der Durchschlagfestigkeit des dielektrischen Fluids

kommt es zum Stromfluss, der fast ausschließlich am Umfang des Entladekanals stattfindet [Men-05].

Nach der Initiierung des Funkenüberschlags findet die eigentliche **Entladephase** statt. Hier konzentriert sich der kurzzeitig konstant fließende Strom auf eine sehr kleine Fläche. Durch die stetig eingebrachte elektrische Energie findet ein Aufschmelzen und teilweise auch Sublimieren von Werkzeug- und Werkstückelektrodenmaterial an den Fußpunkten des Plasmakanals statt. Aus diesem entsteht während der Entladephase eine sich fortlaufend ausdehnende Gasblase [Klo-07].

Die **Abbauphase** Abbildung 2.1 wird eingeleitet durch das Unterbrechen der Stromzufuhr. Dadurch implodieren die ausgebildete Gasblase und der Plasmakanal, so dass das geschmolzene Material von den Oberflächen der Werkzeugelektrode und des Werkstücks ausgeschleudert wird [Klo-07]. Im Anschluss wird die in Partikelform erstarrte Schmelze im Funkenspalt durch das strömende Dielektrikum abtransportiert [Kun-05].

Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, ist bei der klassischen makroskopischen Funkenerosion die Werkzeugelektrode positiv und das Werkstück negativ gepolt. Die Elektrodenpolung wird im Mikrobereich meist getauscht, da sich das Verschleißverhalten bei kurzen Entladezeiten umkehrt. Eine kathodische Polung der Werkzeugelektrode ist daher ab einer Entladezeit in der Größenordnung von $t_e < 5 \mu\text{s}$ sinnvoll [Klo-07, Uhl-05]. Diese kurze Impulsdauer verursacht, begünstigt durch die Massenträgheit, dass in der kurzen Zeit die Elektronen mit ihrer geringeren Masse auf eine deutlich höhere Geschwindigkeit beschleunigt werden als die größeren positiv geladen Ionen. Somit erzeugen die Elektronen einen höheren Impuls, wenn sie auf das Werkstück treffen, was gleichzeitig einen größeren Energieeintrag und damit Materialabtrag zur Folge hat [Klo-07].

Die Entladeenergie einer Einzelentladung lässt sich nach der folgenden Formel 2.1 berechnen [Uhl-10]:

$$W_e = \int_0^{t_e} u_e(t) \cdot i_e(t) dt \approx u_e \cdot i_e \cdot t_e \quad \text{Formel 2.1}$$

Um die funktionsrelevanten Gleichspannungsimpulse zu erzeugen und somit die für den Abtragprozess notwendige Energie bereitzustellen, kommen zwei verschiedene Arten von Generatoren zum Einsatz. Der statische Impulsgenerator hat sich bei der Herstellung von Makroapplikationen durchgesetzt, wobei der Relaxationsgenerator (Abbildung 2.2) im Mikrobereich Anwendung findet. Um ein möglichst breites Anwendungsspektrum abzudecken, sind die Generatoren in konventionellen Erodiermaschinen darauf ausgelegt,

dass neben der Schruppbearbeitung mit hohen Entladeenergien auch Schlichtbearbeitungen mit nur geringer Energiezufuhr möglich sind. Für die Schlicht- und insbesondere die Mikroerosion sind sehr kurze Entladedauern von wenigen Nanosekunden notwendig, was normalerweise nur mit speziell angepassten Relaxationsgeneratoren möglich ist [Mas-01, Kön-90].

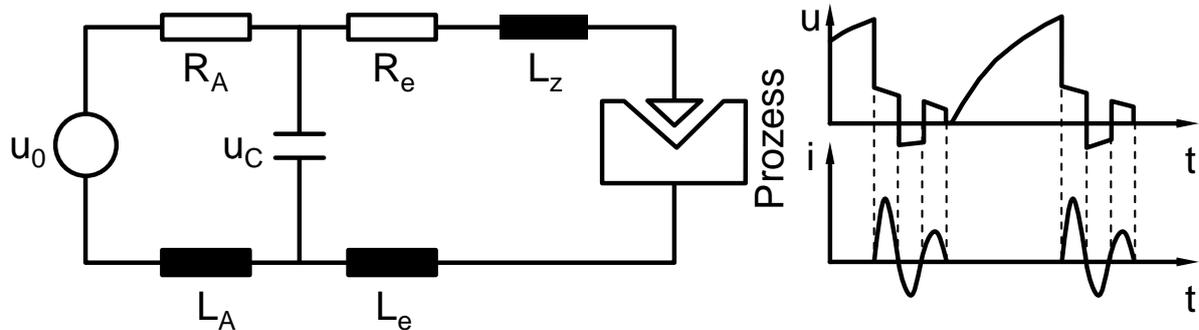


Abbildung 2.2: Prinzipielles Schaltbild eines Relaxationsgenerators sowie Strom- und Spannungsverlauf [Sch-09]

Ein Relaxationsgenerator arbeitet nach einem speziellen Prinzip, bei dem die Aufladung eines Kondensators schwingend erfolgt, solange der Widerstand im Ladekreis $R_A < \sqrt{L_A \cdot C}$ ist. Nimmt der Widerstand R_A zu, wird der Kondensator exponentiell mit der Zeitkonstante $\tau_R = R_A \cdot C$ aufgeladen. Findet kein Stromfluss statt, sind die Spannung im Funkenspalt und die am Kondensator u_C gleich. Erreicht u_C die Durchbruchspannung u_D , wird die gespeicherte Energie im Entladeschwingkreis verbraucht. Nach der Bedingung der Reihenresonanz kann die Entladefrequenz f_e bestimmt werden, wenn die Dämpfung durch den Entladekreiswiderstand R_e und die Spaltimpedanz nicht berücksichtigt werden [Klo-07].

$$f_e = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{L_e \cdot C}}$$

Formel 2.2

Der Funkenspalt und die Spannung am Kondensator u_C selbst sind die bestimmenden Größen beim Entladeverlauf. Der Widerstand im Aufladekreis R_A muss dabei so groß gewählt werden, dass selbst bei einer hohen Leitfähigkeit im Funkenspalt keine stationären Entladungen auftreten. Dadurch ist bei dieser Generatorbauart die Entladefrequenz eingeschränkt [Klo-07].

Zudem muss der Abstand zwischen der Werkzeug- und Werkstückelektrode ständig an den Erosionsprozess angepasst werden, um möglichst viele abtragwirksame Zündimpulse zu generieren. Die sogenannte

Spaltweitenregelung regelt über ein Vorschubsystem diesen Abstand, der bei der Mikrofunktenerosion in einem Bereich von unter 10 μm bis zu 2 μm liegt [Gil-05].

Durch die kurzen Entladezeiten von bis zu $t_e = 25 \text{ ns}$ und Entladeströme von $i_e = 1 \text{ A}$ bis $i_e = 0,1 \text{ mA}$ ergeben sich Entladeenergien von $W_e = 1$ bis $0,1 \mu\text{J}$. Dagegen sind mit derzeitigen statischen Impulsgeneratoren nur Entladeenergien von $W_e = 5 \mu\text{J}$ erzielbar [Pil-07, Jah-11, Uhl-10].

2.2 Ausgewählte Prozessvarianten

Der Begriff Funkenerosion beschreibt in erster Linie den grundsätzlichen Materialabtrag basierend auf einer elektrischen Funkenentladung. Dieses Prinzip findet wiederum in verschiedenen Prozessvarianten Anwendung. Die gängigsten Varianten der Funkenerosion im Mikrobereich sind die Senkerosion, die Drahterosion, die Planetärerosion und die Bahnerosion [Abb-07, Rei-08, Uhl-05]. Im Hinblick auf die Relevanz für diese Arbeit bezüglich der Herstellung von Kavitäten wird im Folgenden der Kenntnisstand der Mikrosenk- und speziell der Mikrobahnerosion dargestellt.

2.2.1 Mikrosenkerosion

Bei der Mikrosenkerosion wird eine Formelektrode in das zu bearbeitende Bauteil abgebildet. Diese Formelektrode entspricht dem Negativ der geforderten Werkstückform und muss in einem gesonderten Schritt durch andere Fertigungsverfahren, wie beispielsweise Mikrofräsen, Laserablation oder LIGA, hergestellt werden [Uhl-10]. Heutzutage sind mittels Mikrosenkerosion bei einem Aspektverhältnis von 25 und einer minimalen Kantenverrundung von 10 μm kleinste Geometriedetails bis zu 20 μm darstellbar [Men-05].

Derzeitige Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit einer Minimierung des Werkzeugelektrodenverschleißes, der Erhöhung des Materialabtrags und der Verbesserung der Oberflächengüte [Moh-06]. Neben der Optimierung der Erosionsprozessparameter hin zu sehr kleinen Entladezeiten, Entladeströmen und damit Entladeenergien sowie optimalen Impulsformen [Liu-09] ist der verwendete Werkzeugelektrodenwerkstoff ein maßgeblicher Faktor. Hierbei steht im Fokus, dass der Werkstoff eine ausreichende mechanische Festigkeit aufweist, um bei kleinsten Strukturen und hohen Aspektverhältnissen der Werkzeugelektrode ausreichend stabil sowie robust gegenüber Störeinflüssen zu sein. Zudem müssen verschleißfeste Werkzeugelektrodenmaterialien eine gute Wärmeleitfähigkeit und einen hohen Schmelzpunkt aufweisen [Jah-09, Liu-09, Uhl-10]. In der Praxis gängige Werkstoffe sind Wolfram-Kupfer, Wolfram, Hartmetall sowie Kupfer und Messing. Forschungsseitig werden derzeit

beispielsweise Keramik- und Diamantelektroden sowie Keramik- und Diamantbeschichtungen untersucht. Dabei ist es gelungen, im Vergleich zu herkömmlichen Werkzeugelektrodenwerkstoffen die Abtragsrate deutlich zu steigern und gleichzeitig den Verschleiß der Werkzeugelektrode zu senken [Alm-08, Jah-09, Kha-07, Uhl-05, Yua-09].

Ein weiterer Optimierungsansatz ist die Prozessregelung der Mikrosenkerosion. Aufgrund der Bauart des Relaxationsgenerators kommt der Regelung des Elektrodenvorschubs eine besondere Bedeutung zu, die basierend auf der Entladeenergie für die Einstellung der erforderlichen Spaltweite verantwortlich ist. Forschungsseitig wird hier an neuartigen Regelungskonzepten gearbeitet, die einen optimalen Regelungsprozess ermöglichen. Hierbei kommen vermehrt VSS-Controller (Variable Structure System), neuronale Netze und Fuzzy-Logik zum Einsatz. Diese Ansätze basieren auf dem logischen Verknüpfen von Eingangs- und Ausgangsparametern des Erosionsprozesses, um damit einen selbstlernenden Regelungsprozess abzuleiten. In Forschungsarbeiten wurden mit dieser Regelung ein konstanter Prozessverlauf und damit eine Steigerung der Abtragsrate, eine Reduzierung des Werkzeugelektrodenverschleißes und eine Verbesserung der Oberflächengüte am Bauteil erzielt [Beh-03, Cha-02, Kan-04, Lin-05, Ras-06].

Zudem werden neben der effizienten Regelung der Funkenspaltweite auch andere Möglichkeiten untersucht, die Entladeenergie zu senken und damit das Prozessergebnis positiv zu beeinflussen. Einerseits werden unterschiedliche Dielektrika erforscht. Hierbei handelt es sich vorwiegend um ölbasierte Dielektrika, deionisiertes Wasser, aber auch Prozessgase. Andererseits stehen pulveradditivierte Dielektrika im Fokus der Arbeiten. Der Einsatz von kleinen Partikeln aus Aluminium, Siliziumcarbid, Chrom und Kupfer im Funkenspalt bewirkt eine lokale Reduzierung der Durchschlagfestigkeit des Dielektrikums zwischen den Elektroden [Jos-11, Kun-04, Tho-07, Tze-05].

Durch die genannten Optimierungsmaßnahmen wird neben einer weiter voranschreitenden Miniaturisierung, der Erhöhung der erzielbaren Abtragsraten und der Erzeugung höchster Oberflächengüten auch die Bearbeitung von Materialien mit einer niedrigen elektrischen Leitfähigkeit ermöglicht. So beschäftigen sich derzeitige Forschungsarbeiten mit der Ermittlung von Parameterfenstern, die sich für die Bearbeitung von Keramiken wie beispielsweise B_4C , SiC und Si_3N_4-TiN eignen [Lau-04, Lau-07, Liu-09]. In weiterführenden Arbeiten ist es mittels einer Opferschicht auf der Werkstückelektrode oder einem speziellen Werkzeugelektrodenmaterial sogar

gelungen, nichtleitfähige Keramiken wie Al_2O_3 oder ZrO_2 durch Senkerosion zu bearbeiten [Hös-11, Kuc-10, Moh-96].

2.2.2 Mikrobahnerosion

Die Mikrobahnerosion – auch funkenerosives Fräsen genannt – ist die jüngste Verfahrensvariante der Funkenerosion, da sie wissenschaftlich erst seit den 1980er Jahren untersucht wird [Din-04]. Bei dieser Prozessvariante wird eine zylindrische, rotierende Werkzeugelektrode gemäß einem NC-Code über die Werkstückoberfläche geführt und somit das Material ebenenweise abgetragen. Dabei wird der Werkzeugelektrode zusätzlich zur radialen Vorschubbewegung eine axiale Zustellung überlagert, um den prozessbedingten Verschleiß zu kompensieren [Rei-08]. Ein großer Vorteil dieser Prozessvariante ist, dass im Gegensatz zur Senkerosion die aufwändige Herstellung der Werkzeugelektrode entfällt. Die relative Bewegung zwischen Werkzeugelektrode und Werkstück sorgt zudem für eine ausreichende Spülung des Funkenspalts. Grundsätzlich können mit der Bahnerosion beliebige Kavitäten und auch Freiformflächen – jedoch keine Hinterschnitte - hergestellt werden [Hau-09, Cha-04a]. In Abbildung 2.3 Abbildung 2.1 ist das Prinzip der Bahnerosion mit der Bearbeitungsstrategie in mäandrierenden Bahnen und mehreren z-Ebenen dargestellt.

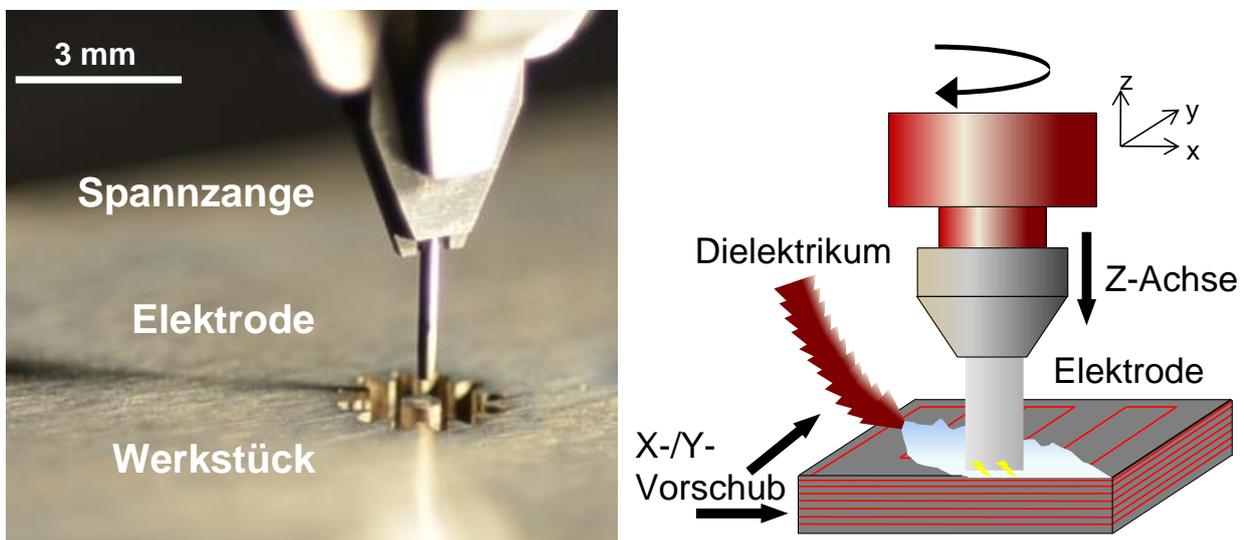


Abbildung 2.3: Prinzip der Bahnerosion

Da bei dieser Prozessvariante die Bewegungsbahn der Werkzeugelektrode die Geometrie des zu fertigenden Werkstücks definiert, ist es von großer Bedeutung, die Werkzeugbewegung exakt zu berechnen und mit höchster Präzision auszuführen. Die zentrale Fragestellung dabei ist, die exakte Kompensation des verfahrensbedingten Werkzeugelektrodenverschleißes zu realisieren.

In den Arbeiten von Bayramoglu und Duffill sind die ersten grundlegenden Untersuchungen zur Berechnung und Fertigung von Kavitäten mittels Bahnerosion zu finden [Bay-94, Bay-95]. Dabei wurde mit zylindrischen Werkzeugelektroden gearbeitet und der Einfluss des Werkzeugweges, der z-Zustellung und der Rotationsgeschwindigkeit der Werkzeugelektrode auf das Prozessergebnis bei der Fertigung von geometrisch einfachen Geometrien untersucht.

Eine systematische Berechnungsmethode zur Erzeugung eines NC-Codes für die Fertigung von 3D-Geometrien wurde von Mizugaki vorgestellt [Miz-96]. Allerdings erfolgte bei diesem Ansatz keine Verschleißkompensation im Prozess, so dass die Werkzeugelektrode während der Bearbeitung neu konditioniert und eingemessen werden musste.

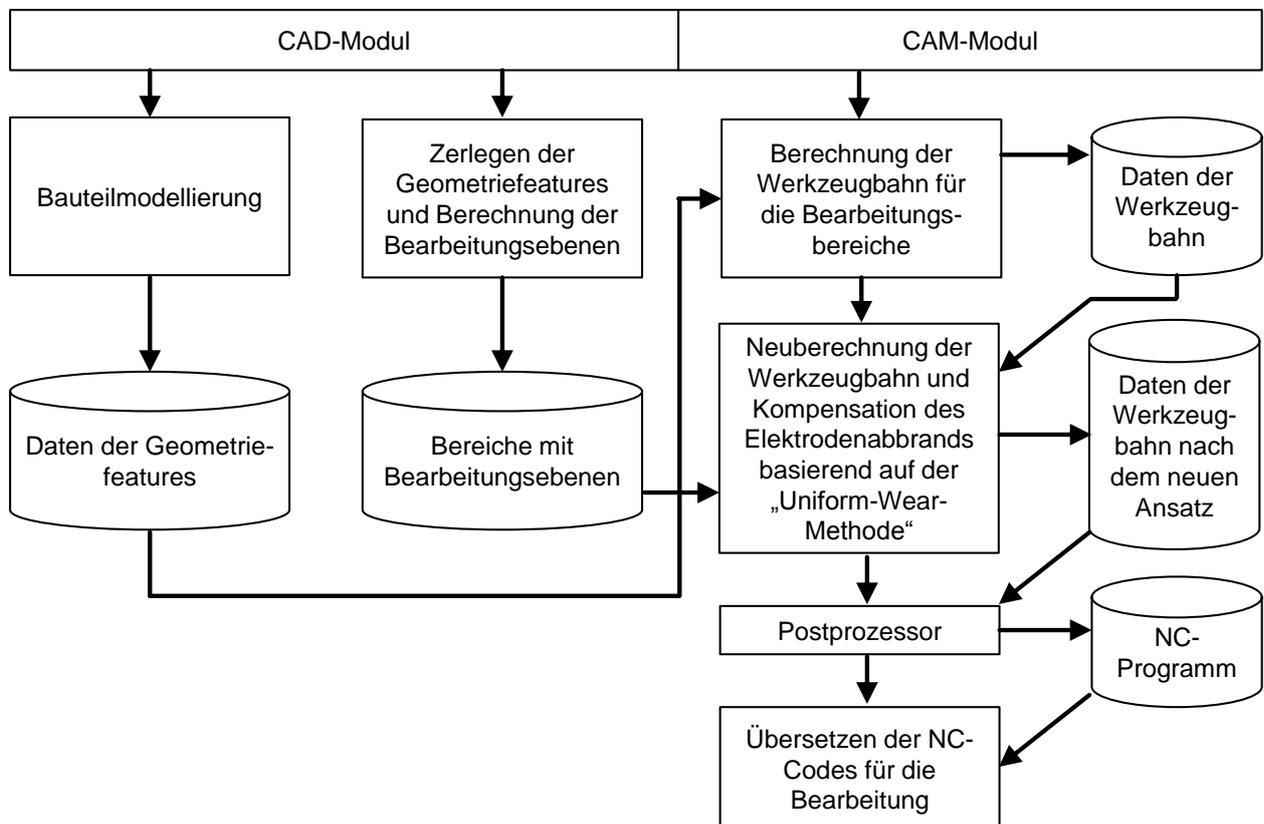


Abbildung 2.4: Integration der Methode zur Verschleißkompensation in die CAD/CAM-Kette [Raj-00]

Eine automatisierte Verschleißkompensation durch eine Modifikation des NC-Programms wurde durch Rajurkar und Yu realisiert [Raj-00]. Es handelt sich hierbei um eine Prozesskette, die basierend auf CAD-Daten die Werkzeugbewegungen der Werkzeugelektrode berechnet. Die Prozessstrategie sah eine Bearbeitung mit Bahnüberlapp in einzelnen äquidistanten Ebenen vor. Der Verschleiß wurde aufgrund der gewählten Zustellparameter, des Bahnüberlapps

und eines auf Erfahrungswissen basierenden relativen Werkzeugelektrodenverschleißes in Abhängigkeit von den Erosionsparametern sowie der Elektrodenwerkstoffpaarung berechnet. Dieser Wert wurde im Anschluss als Grundlage für die Berechnung einer z-Zustellung der Werkzeugelektrode zur Verschleißkompensation verwendet und darauf folgend im NC-Programm hinterlegt. Die Abbildung 2.4 zeigt die Integration des Modells zur Verschleißkompensation in die CAD/CAM-Kette. Die Art der Verschleißkompensation hat sich unter dem Begriff „Uniform-Wear Methode“ oder „Offline-Verschleißkompensation“ etabliert, da die zusätzliche z-Zustellung vor dem eigentlichen Erosionsprozess berechnet und der ursprünglichen Werkzeugbahn überlagert wird [Ble-02].

Darauf aufbauend haben Tricarico et al. eine Patentschrift eingereicht, in der das zyklische Messen der Werkzeugelektrodenlänge im Bearbeitungsprozess beschrieben wird [Tri-00]. Als Messmethode wurde in diesem Fall das Antasten der Werkzeugelektrode auf einer Referenzfläche verwendet. Im Fertigungsprozess werden so nach einer definierten Anzahl von abgetragenen Bearbeitungsebenen der tatsächliche Werkzeugelektrodenverschleiß und die Abweichung von der Solltiefe gemessen. Darauf aufbauend wird dann wiederum ein korrigierter Wert für die Verschleißkompensation ermittelt. Durch diese Prozessabfolge kann die verschleißbedingte Geometrieabweichung auf bis zu $5\ \mu\text{m}$ minimiert werden [Ble-01]. Diese grundlegenden Arbeiten stellen den ersten Ansatz einer Online-Kompensationsmethode dar, die heutzutage noch in den meisten Maschinen Anwendung findet.

Eine weiterführende Online-Variante wurde von Bleys et al. entwickelt [Ble-04, Ble-02]. Hierbei handelt es sich um eine Echt-Zeit-Verschleißkompensation, die den Werkzeugelektrodenabbrand durch die Kombination einer vorgegebenen z-Zustellung (Offline) und eines Korrekturwerts ausgleicht, der aus der Analyse des Erosionsprozess hervorgeht. Bei statischen Impulsgeneratoren kann über die Anzahl der Impulse sehr präzise auf den tatsächlichen volumetrischen Abtrag am Werkstück und an der Werkzeugelektrode geschlossen werden. Diese Größe nutzen Bleys et al. wiederum, um einen vorgegebenen Offline-Wert zu korrigieren. Die Abbildung 2.5 zeigt eine schematische Darstellung des Modells, das eine Offline- und eine Echt-Zeit-Verschleißkompensation kombiniert.

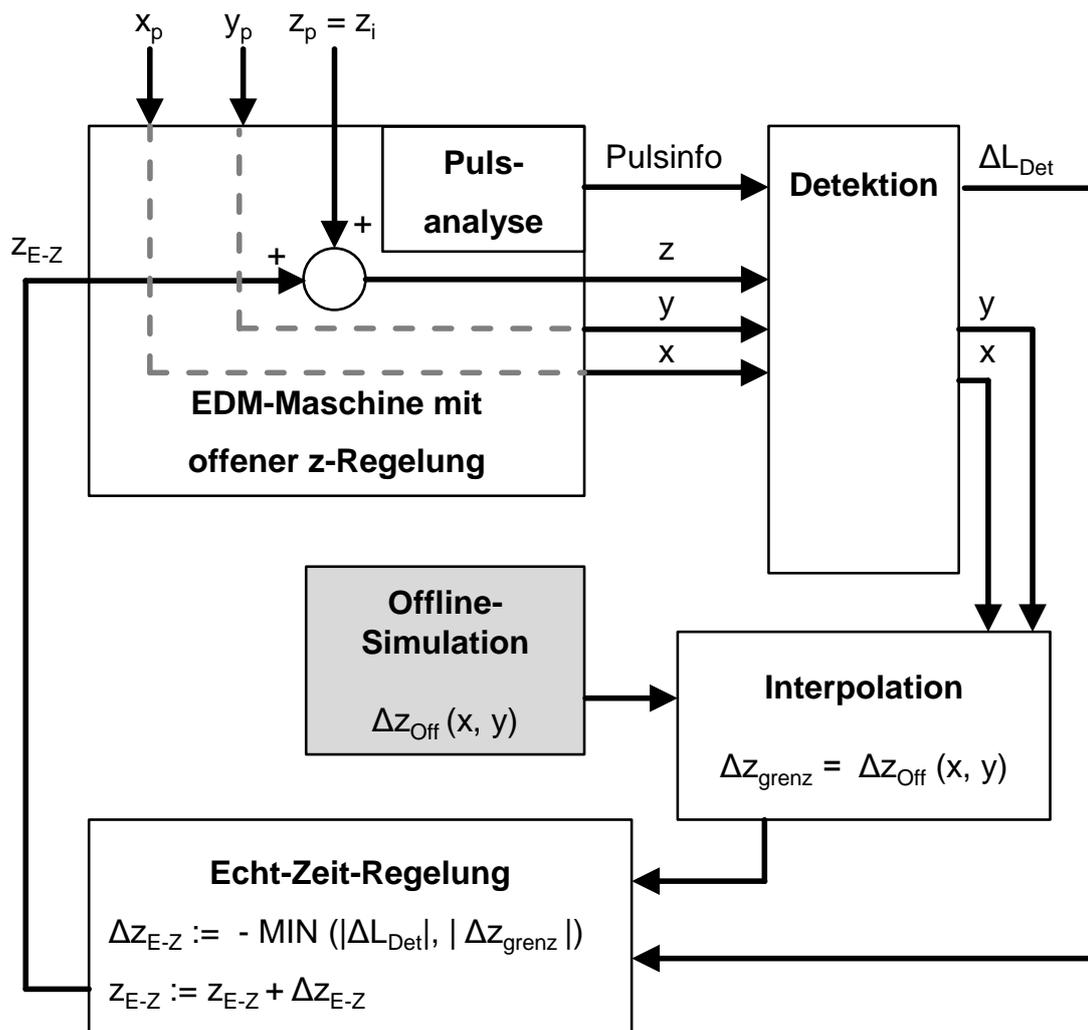


Abbildung 2.5: Kombination aus Offline- und Echt-Zeit-Verschleißkompensation [Ble-02]

Das Konzept zur Regelung der Verschleißkompensation wurde anhand von Testkavitäten validiert. Hierbei wurde eine Kavität in ein mit einer Nut versehenes Bauteil erodiert. Durch diese Testgeometrie wurde gewährleistet, dass kein kontinuierlicher Abtragprozess stattfand und der Werkzeugelektrodenverschleiß nicht linear verlief. Die Abbildung 2.6 zeigt die Testkavität (c), ein bearbeitetes Werkstück mit einer konventionellen Offline-Kompensation (b) und ein Werkstück, hergestellt mit dem entwickelten kombinierten Regelungsansatz (a). Die Ergebnisse zeigen, dass der Werkzeugelektrodenvorschub in z-Richtung durch die Offline-Kompensation in Beispiel (a) im Bereich der Nut unterbrochen wurde und im Vergleich zu Beispiel (b) eine plane Oberfläche hergestellt werden konnte [Ble-04, Ble-02].

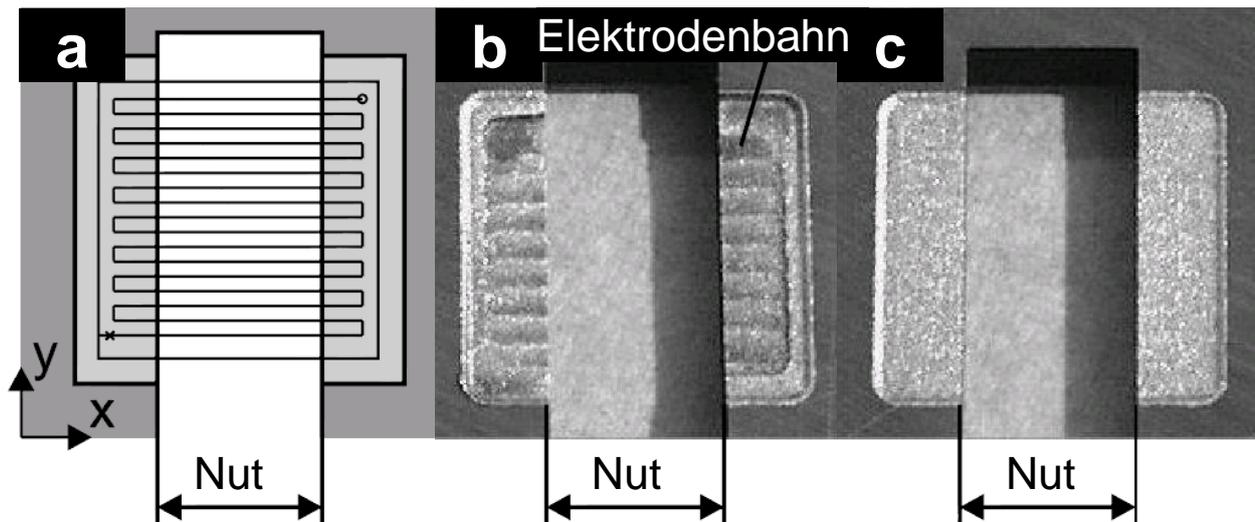


Abbildung 2.6: Testkavität (a):
hergestellt mit konventioneller Offline-Kompensation (b),
hergestellt mit entwickeltem kombinierten Regelungsansatz (c) [Ble-02]

Eine andere Art der kombinierten Verschleißkompensation wurde von Chang und Chiu präsentiert [Cha-04b]. Diese Variante basiert auf der kontinuierlichen Messung der Entladespannung während des Prozesses. Durch diesen Wert kann die Weite des Funkenspalts ermittelt und geregelt werden. Die daraus resultierende z-Zustellung wird dann – ähnlich wie bei Bleys et al. – der Verschleißkompensation nach der Uniform-Wear Methode überlagert.

Ein Modell zur Berechnung der Werkzeugelektrodenbahn für die Fertigung von schrägen Wänden in 2,5D-Geometrien wurde von Narasimhan et al. vorgestellt [Nar-05]. Hierbei handelt es sich ebenfalls um eine Erweiterung der Offline-Kompensation bzw. der Uniform-Wear Methode. In dieser Arbeit wurde der Ansatz verfolgt die Bearbeitungsebenen nicht horizontal in die abzutragenden Bereiche zu legen, sondern der Werkzeugelektrode während der Fertigung einer Ebene eine z-Zustellung zu überlagern, die sich aus einem geometrischen Anteil der zu erzeugenden Freiformfläche und einem Anteil der Verschleißkompensation zusammensetzt. Je nach Ausprägung der Oberfläche unterscheiden Narasimhan et al. in ihrer Berechnung einen linearen und einen exponentiellen Verlauf der z-Zustellung relativ zum lateralen Vorschub auf der Werkzeugelektrodenbahn.

Da bei der Mikrofunkenerosion aufgrund der sehr kleinen Entladeenergien vorwiegend Relaxationsgeneratoren zum Einsatz kommen, haben Jung et al. eine Kompensationsvariante entwickelt, die im Vergleich zum vorigen Konzept unabhängig von konstanten Impulsfrequenzen ist [Jun-08]. Bei diesem Modell werden ebenfalls die Entladungen je Zeitperiode gezählt, jedoch wird hier nicht

direkt auf das Abtragsvolumen am Werkstück geschlossen, sondern zunächst die über die Zeitdauer ermittelte Impulsfrequenz gemittelt. Dies ist bei dieser Generatorart erforderlich, da das Abtragsvolumen je nach Prozessbedingungen und tatsächlicher Frequenz aufgrund unterschiedlicher Entladeenergien variieren kann. Mittels der tatsächlichen Frequenz können dann die Größe des Funkenspaltes und die effektive Entladeenergie ermittelt sowie die Elektrodenvorschubregelung vorgenommen werden. Über die Berechnung des Abtragsvolumens am Werkstück, durch die Anzahl der Einzelimpulse pro Zeitintervall und die tatsächliche Impulsfrequenz sowie die aktuelle Funkenspaltweite kann dann die z-Zustellung der Werkzeugelektrode je Bearbeitungsebene ermittelt werden. Bei Validierungsversuchen wurde mit diesem Konzept eine minimale Abweichung der Tiefe der Kavität von 8 μm erzielt.

Die bisher beschriebenen Varianten der CAM-Programmierung und der Fertigungsstrategie sahen stets eine Bearbeitung in mehreren Ebenen vor. Dabei hatten die einzelnen Ebenen immer den gleichen Abstand zueinander. Popov und Petkov haben das erste CAM-System vorgestellt, das variable Ebenenabstände für die Bearbeitung vorsieht, um die Geometrieabweichung in 2,5D-Kavitäten zu minimieren [Pop-11]. Hierbei wird nur ein prozessbedingter maximaler Ebenenabstand vorgegeben und das entwickelte CAM-System rechnet dann auf rein geometrischem Wege die optimalen endkonturabhängigen Ebenenabstände aus, um Gestaltabweichungen an der Kavität zu minimieren. Dieser Ansatz wurde bisher nur für die Laserablation umgesetzt.

Aber nicht nur die Bahnberechnung und Kompensation des Werkzeugverschleißes in z-Richtung ist Gegenstand der Forschung. Ein neuer Ansatz zur lateralen Werkzeugwegberechnung wurde von Chang und Hong präsentiert [Cha-04a]. In dieser Arbeit stand die optimierte Berechnung der Werkzeugelektrodenbahn in x-/y-Richtung im Vordergrund. Durch einen parametrischen Berechnungsalgorithmus wurden im Gegensatz zu konventionellen Berechnungsmethoden höhere Vorschubgeschwindigkeiten an freigeformten Bahnkurven und eine höhere Genauigkeit bzw. Auflösung der tatsächlichen Werkzeugbahn erzielt, was anschließend an gefertigten Testgeometrien nachgewiesen wurde. So konnten Chang und Hong in ihrer Arbeit die Vorteile einer polynomischen Echtzeit-Interpolation von Datenpunkten gegenüber einer linearen Interpolation und einer Berechnungsmethode des NC-Codes mittels eines BDD-Analysers (Buffered Digital Differential) aufzeigen.

Ein weiterer Faktor, der sich auf die Präzision der gefertigten Kavität und die Bearbeitungsgeschwindigkeit auswirkt, ist das Maschinenkonzept. Da die

Pulsfrequenz bei der Mikrobahnerosion bis in den MHz-Bereich reichen kann [Uhl-05], ist es erstrebenswert, die Regelung und damit auch die Werkzeugelektrodenzustellung hochdynamisch auszuführen. Tong et al. haben zu dieser Thematik eine z-Achse entwickelt, die über zwei Zustellsysteme verfügt [Ton-08]. So kann die Werkzeugelektrodenzustellung pro Bearbeitungsebene über eine konventionelle Linearachse erfolgen, um einen großen Werkzeugweg bzw. Arbeitsraum zu gewährleisten. Das zweite adaptierte System basiert auf einem Piezo-Aktor und ist damit hochdynamisch und sehr präzise. Mit diesem System wird die Feinpositionierung und Spaltregelung im Prozess ausgeführt. Das Regelungskonzept der Spaltweite basiert dabei auf der gemessenen Spaltspannung. Der prinzipielle Aufbau der entwickelten Maschine und der zugehörigen Ansteuerung der beiden Vorschubsysteme ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

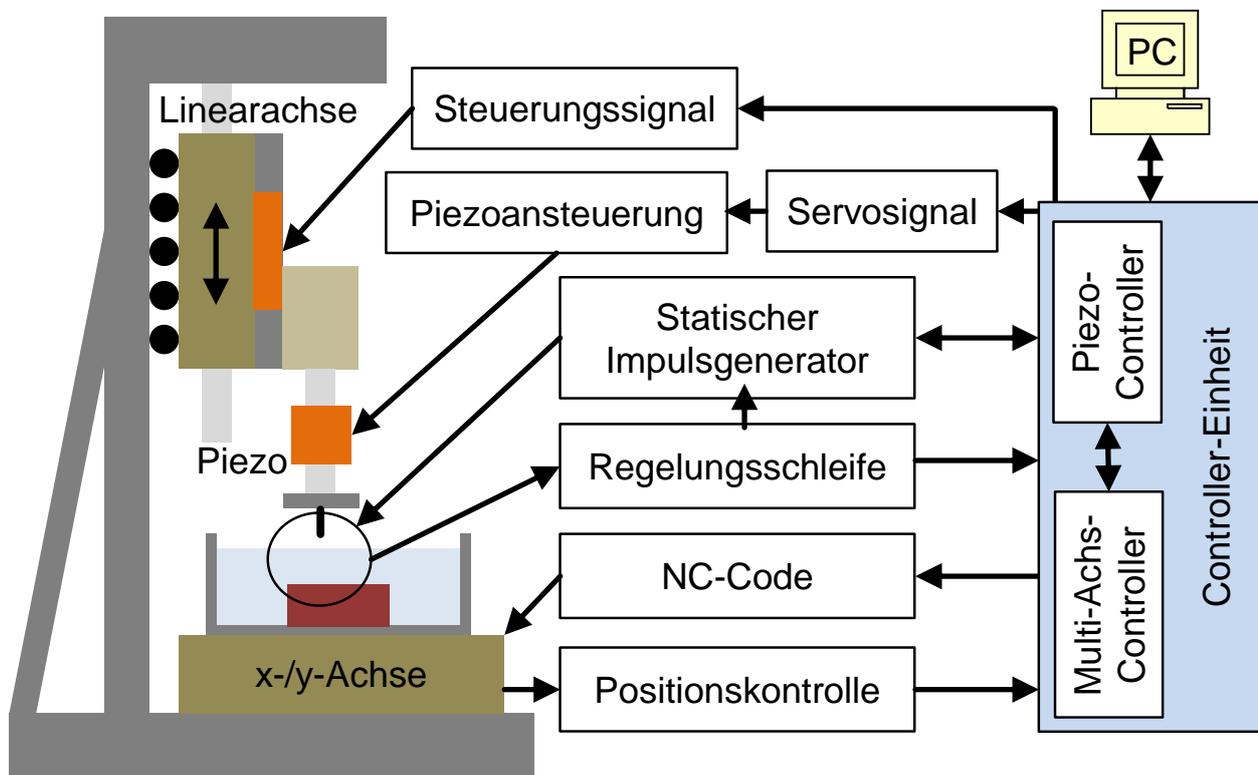


Abbildung 2.7: Prinzipieller Aufbau der von Tong et al. entwickelten Maschine und der Steuerung [Ton-08]

In abschließenden Validierungsversuchen wurden die Vorteile dieser zweistufigen Maschinenachse nachgewiesen. Bei der Fertigung von Testkavitäten wurde eine maximale Geometrieabweichung von 2% erzielt, bei einer Wiederholgenauigkeit von unter 0,7%. Dabei betrug die erzeugte Oberflächenrauheit $R_a = 0,37 \mu\text{m}$ bei einer Materialabtragsrate von $MRR = 0,000948 \text{ mm}^3/\text{min}$ [Ton-08].

Eine weitere Variante, den Abtragprozess bei der Mikrobahnerosion zu beschleunigen, wurde von Kunieda et al. beschrieben. Diese Forschergruppe setzte ein Prozessgas als dielektrisches Fluid ein, um den Funkenspalt zu isolieren und zu spülen. Es wurde nachgewiesen, dass durch die Verwendung von reinem Sauerstoff als Prozessmedium die Abtragsrate gesteigert sowie der Werkzeugelektrodenverschleiß erheblich gesenkt wird. Bei dieser „trockenen“ EDM-Variante, die vorwiegend aus der Senkerosion bekannt ist [Kun-97, Kun-01, Kun-03, Wan-04, Yu-04, Yu-05], bestand zunächst die Problematik der Abfuhr der entstehenden Abtragpartikel aus dem Funkenspalt. Die durchgeführten Versuchsreihen haben gezeigt, dass sich das beste Ergebnis durch die Verwendung einer Absaugspülung durch eine Bohrung in der Werkzeugelektrode erzielen lässt. Auch die Konturgenauigkeit konnte durch diese Spülvariante gesteigert werden, da so die Anzahl der lateralen Entladungen am Umfang der Werkzeugelektrode minimiert werden konnte.

Mit den Arbeiten von Fujiki et al. wurden dann die beiden Ansätze der prozessgasgestützten Bearbeitung (Kerosindampf) und der Funkenspaltregelung mittels eines Piezoaktors vereinigt [Fuj-09, Fuj-10]. Bei dieser kombinierten Lösung und dem damit neu entwickelten Regelungsprinzip wurde eine Steigerung der Abtragsrate um 30 % gegenüber einem konventionellen Controller erreicht. In diesem Kontext haben Fujiki et al. auch die Vorteile einer nicht senkrecht zur Oberfläche ausgerichteten Werkzeugelektrode untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Schrägstellung der Werkzeugelektrode in Vorschubrichtung beim Schrappen und normal zur Vorschubrichtung beim Schlichten die Steigerung der Abtragsrate zusätzlich begünstigt und gleichzeitig das Ausbilden von Aufschweißungen vermindert. Begleitend wurde ein CFD-Simulationsmodell (Computational Fluid Dynamics) aufgebaut, mit dem basierend auf dem Durchfluss des Fluids durch die verwendete Rohrelektrode, die Abtragsrate und der Werkzeugelektrodenverschleiß bei verschiedenen Neigungswinkeln des Werkzeugs berechnet werden kann.

Ein Simulationsmodell zur Vorhersage der tatsächlich gefertigten Geometrie am Bauteil haben Yu et al. entwickelt [Yu-03]. Hierbei wird, basierend auf der zu bearbeitenden Oberfläche und dem relativen Werkzeugelektrodenverschleiß, die entstehende Oberfläche entlang der Bearbeitungsbahn berechnet. Es konnte gezeigt werden, dass die Simulationsergebnisse im Rahmen der Messgenauigkeit (Antasten, Stromdurchgang) mit denen aus den experimentellen Untersuchungen korrelieren.

Ein weiteres Feld der aktuellen Forschungsaktivitäten ist – wie auch schon bei der Mikrosenkerosion – die Bearbeitung von schlecht oder gar nicht leitenden

Keramiken, da diese im gesinterten Zustand aufgrund ihrer Härte nicht zerspanend bearbeitet werden können und eine Laserbearbeitung häufig nicht zielführend ist. Um für die Bearbeitung von Keramiken die richtige Prozessvariante auszuwählen, wurde von Lauwers et al. ein Vergleich von Senk- und Bahnerosion bei der Bearbeitung von B_4C , SiC und Si_3N_4-TiN erstellt [Lau-07]. Die Ergebnisse zeigen, dass das Parameterfenster für die Bearbeitung von Keramiken deutlich kleiner ist, als es bei konventionellen Materialien der Fall ist. Als Haupteinflussfaktoren auf den Prozess wurden die Impulsdauer, die Pulsfrequenz und der Entladestrom identifiziert und diese innerhalb der Forschungsarbeiten hinsichtlich der erzielbaren Abtragsraten und Oberflächengüte optimiert. Lauwers et al. kamen zu dem Ergebnis, dass bezüglich der Abtragsrate die Mikrobahnerosion bei dem gewählten Werkzeugelektroden-Bauteil-Größenverhältnis der Senkerosion vorzuziehen ist. Da aber die Oberflächenrauheit bei der Senkerosion besser war, wurde abschließend ein zweistufiger Prozess entwickelt, der einen Bahnerosionsprozess mit einem anschließenden Schlichtprozess mittels Senkerosion beinhaltet. Durch diese Vorgehensweise konnte die Fertigungszeit an einem Referenzbauteil bei gleicher Oberflächenrauheit um 50% gesenkt werden.

Ähnliche Untersuchungen wurden von Liu et. al. durchgeführt. Dabei wurden die Einsatzgebiete von Relaxationsgeneratoren, statischen Impulsgeneratoren und verschiedenen Impulsformen für die Senk- und Bahnbearbeitung untersucht, um diese für Schrubb- und Schlichtstrategien bei einer spezifischen Fertigungsaufgabe des Werkstoffs Si_3N_4-TiN zu nutzen. Wie schon von Lauwers et. al. beschrieben, kamen auch Liu et. al. zu dem Ergebnis die Schrubbearbeitung mittel Bahnerosion und Relaxationsgenerator durchzuführen, da hier weniger Werkzeugelektrodenverschleiß auftritt und sich eine höhere Abtragsrate erzielen lässt. Die anschließende Schlichtbearbeitung wurde dann mittels Senkerosion und einem statischen Impulsgenerator durchgeführt, um die Bauteiloberfläche zu glätten [Liu-09].

Um allgemein die prozessbedingten Grenzen der erzielbaren Oberflächengüte, Abtragsrate und kleinsten darstellbaren Strukturen bei der Mikrobahnerosion zu verschieben, existieren Forschungsansätze, diese Verfahrensvariante mit ergänzenden abtragenden Fertigungsprozessen zu kombinieren. Die Herausforderung dabei besteht in der maschinentechnischen Umsetzung, um beide Verfahren synchron oder sequenziell auf einem Versuchsstand betreiben zu können. Nur durch die Vermeidung von zwischengeschalteten Umspannprozessen kann die in der Mikrosystemtechnik sehr hohe

Positioniergenauigkeit der Maschine und damit Maßhaltigkeit am Bauteil erzielt werden.

Gemäß diesem Ansatz hat Haupt ein Maschinenkonzept entwickelt, das die Mikrobahnerosion und die Laserablation vereint [Hau-08]. In einem sequenziellen Prozess war es so möglich, die höheren Abtragsraten der Bahnerosion zu nutzen, um großflächige Anteile einer Kavität zu bearbeiten und im Anschluss eine Feinstrukturierung mittels eines Nd:YAG-Lasers vorzunehmen. So konnten Geometriedetails bis zu einer Größe von $3\ \mu\text{m}$ in mikrobahnerodierte Kavitäten eingebracht werden. Zudem wurde durch die Prozesskombination eine deutlich effizientere Fertigung von Kavitäten gegenüber der reinen Laserbearbeitung ermöglicht.

Um die Oberflächenrauheit und die Maßhaltigkeit von mikrobahnerodierten Kavitäten zu optimieren, haben Nguyen et al. einen Versuchsstand entwickelt und aufgebaut, der die Möglichkeit bietet, die Mikrobahnerosion und die ECM-Bearbeitung (Electro Chemical Machining) in einem simultanen Prozess ablaufen zu lassen [Ngu-12]. Grundlage für das Funktionieren des Prozesses ist die Auswahl des Arbeitsmediums. Nguyen et al. haben deionisiertes Wasser mit einer sehr geringen Leitfähigkeit verwendet. Die Prozesskinematik ist dieselbe wie bei der reinen Bahnerosion, nur mit dem Unterschied, dass der laterale Vorschub der Werkzeugelektrode langsamer erfolgt. Dadurch hören an einer gewissen Bearbeitungsstelle der Werkzeugelektrode beim Anlegen einer gepulsten Spannung die Funkenentladungen der Erosion auf, weil der Funkenspalt zu groß wird und die Durchschlagfestigkeit des Arbeitsmediums nicht mehr überwunden werden kann. Zu diesem Zeitpunkt setzt die ECM-Bearbeitung ein, die die kraterförmige Struktur der erodierten Oberfläche glättet. Die Dauer des chemischen Abtrags wird, wiederum durch einen weiteren Vorschub der Werkzeugelektrode, in lateraler Richtung begrenzt. Die REM-Aufnahmen einer mikrobahnerodierten und einer hybride hergestellten Kavität sind in Abbildung 2.8 gegenübergestellt.

Den Abbildungen ist zu entnehmen, dass die Oberflächengüte durch die kombinierte Bearbeitung deutlich verbessert wurde. Messungen ergaben eine Rauheit von $R_a = 0,022\ \mu\text{m}$ bei der kombinierten Bearbeitung gegenüber einem Wert von $R_a = 0,142\ \mu\text{m}$ für die reine Mikrobahnerosion. Zudem konnte die bei der Funkenerosion entstehende karbid- und oxidhaltige Schicht durch den elektrochemischen Prozess deutlich reduziert werden [Ngu-12].

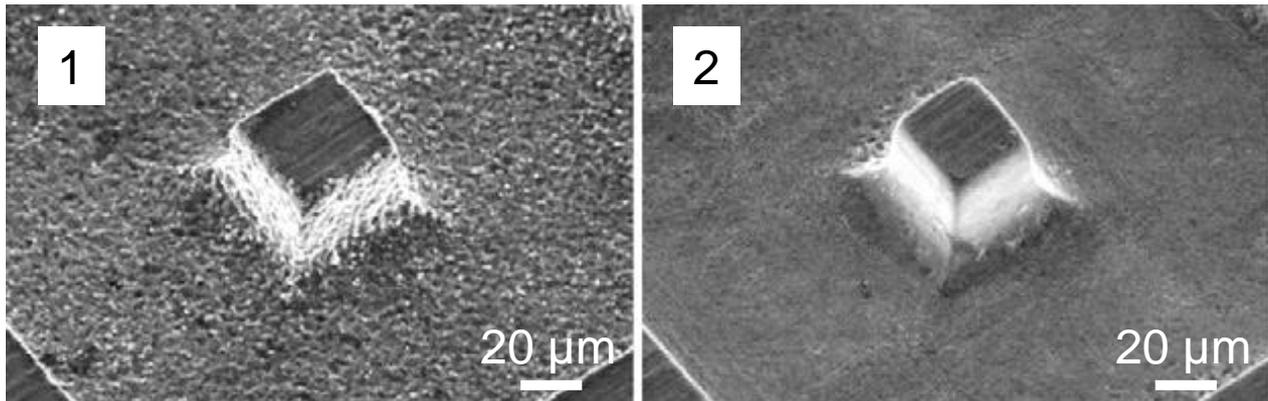


Abbildung 2.8: (1) Mikrobahnerodierte Kavität; (2) Kombinierte Bearbeitung [Ngu-12]

2.3 Zusammenfassung und Fazit

Die Mikrofunktenerosion ist ein etabliertes Verfahren bei der Herstellung von Formeinsätzen und Kavitäten. Durch die einzigartigen Verfahrenscharakteristika können extrem harte und damit verschleißbeständige Materialien bearbeitet werden, was vor allem im Formenbau von zentraler Bedeutung ist. Zudem bedingt der nahezu prozesskraftfreie Materialabtrag eine hohe Maßhaltigkeit des gefertigten Bauteils. Zur Herstellung von Formeinsätzen haben sich die Verfahrensvarianten Mikrosenkerosion und Mikrobahnerosion etabliert.

Auf dem Gebiet der Mikrosenkerosion beschäftigen sich aktuelle Forschungsarbeiten vorwiegend mit Maßnahmen zur Erhöhung der Abtragsraten, zur Verbesserung der Oberflächengüte und zur Verschleißminimierung, da bei dieser Verfahrensvariante der Verschleiß nicht im Prozess kompensiert werden kann. Dazu wird die Verwendung von alternativen Werkzeugelektrodenmaterialien, Dielektrika, Additiven und unterschiedlichen Maschinenkonzepten untersucht, um sukzessive die Palette der bearbeitbaren Materialien zu erweitern und die Miniaturisierung voranzutreiben.

Da bei der Mikrobahnerosion die Form durch eine zylinderförmige Werkzeugelektrode mittels eines NC-Codes in einzelnen Bearbeitungsebenen erzeugt und der Verschleiß dabei durch eine Zustellung in z-Richtung kompensiert wird, ist das zentrale Thema aktueller Forschungsansätze, neue Regelungskonzepte zur Verschleißkompensation zu entwickeln. Ausgehend von der Uniform-Wear Methode im Sinne einer Offline-Verschleißkompensation [Raj-00] wurden Regelungskonzepte entwickelt, die eine Echt-Zeit-Verschleißkompensation basierend auf dem aktuellen Prozessverlauf über die Analyse der Prozessparameter vorsieht [Ble-02, Ble-04, Cha-04b, Jun-08]. Mit diesem Konzept wurde eine minimale Abweichung der Solltiefe der Testkavität

von 5 μm erzielt. Diese verbleibende Abweichung ist dadurch zu erklären, dass alle vorgestellten Regelungskonzepte auf den im Prozess gemessenen Parametern basieren. Dies hat zur Folge, dass der Elektrodenvorschub zur Verschleißkompensation erst geregelt wird, wenn schon eine Abweichung von den Sollwerten erfolgt ist und der Abtragprozess davon schon beeinflusst wurde. Zudem kann durch keine der bisher existierenden Varianten die Qualität des Bauteils im Prozess sichergestellt werden. Aus diesem Grund wird innerhalb dieser Arbeit – basierend auf einer Offline-Verschleißkompensation – ein qualitätssicherer Lösungsansatz entwickelt, den Abtrag durch den Einsatz entsprechender Messtechnik iterativ stattfinden zu lassen und so eine auftretende Geometrieabweichung zu minimieren. Weiterführend wurden Konzepte entwickelt, die Verschleißkompensation mit der z-Zustellung bei der Fertigung von freigeformten Oberflächen zu überlagern [Nar-05] bzw. die Ebenenabstände an die herzustellende Geometrie anzupassen [Pop-11], um die Oberflächenqualität zu steigern. Dabei werden aber die z-Zustellungen auf rein geometrischem Wege berechnet. Die charakteristischen prozessbedingten Oberflächenausprägungen wurden in den bis existierenden Ansätzen nicht mit einbezogen. Da diese aber einen bedeutenden Einfluss auf die Qualität der Oberfläche haben, wird im Folgenden dieser Aspekt untersucht und fließt mit in die Auslegung der Zustellwerte ein.

3 Versuchsstand und Methodik

3.1 Elektrodenmaterial und Dielektrikum

3.1.1 Werkzeugelektrode

Für die Untersuchungen zur Mikrobahnerosion wurden zylindrische Stabelektroden mit Durchmessern von $D = 100 \mu\text{m}$ und $D = 300 \mu\text{m}$ verwendet. Beim Werkstoff der Werkzeugelektroden handelte es sich um das Feinstkornhartmetall WC-6Co (TSM10, Fa. Ceratizit). Dieser pulvermetallurgisch hergestellte Verbundwerkstoff weist 6 Vol.-% Kobalt als Binderphase und $< 0,5 \text{ Vol.-%}$ Mischkarbide auf. Die mittlere Korngröße beträgt $0,7 \mu\text{m}$ und die Härte 1850 HV 30 [Cer-10].

3.1.2 Werkstückelektrode

Als Werkstückmaterialien wurden je nach Untersuchung Werkstücke aus dem Stahl 30CrMo6 und aus dem Hartmetall WC-12Co verwendet.

30CrMo6

Bei dem niedriglegierten Werkzeugstahl 30CrMo6 handelt es sich um eine schmelzmetallurgisch hergestellte Legierung, die schon im wärmebehandelten Zustand bezogen wurde (Toolox44, SSAB Oxelösund AB). Der Stahl weist bei 20°C eine Härte von 450 HV 1 und eine Zugfestigkeit von $R_m = 1450 \text{ MPa}$ auf. Durch die hohe Zähigkeit und die sehr geringen Eigenspannungen ist dieser sehr formstabil. Zudem besitzt die Legierung eine hohe Warmfestigkeit und eignet sich damit hervorragend zur Herstellung von Formwerkzeugen für urformende Fertigungsverfahren. Die exakte chemische Zusammensetzung des in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffs 30CrMo6 ist in der Tabelle 3.1 dargestellt [Too-12].

Fe	C	Cr	Mo	Si	Mn	Ni	P	Al	V	S	W
Basis	0,31	1,34	0,81	0,60	0,89	0,69	0,01	0,03	0,015	$<0,01$	0,01

*Tabelle 3.1: Chemische Zusammensetzung des Stahls 30CrMo6
(Angaben in Ma.-%) [Kie-11]*

Die verwendete Probengeometrie des Werkstoffs 30CrMo6 wies eine Kantenlänge von $50 \times 18 \text{ mm}$ bei einer Probenhöhe von 4 mm auf. Die Oberflächen der Stahlproben wurden vor den funkenerosiven Untersuchungen schleifend (Körnung A46) vorbereitet.

WC-12Co

Der pulvermetallurgisch hergestellte Werkstoff WC-12Co (TSF 44, Ceratizit) ist ein ultrafeinkörniges Hartmetall. Dieses Hartmetall ist ein auf Wolframkarbid basierender Verbundwerkstoff mit 12 Vol.-% Kobalt als Bindermaterial und 1,35 Vol.-% Mischkarbiden. Der Werkstoff besitzt eine mittlere Korngröße von 0,4 µm. Das Rohmaterial weist eine Härte von 1760 HV 10 auf [Cer-04]. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs ist in Tabelle 3.2 dargestellt.

W	Co	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	Al	Cu	S
Basis	9,8	5,54	1,02	0,04	0,01	0,01	0,01	<0,005	<0,005	<0,005

*Tabelle 3.2: Chemische Zusammensetzung des Hartmetalls WC-12Co
(Angaben in Ma.-%) [Kie-11]*

Das Rohmaterial wurde als Stangenmaterial mit einem Durchmesser von 20 mm bezogen, das für die funkenerosive Bearbeitung in 4 mm breite Scheiben drahterodiert und deren Oberflächen geschliffen (Körnung A46) wurden.

3.1.3 Dielektrikum

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde das kohlenwasserstoffbasierte Dielektrikum HEDMA 111 (Fa. Letra AG) verwendet, um kleinere Spaltweiten gegenüber der Bearbeitung mit deionisiertem Wasser realisieren zu können. Dieses dielektrische Fluid weist eine Viskosität von 2,71 cSt (bei 20°) und eine Siedetemperatur von 228°C auf [HED-11].

3.2 Probenherstellung

Um die in dieser Arbeit dargestellten Untersuchungen durchzuführen, kamen verschiedene Werkzeug- und Messmaschinen zum Einsatz. Diese Anlagen dienten im Wesentlichen der Probenherstellung und einer begleitenden bzw. anschließenden Charakterisierung des Prozessverlaufes und der Prozessergebnisse.

3.2.1 Mikrofunkenerodiermaschine

Die innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen wurden an einer Mikroerodiermaschine vom Typ SX 100 HPM (Fa. Sarix) realisiert. Diese Anlage verfügt über drei synchronisiert arbeitende Achsen und wurde speziell für die Prozessvariante der Mikrobahnerosion ausgelegt. Durch eine integrierte NC-Steuerung und eine entsprechende CAD/CAM-Kette ist die Herstellung von 3D-Geometrien möglich. Die Abbildung 3.1 zeigt die Anlage und die unmittelbar am Prozess beteiligten Komponenten.

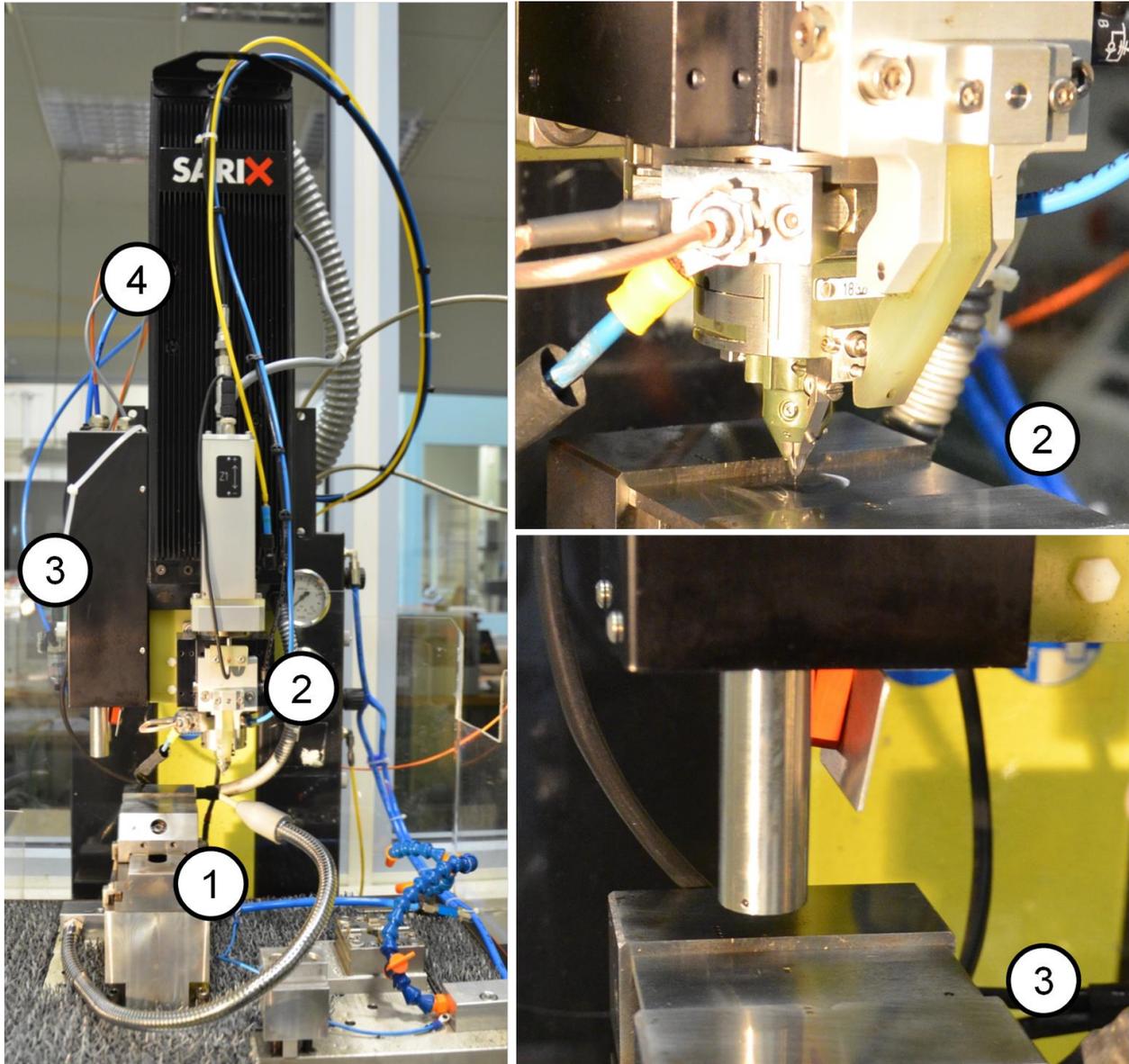


Abbildung 3.1: Bahnerodiermaschine SX 100 HPS (Fa. Sarix);

Die gesamte Anlage besteht aus einem beweglichen Maschinentisch mit Spülbecken und Schraubstock zur Werkstückeinspannung (1), einer Rotations-spindel mit einer automatischen Spannzange für die Werkzeugelektrodenachführung (2), einem integrierten konfokalen Weißlichtsensor (3), einem Mikroerodiergenerator (Relaxationsgenerator) (4), einem Dielektrikumaggregat, einer Steuerungseinheit und einer Bedienungskonsole. Am Maschinentisch kann das Werkstück mittels eines Schraubstocks eingespannt und in x- und y-Richtung mit einer maximalen Geschwindigkeit von 800 mm/min und einer maximalen Beschleunigung von 20 mm/s² bewegt werden. Dabei ist eine maximale Bewegung von 200 mm in x-Richtung und 150 mm in y-Richtung mit einer Achsauflösung von 0,1 µm und einer Positioniergenauigkeit von 2 µm möglich [Sar-10]. Bedingt durch die

kleinen Abmessungen der Werkzeugelektroden und des zu bearbeitenden Werkstücks wird bei dieser Prozessvariante die Spülung durch das Dielektrikum nicht durch eine konventionelle Badspülung, sondern durch ein Überspülen des Werkstücks realisiert (Abbildung 3.2). Das vom Maschinentisch aufgefangene Dielektrikum wird dann dem Dielektrikumaggregat zugeführt, dort aufbereitet und für den weiteren Prozess vorgehalten.



Abbildung 3.2: Spülung des Funkenpalts durch Überspülung des Werkstücks

Der Mikroerodiergenerator ist als Relaxationsgenerator ausgeführt und kann neben unterschiedlichen Impulsformen eine Leerlaufspannung von 60 bis 255 V, eine Pulsfrequenz von 1 bis 250 kHz und einen Entladestrom von 0,5 bis 50 A bei einer Entladedauer von 50 ns bis 2 μ s erzeugen [Sar-10].

Die Spindel erzeugt während des Erosionsprozesses eine Rotationsbewegung der Stabelektrode. Dies gewährleistet einen gleichmäßigen Werkzeugelektrodenabbrand an der Stirnseite der Werkzeugelektrode. Um diesen Werkzeugelektrodenverschleiß während des Prozesses zu kompensieren, wird der Zustellbewegung der Werkzeugelektrode in x-/y-Richtung eine Zustellung in z-Richtung überlagert (Abbildung 3.3). So wird ermöglicht, dass entsprechend eines Kompensationsfaktors, der im NC-Code hinterlegt ist, die verschleißbedingten Geometrieabweichungen an der gefertigten Kavität minimiert werden. Das grundlegende Konzept orientiert sich demnach an der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Uniform-Wear Methode [Raj-00, Ble-02].

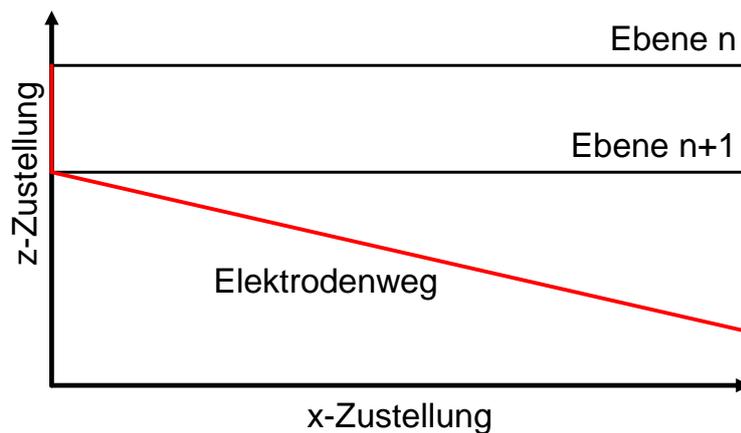


Abbildung 3.3: Werkzeugelektrodenweg bei der Fertigung einer Abtrageebene

Der tatsächliche stirnseitige Werkzeugelektrodenverschleiß wird durch das Antasten an einem Referenzpunkt auf dem Werkstück gemäß dem Ansatz von Tricarico et al. sequenziell während der Bearbeitung gemessen [Ble-01, Tri-00].

Sollte die verbleibende Werkzeugelektrodenlänge während der Bearbeitung unter einen kritischen Wert fallen, kann die Stabelektrode mittels einer Hochdruckspülung durch die Spindel, die als Pinole ausgeführt ist, automatisiert aus der pneumatischen Spannzange ausgeschoben werden. Durch diesen Prozess kann die Herstellung einer kompletten Kavität automatisiert erfolgen.

3.2.2 Integrierter konfokaler Weißlichtsensor

Der in dieser Arbeit verwendete konfokale Weißlichtsensor wurde direkt in den Maschinenaufbau der Mikrofunkenerodiermaschine integriert, um ihn in einem automatisierten sequenziellen Ablauf zur Vermessung von Kavitäten nutzen zu können. Die Funktionsweise entspricht der eines chromatisch konfokalen Sensors nach DIN EN ISO 25178. Grundlegend für diese Methode ist die chromatische Aberration optischer Linsen. Unter der chromatischen Aberration ist die Eigenschaft zu verstehen, dass Licht mit unterschiedlicher Farbe (Wellenlänge) in unterschiedlichem Abstand zur Linse fokussiert wird und diese somit eine jeweils andere Brennweite aufweist. In einem nach diesem Prinzip arbeitenden Sensor wird von einer polychromatischen Lichtquelle Licht ausgesendet. Das weiße Licht wird in einem Messkopf, der ein zweistufiges Linsensystem beinhaltet, ringförmig in seine Spektralfarben zerlegt, sodass am Ausgang des Messkopfes die Fokusslage einer jeden Wellenlänge ihren eigenen Abstand besitzt. Somit entsteht eine chromatisch codierte Linie entlang der Fokuslagen basierend auf den entsprechenden Wellenlängenbandbreiten. Durch die unterschiedlich starke Fokussierung der jeweiligen Spektralfarben des weißen Lichts wird auf einer zu untersuchenden Oberfläche nur eine

Wellenlänge scharf abgebildet. Das Licht dieser Wellenlänge wird im Messfleck an der Oberfläche reflektiert und in die Fokussieroptik im Messkopf zurückgestrahlt. Im angeschlossenen Spektrometer wird die Wellenlänge des chromatisch codierten Lichts gemessen und dem Schwerpunkt der vergleichsweise scharfen Verteilung ein entsprechender Höhenwert der Oberfläche zugeordnet. Der Aufbau eines konfokalen Weisslichtsensors ist in Abbildung 3.4 dargestellt [Mic-05].

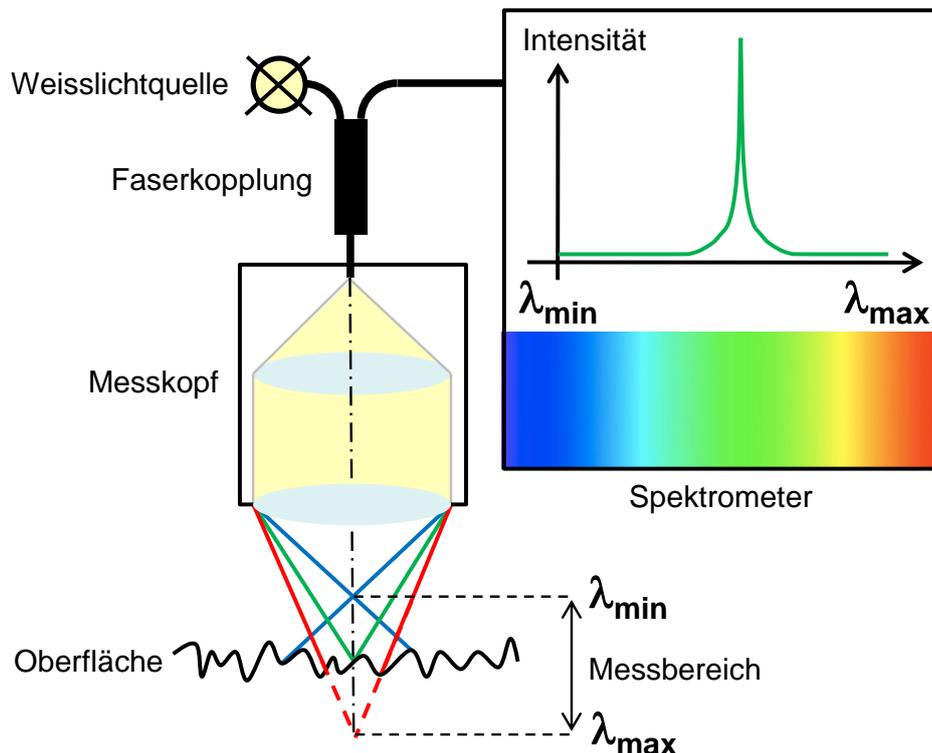


Abbildung 3.4: Messprinzip eines konfokalen Weißlichtsensors

Der Messbereich des Sensors wird durch die beiden Grenzwellenlängen λ_{\min} und λ_{\max} der Lichtquelle sowie durch die Linse festgelegt. Emittiert die Lichtquelle beispielsweise nur sichtbares Licht, so liegen die Grenzwellenlängen im blauen und roten Bereich des sichtbaren Regenbogenspektrums [Mic-05].

Die Messunsicherheit Δz des Verfahrens ist durch die Formel $\Delta z \sim \cos 2\alpha$ gegeben. Der Winkel α entspricht dabei der numerischen Apertur – also dem Öffnungswinkel der Sende- bzw. der Empfangsoptik. Je kürzer die Brennweite eines optischen Linsensystems, desto kleiner ist die Messunsicherheit. Der Abstand der Grenzbrennpunkte kann über entsprechende Linsen auf Werte zwischen wenigen 100 μm bis hin zu 25 mm eingestellt werden [Mic-05].

Um die Wellenlänge des reflektierenden Lichtes bestimmen zu können, wird in heutigen Spektrometern meist eine digitale CCD-Zeile eingesetzt. Diese

lichtempfindlichen Sensoren benötigen eine gewisse Lichtmenge bzw. eine Mindestbelichtungsdauer (die sogenannte Integrationszeit), um das einfallende Licht detektieren zu können. Der Kehrwert der Integrationszeit ist die Abtastfrequenz, mit der die Messpunkte aufgenommen werden. Aktuelle Sensortypen erlauben eine Abtastfrequenz von $f_a = 2000$ Hz und mehr [Mic-10].

Um eine Messung direkt an der Funkenerodiermaschine durchführen zu können, wurde in die Z-Achse der Anlage ein chromatisch konfokaler Weißlichtsensor (Typ C1/600, Fa. OPM) integriert. Die Messwertaufnahme erfolgt parallel für alle Wellenlängen. Die Leuchtdichte ist maximal für die Wellenlängen, für die sich die Oberfläche im Fokus befindet. Licht anderer Wellenlängen bildet einen weißen flächigen Bereich um den Fokuspunkt. Dieser sichtbare Bereich ist deutlich größer als der eigentliche Messfleck. Der tatsächliche Messfleck in der Mitte des „weißen Hofes“ beträgt $5\ \mu\text{m}$. Nur dieser Bereich wird für die Auswertung herangezogen. Der Sensor tastet mit diesem Messfleck immer den gesamten Messbereich von $600\ \mu\text{m}$ ab, sodass selbst große Höhenunterschiede im Profil aufgenommen werden können. In Abbildung 3.5 ist der verwendete Sensor dargestellt [Opm-12].

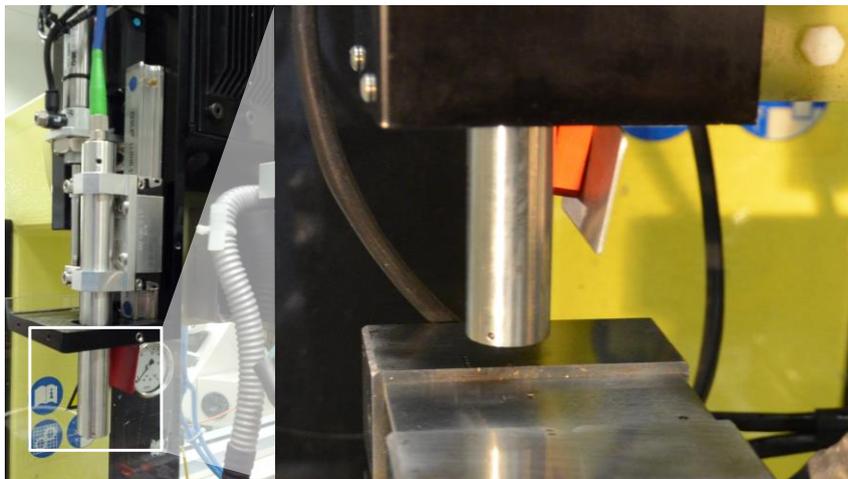


Abbildung 3.5: Integrierter konfokaler Weißlichtsensor

Die maximale Abtastfrequenz des verwendeten Sensors beträgt 1500 Hz. Um Alias-Effekte im gemessenen Oberflächenprofil zu vermeiden und das Nyquist-Kriterium zu erfüllen, darf die höchste auftretende Ortsfrequenz daher $f_o = 750$ Hz betragen. Die Ortsfrequenz setzt sich aus der Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und Oberfläche und der Abtastrate zusammen. Wenn also auch kleinste Unregelmäßigkeiten bzw. Wellenlängen im Profil aufgenommen werden sollen, muss die Abtastfrequenz hoch gegenüber der Abtastgeschwindigkeit sein [Opm-12].

Bei dieser Sensorvariante erfolgt die Profilabtastung koaxial. Dadurch wird das mögliche Auftreten einer einseitigen Abschattung deutlich reduziert. Die Profilaufnahme ist rotationssymmetrisch und weist keine Vorzugsrichtung auf. Dies bedeutet, dass das Messobjekt formtreu in beliebiger Messrichtung aufgenommen wird. In Tabelle 3.3 sind die technischen Daten des verwendeten Sensors dargestellt.

Abmessung	192 mm x Ø17,5 mm
Messbereich	600 µm
Nutzbare Auflösung	50 nm
Abtastfrequenz f_a	32 Hz bis 1500 Hz
Linearität	0,5 % des Messbereichs
Reproduzierbarkeit	$\sigma \leq 25$ nm
Arbeitsabstand	11 mm
Messfleck (Ø)	5 µm
Numerische Apertur	0,5
Oberflächenneigung	90° +/- 25°

Tabelle 3.3: Technische Daten des verwendeten konfokalen Weißlichtsensors [Opm-12]

3.2.3 Erfassung der Erosionsparameter

Um die Erosionsparameter während des Bearbeitungsprozesses analysieren zu können, wurde ein digitales Speicheroszilloskop vom Typ TDS 2024B (Fa. Tektronix) verwendet. Das Gerät kann gleichzeitig 4 Kanäle mit einer Abtastrate von 2 GS/s bei einer Bandbreite von 200 MHz verarbeiten. Mit einer entsprechenden Strommesszange wurde so parallel der zeitliche Strom- und Spannungsverlauf überwacht [TEK-06].

3.3 Probenbewertung

Die innerhalb dieser Arbeit gefertigten Probengeometrien wurden nach der Herstellung mit den in diesem Kapitel beschriebenen Einrichtungen und Bewertungsmethoden charakterisiert.

3.3.1 Lichtmikroskopische Messungen

Um Konturgenauigkeiten und Kantenradien von gefertigten Kavitäten und Werkzeugelektroden zu messen, wurde ein Auflichtmikroskop verwendet. Hierzu kam das optisch digitale Axio Imager.M1m Mikroskop der Fa. Zeiss zum Einsatz.

Dabei handelt es sich um ein Lichtmikroskop, das speziell für die Qualitätsprüfung und die Qualitätssicherung sowie für die Materialanalyse konzipiert wurde. Des Weiteren ist in das Mikroskop eine Digitalkamera des Typs AxioCam MRc5 integriert, um die Bilder zu digitalisieren und zu speichern. Sie besitzt 12 verschiedene Aufnahmemodi und verfügt über eine Auflösung von bis zu 5 Megapixeln. Die von der Kamera erstellten Bilder können dann mittels der Software Axio Vision Rel.4.6 weiter verarbeitet und analysiert werden. [Zei-09]

3.3.2 Konfokale Weißlichtmikroskopie

Um sehr exakte geometrische und topografische Messungen an den gefertigten Werkstücken vorzunehmen, wurde ein konfokales Messsystem μ surf der Fa. Nanofocus verwendet. Der enthaltene Messkopf besitzt ein konfokales Weißlicht-Mikroskop mit einer CCD⁷-Kamera und verschiedenen Objektiven. Das Mikroskop kann je nach Wahl im normalen Mikroskopmodus oder im konfokalen Modus betrieben werden [Nan-09]. Das Messprinzip ist dabei das gleiche wie bei dem in die Erodiermaschine integrierten Sensor (Kapitel 3.3.2).

In den hier zugrunde liegenden Untersuchungen wird dieses Messsystem vorwiegend zur Bestimmung von geometrischen Größen und Oberflächenkennwerten verwendet. Zur Beurteilung der Oberflächengüte wurde der arithmetische Mittenrauwert Ra ermittelt. Dies geschieht durch die Aufnahme eines Profilschans der Oberfläche einer Kavität mittels Weißlichtmikroskop und der anschließenden Analyse der Daten mit Hilfe der Software „MountainsMap Univeral“.

3.3.3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen

Bei der Rasterelektronenmikroskopie (kurz REM) wird ein Elektronenstrahl durch Magnetspulen abgelenkt, so dass er die Oberfläche der Probe Zeile für Zeile abtastet (rastert). Die durch eine starke Spannung beschleunigten Elektronen lösen Sekundärelektronen aus der Probe aus, die danach detektiert und ausgewertet werden. Die REM-Aufnahmen innerhalb dieser Arbeit wurden zum einen mit einem Feldemissions-REM des Typs LEO-1530 Gemini und zum anderen mit einem REM des Typs LEO EVO 50, beide Geräte von der Fa. Zeiss, angefertigt.

3.4 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, eine effiziente Methode bereitzustellen, die mittels einer automatisierten Parametersuche Erosionsparameter für die mikrobahnerosive Bearbeitung eines spezifischen Werkstoffs optimiert.

Zur Rationalisierung des Versuchsaufwands wird im Folgenden eine Methode der statistischen Versuchsplanung ausgewählt und deren Funktionsweise beschrieben. Darauf folgend wird die Vorgehensweise bei einer Regressionsanalyse vorgestellt, die zur Auswertung der messtechnisch erfassten Daten herangezogen wurde.

3.4.1 Auswahl der geeigneten DOE-Methode

Die grundlegende Basis für eine effiziente Versuchsplanung und aussagekräftige Ergebnisse ist, den Umfang der Versuche genau so groß zu wählen, dass eine hinreichende Genauigkeit in der Abbildung der Faktorwechselwirkungen (FWW) gewährleistet ist. Um dies zu erreichen, kommen DOE-Methoden zum Einsatz. Es existieren unterschiedliche Ansätze dieser Methoden, die für verschiedene Anwendungsbereiche oder Komplexität der Datenzusammenhänge entwickelt wurden.

In diesem Kapitel werden die gängigen DOE-Methoden gegenübergestellt sowie mit Hilfe einer Nutzwertanalyse (NWA) bewertet. Ziel dieser Bewertung ist es, eine DOE-Methode auszuwählen, die die Zusammenhänge der untersuchten Faktoren abbildet. Die berücksichtigten DOE-Methoden sind:

- Vollständig faktorielle Versuchspläne
- Fraktionell faktorielle Versuchspläne
- Plackett-Burman Versuchspläne
- Taguchi-Versuchspläne
- Zentral zusammengesetzte Versuchspläne

Die festgelegten Bewertungskriterien inklusive Gewichtungsfaktoren für die NWA sind im Folgenden dargestellt:

Bewertungskriterium	Gewichtungsfaktor
Versuchsaufwand	9
Untersuchung von zwei FWW	5
Untersuchung von drei und mehr FWW	2
Vermengung von FWW	5
Untersuchung von Nichtlinearitäten	9
Vertrauensniveau des Ergebnisses	8

Tabelle 3.4: Bewertungskriterien und zugehörige Gewichtungsfaktoren für die Nutzwertanalyse

Innerhalb der NWA werden die einzelnen DOE-Methoden hinsichtlich der Erfüllung der Bewertungskriterien bewertet. Die Punktvergabe erfolgt hier mit den Werten 1 bis 9, wobei ein höherer Wert eine große Erfüllung des jeweiligen Kriteriums repräsentiert. Die NWA ist in Tabelle 3.5 dargestellt, wobei ein jedes Ergebnis die Summe der Produkte aus Erfüllungsgrad und Gewichtungsfaktor der jeweiligen DOE-Methode darstellt.

Bewertungs-kriterium	Vollständig faktorielle Versuchs-pläne	Fraktionell faktorielle Versuchs-pläne	Placket-Burman Versuchs-pläne	Taguchi Versuchs-pläne	Zentral zusammen-gesetzte Versuchs-pläne
Versuchs-aufwand	1	7	9	8	6
gewichtet (9)	9	63	81	72	54
2 FWW	9	6	2	1	7
gewichtet (5)	45	30	10	5	35
3 FWW und mehr	9	6	2	1	7
gewichtet (2)	18	12	4	2	14
Vermengung von FWW	9	2	2	1	7
gewichtet (5)	45	10	10	5	35
Nicht-linearitäten	6	7	4	6	9
gewichtet (9)	54	63	36	54	81
Vertrauens-niveau	9	6	3	3	7
gewichtet (8)	72	48	24	24	56
Ergebnis	243	226	165	162	275

Tabelle 3.5: Nutzwertanalyse zur Auswahl einer passenden DOE-Methode

Das Ergebnis der NWA zeigt, dass sich die vollständig faktoriellen Versuchspläne sehr gut eignen, um die meisten der geforderten Bewertungskriterien zu erfüllen. Allerdings ist der Versuchsaufwand sehr hoch. Dieser gravierende Nachteil der Methode liegt darin begründet, dass mit

steigender Anzahl der zu untersuchenden Faktoren und Faktorstufen der Versuchsaufwand exponentiell wächst. Diese Methode ist somit für eine effiziente Vorgehensweise ungeeignet.

Aufgrund des reduzierten Versuchsumfangs existieren bei fraktionell faktoriellen Versuchsplänen Vorzeichenspalten, die mit anderen Spalten aus dem Versuchsplan identisch sind. Das hat zur Folge, dass nicht eindeutig zwischen den Effekten einzelner Faktoren und den FWW unterschieden werden kann. Dieses Verhalten wird als Vermengung bezeichnet. Sind mehrere Effekte miteinander vermengt, so bedeutet dies, dass bei der Versuchsauswertung nicht zwischen den Effekten unterschieden werden kann. Aus diesem Grund ist diese Art von Methode für die hier geforderten Anforderungen unzureichend und wurde an entsprechender Stelle negativ bewertet.

Plackett-Burman Versuchspläne bieten sich vor allem dann an, wenn eine Abschätzung vorher unbekannter FWW gemacht werden soll, aber der Versuchsaufwand möglichst klein sein muss. Dadurch ist aber eine nachgelagerte Anzahl von Bestätigungsversuchen notwendig, um ein valides Ergebnis zu erhalten. Zudem kann hier die Versuchsplanung nur in Blöcken ausgeführt werden. Es sind keine einzelnen Versuche integrierbar.

Bei Versuchsplänen nach Taguchi kann nur eine eingeschränkte Aussage über FWW getroffen werden. Diese Variante zielt vielmehr darauf ab, einzelne Prozessgrößen zu untersuchen und dabei bekannte Rauschfaktoren, die messtechnisch erfasst werden können, zu berücksichtigen. Eine Vermengung der FWW kann dementsprechend nicht ausgewertet werden. Diese Eigenschaft ist für den hier zu Grunde liegenden Anwendungsfall aber von zentraler Bedeutung.

Den höchsten Erfüllungsgrad der Bewertungskriterien erreichen die zentral zusammengesetzten Versuchspläne. Mit dieser Methode kann der Versuchsaufwand gegenüber einem vollständig faktoriellen Versuchsplan signifikant gekürzt werden. Zudem ist die Abbildung von mehrstufigen FWW sowie deren Vermengungen möglich. Das genaue Vorgehen bei einem zentral zusammengesetzten Versuchsplan mit einer anschließenden nichtlinearen Regression ist in den Kapiteln 3.4.2 und 3.5 beschrieben.

3.4.2 Zentral zusammengesetzter Versuchsplan

Ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan besteht aus einem vollständig faktoriellen oder einem fraktionell faktoriellen Versuchsplan mit einer gewissen Mindestauflösung (Abbildung 3.6). Dieser zunächst zweistufige Versuchsplan,

der in der graphischen Darstellung bei drei Faktoren einem Würfel entspricht, wird um einen Zentrumspunkt und einen Stern ergänzt. In der Abbildung 3.6 in Rot dargestellt. Die Anzahl der Sternpunkte ergibt sich aus der Anzahl der Faktoren. Wie in Abbildung 3.6 zu erkennen, besitzt der Versuchsplan mit der Faktorenanzahl $k = 3$ insgesamt 6 Sternpunkte, d.h., zwei Werte für jeden Faktor, die jeweils mit $+a$ bzw. $-a$ bezeichnet werden [Kle-11].

Der Zentrumspunkt wird mit 0 bezeichnet und liefert Informationen über die Krümmung des Systems. Er ist daher von zentraler Bedeutung und sollte daher wiederholt realisiert werden [Hof-11]. Tabelle 3.6 zeigt die Faktorstufenkombinationen eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans für die Faktorenanzahl $k = 3$.

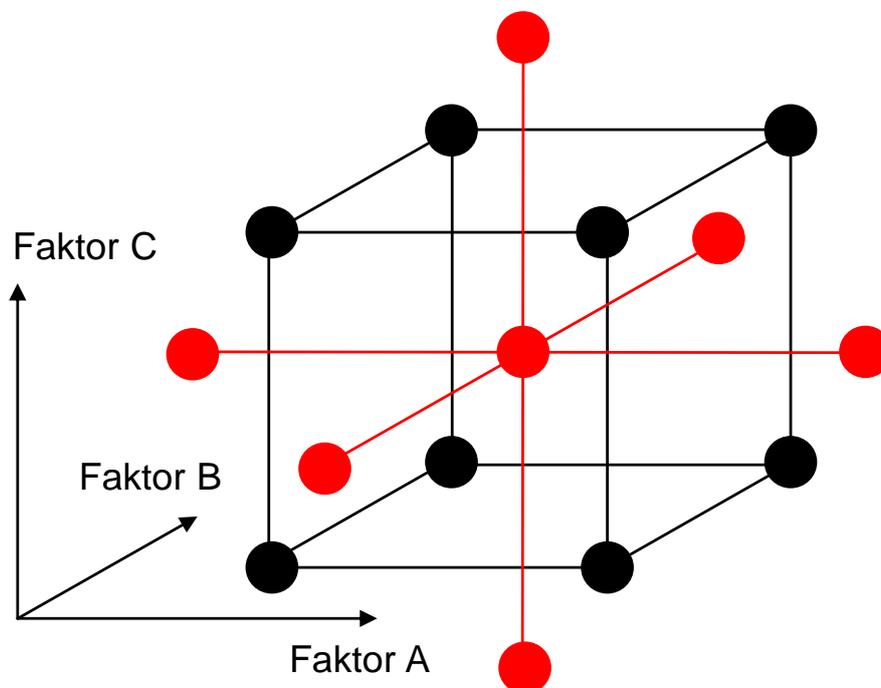


Abbildung 3.6 : Zentral zusammengesetzter Versuchsplan [Hof-11]

Die beiden Stufenwerte des innenliegenden Würfels werden mit $+1$ bzw. -1 bezeichnet. Die Extremstellen $+a$ und $-a$ stehen für die Sternpunkte [Hof-11].

Syst. Nr.	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Erläuterung
1	-	-	-	„Würfel“ Vollständig faktoriell
2	+	-	-	
3	-	+	-	
4	-	+	+	
5	+	-	-	
6	+	-	+	
7	+	+	-	
8	+	+	+	
9	-a	0	0	„Stern“ Jeder Faktor getrennt
10	+a	0	0	
11	0	-a	0	
12	0	+a	0	
13	0	0	-a	
14	0	0	+a	
15	0	0	0	„Zentrum“ n_0 mal wiederholt, hier viermal
16	0	0	0	
17	0	0	0	
18	0	0	0	

Tabelle 3.6: Aufbau eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans für drei Faktoren [Kle-11]

Zentral zusammengesetzte Versuchspläne eignen sich zur Untersuchung von Prozessen, bei denen ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und Zielgröße(n) besteht. In Tabelle 3.7 sind die Aufgaben der jeweiligen Versuchsplanbestandteile dargestellt [Kle-11].

Bestandteil des Versuchsplans	Ziel der Untersuchung
Fraktionell faktorieller Versuchsplan	Erfassen der Haupteffekte und gemischter Wechselwirkungen
Sternpunkte	Erfassen quadratischer Wechselwirkung
Zentrumspunkt	Approximation des statistischen Fehlers, Nachweis der Nichtlinearität

Tabelle 3.7: Aufgabe der jeweiligen Versuchsplanteile [Kle-11]

3.5 Nichtlineare Regression

Die Regressionsanalyse dient dazu, die Versuchsergebnisse an ein mathematisches Modell anzupassen, welches den Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen beschreibt. Das mathematische Modell muss vorgegeben werden. Die Daten, die aus den Versuchen generiert werden, werden dann bestmöglich an das mathematische Modell angepasst [Kle-11].

Da die Zusammenhänge der in dieser Arbeit untersuchten Prozessparameter nichtlineare Eigenschaften aufweisen, wird an dieser Stelle nicht näher auf lineare Regressionsmodelle eingegangen.

Unter der Annahme einer nichtlinearen Abhängigkeit zwischen Zielgröße und Einflussparametern kann ihr Zusammenhang nur ungenügend durch eine lineare Regression beschrieben werden. Zur Untersuchung nichtlinearer Abhängigkeiten werden daher Regressionsmodelle zweiter Ordnung herangezogen [Kle-11]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_{11} \cdot x_1^2 + \beta_{22} \cdot x_2^2 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad \text{Formel 3.1}$$

In diesem Beispiel handelt es sich um ein normiertes quadratisches Modell, welches die Abhängigkeit der Zielgröße y von zwei Faktoren x_1 und x_2 beschreibt. In allgemeiner Form enthält ein quadratisches Modell mit k Faktoren [Kle-11]:

- 1 Koeffizienten β_0
- k Koeffizienten $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$
- $\frac{k \cdot (k + 1)}{2}$ Koeffizienten $\beta_{11}, \beta_{12}, \dots, \beta_{kk}$

Die Koeffizienten β_i der linearen Terme x_1, x_2, \dots, x_k stehen für die Effekte der Faktoren A, B, ..., K.

Bei der nichtlinearen Regression kommen die Koeffizienten mit zweistelligem Index (z.B. β_{12}) hinzu. Sie beschreiben einerseits den quadratischen Effekt der Faktoren (z.B. β_{11} für x_1^2) aber auch die Wechselwirkung der einzelnen Faktoren (z.B. β_{12} für $x_1 \cdot x_2$). Zur Bestimmung quadratischer Effekte werden Versuchspläne mit mehr als 2 Faktorstufen benötigt [Kle-11].

4 Automatisierte Parametersuche

Bei jeder Bearbeitung mittels Mikrofunktenerosion eines Materials, für das noch kein Erfahrungswissen vorliegt, besteht die Herausforderung, die passenden Erosionsparameter aufwandsoptimal zu erarbeiten. Für die Schruppbearbeitung liegen dabei meist passende Parameter für ganze Werkstoffgruppen vor. Für die Feinschlichtbearbeitung allerdings ist es wichtig, dass die Parameter exakt aufeinander abgestimmt sind, um das bestmögliche Prozessergebnis zu erzielen. Konventionell werden hierfür einzelne Versuchsreihen oder ganze Versuchspläne durchgeführt und die Testergebnisse an separaten Messmaschinen beurteilt. Diese Vorgehensweise ist jedoch sehr zeitintensiv, was sich im Formenbau besonders negativ auswirkt, weil dabei arbeitsvorbereitende Maßnahmen lediglich auf die Losgröße eins umgelegt werden können.

Basierend auf dieser Herausforderung wurde zum Ziel gesetzt, eine Vorgehensweise zu entwickeln, mit der es möglich ist, systematisch und effizient geeignete Erosionsparameter für die Mikrobahnerosion zu erarbeiten. Zudem wurde die entstandene Methodik in einem automatisierten Ablauf umgesetzt, um dadurch auch von Seiten des Maschinenbedieners einen aufwandsoptimierten Prozess zu schaffen (Abbildung 4.1).

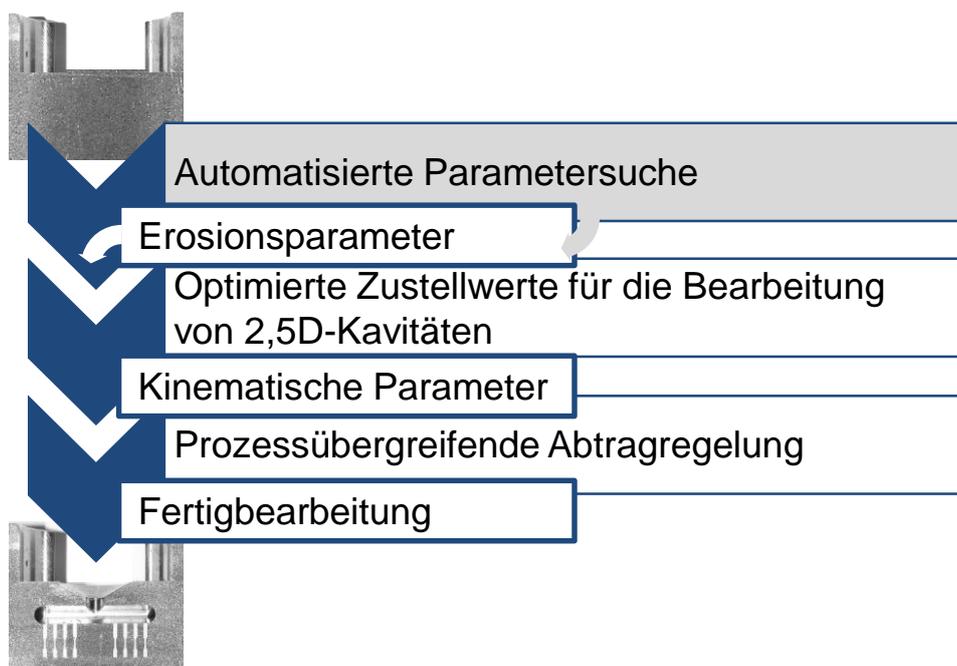


Abbildung 4.1: Eingliederung in den automatisierten Prozessablauf

4.1 Auswahl der zu beurteilenden Ergebnisgröße

Bei einer Bauteilfertigung sind meist drei Ergebnisgrößen von besonderer Relevanz: die Position der zu fertigenden Strukturen auf dem Werkstück, die Maßhaltigkeit der einzelnen Geometriefeatures und die durch den Erosionsprozess erzeugte Oberflächenrauheit an der Bauteiloberfläche.

Die Positioniergenauigkeit ist eine Eigenschaft der Werkzeugmaschine und kann nicht durch den Erosionsprozess beeinflusst werden. Aus diesem Grund wird sie hier nicht weiter betrachtet.

Die Maßhaltigkeit wird zwar durch die Erosionsparameter beeinflusst, sie kann aber durch Erfahrungswerte des lateralen Funkenspalts, geeigneter kinematischer Parameter (Kapitel 5) und des Verschleißverhaltens der Werkstoffpaarung aus Werkstück- und Werkzeugelektrodenmaterial, ergänzt durch eine Abtragsregelung, wie in Kapitel 6 dargestellt, gewährleistet werden. Eine geometrische Gestaltabweichung der erzeugten Geometrie bei steigender Tiefe der Kavität ist dabei minimal, da es durch den nahezu prozesskraftfreien Abtrag, im Gegensatz zur zerspanenden Bearbeitung, nicht zu einer Abdrängung des Werkzeugs kommt.

Die Oberflächenrauheit hingegen wird unmittelbar durch die Erosionsparameter der abschließenden Feinschlichtbearbeitung beeinflusst. Ein Anstieg oder ein Absenken der charakteristischen Größen hat eine unmittelbare Auswirkung auf die Oberflächengüte. Diese Ergebnisgröße ist direkt am Bauteil mess- und damit beurteilbar. Aus diesem Grund wurde sie als Ergebnisgröße für die automatisierte Parametersuche zur effizienten Erarbeitung von Feinschlichtparametern ausgewählt.

4.2 Auswahl der betrachteten Prozessparameter

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, ist die Oberflächenrauheit in Form des arithmetischen Mittenrauwerths R_a ein Indiz für die Eignung der Prozessparameter für die Feinschlichtbearbeitung eines spezifischen Werkstückmaterials. Um eine effiziente Parametersuche durchzuführen, ist es von zentraler Bedeutung diejenigen Parameter auszuwählen, die bei gegebenen Bedingungen variabel gestaltet werden können und einen maßgeblichen Einfluss auf das Prozessergebnis bzw. die Oberflächenrauheit haben. In Abbildung 4.2 ist ein Diagramm nach Ishikawa dargestellt, das die signifikantesten Einflussfaktoren beinhaltet. Die klassischen Haupteinflussfaktoren „Mensch“ und „Milieu“ sind hier nicht berücksichtigt, da diese für den stattfindenden Prozess als gegeben und konstant angesehen werden.

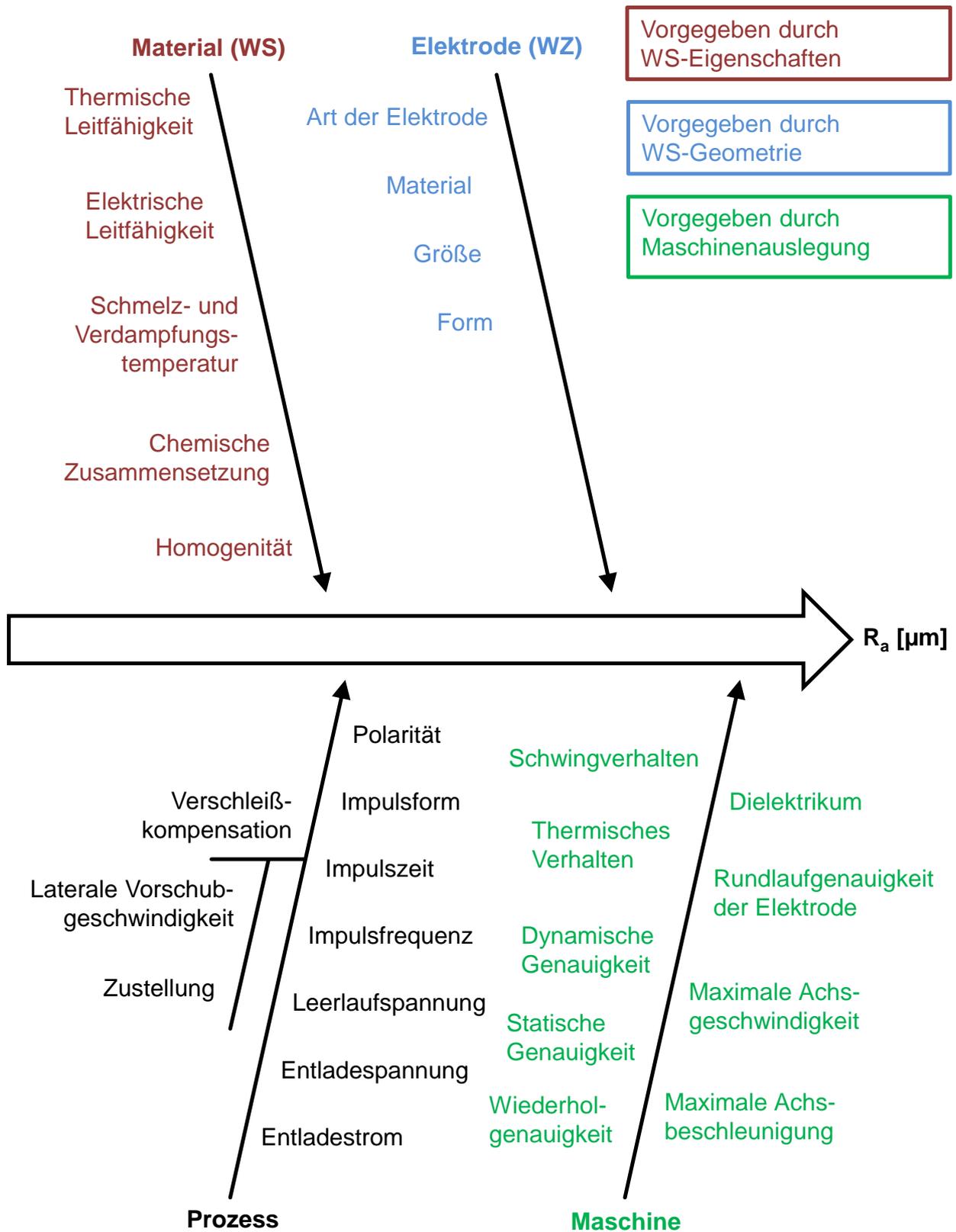


Abbildung 4.2: Einflussfaktoren auf die Oberflächenrauheit bei der Mikrobahnerosion (Diagramm nach Ishikawa)

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Haupteinflussfaktoren „Material“, „Werkzeugelektrode“ und „Maschine“ einen Einfluss auf das betrachtete Prozessergebnis haben, diese aber bei einer Fertigung mit vorhandenen Betriebsmitteln vorgegeben sind.

Das Werkstückmaterial ist für den Prozess vorgegeben, da hier bei der Planung eines Bauteils nur bedingt Rücksicht auf Materialeigenschaften genommen wird, die einen optimalen Erosionsprozess gewährleisten. Der Werkstoff wird vielmehr hinsichtlich des Einsatzzwecks des entstehenden Bauteils ausgewählt, wie bspw. die Verschleißbeständigkeit bei der Abformung einer Kavität.

Die Werkzeugelektrode ist maßgeblich durch die vorgegebene Geometrie bzw. der enthaltenen Geometriedetails vorgegeben. Die Größe, Form und Art der Werkzeugelektrode sind unmittelbar durch die Geometrie beeinflusst. Diese muss so ausgeführt sein, dass die kleinsten Innenradien und Nutbreiten unter Berücksichtigung des lateralen Funkenspalts abgebildet werden können. Als Werkzeugelektrodenmaterial wird bei der Mikrobahnerosion aufgrund des Verschleißverhaltens und der Steifigkeit Hartmetall verwendet.

Da es sich hier um eine Parametersuche bei gegebenen Betriebsmitteln handelt, werden die Eigenschaften der Maschine hier nicht mit berücksichtigt, da diese für einen speziellen Prozess nicht ohne weiteres modifiziert werden können. Diese Eigenschaften unterliegen der Maschinenauslegung.

Die Gruppe der variablen Parameter, die das Prozessergebnis beeinflussen, sind unter dem Haupteinflussfaktor „Prozess“ zu finden. Die Einflussfaktoren „laterale Vorschubgeschwindigkeit“ und „Zustellung“ haben unter der Voraussetzung einer korrekten Verschleißkompensation bei 2,5D-Kavitäten keinen Einfluss auf die Oberflächenrauheit [Hau-08] und werden deshalb in der automatisierten Parametersuche nicht weiter berücksichtigt. Die Werkzeugelektrode ist aufgrund der stattfindenden Umkehrung des Verschleißeffektes bei kürzer werdenden Pulszeiten und kleinen Entladeenergien immer kathodisch gepolt. Der genaue Sachverhalt ist in Kapitel 2.1 dargestellt. Die Impulsform hängt maßgeblich von der Art und den Möglichkeiten des Generators ab. Über die Form des Strom- bzw. Spannungsverlaufs kann die Oberflächengüte maßgeblich beeinflusst werden. Dieser Grundeinstellungswert ändert sich aber für die Feinschlichtbearbeitung von unterschiedlichen Materialien nicht. Die Leerlaufspannung ist erfahrungsgemäß für die Bearbeitung von verschleißfesten Werkstoffen immer im Bereich von $u_0 = 90 \text{ V}$. Dieser Wert gewinnt erst an Bedeutung, wenn er in Relation zur Entladespannung u_e gesetzt wird.

Die restlichen Erosionsparameter beeinflussen die Oberflächengüte maßgeblich und werden damit für die Ausarbeitung einer automatisierten Vorgehensweise herangezogen. Die Parameter sind im Folgenden aufgeführt:

- Impulszeit t_i
- Pulsfrequenz f_p
- Entladespannung u_e
- Entladestrom i_e

Durch die Parameter t_i , u_e und i_e kann gezielt die Entladeenergie W_e eingestellt werden, die für den funkenerosiven Materialabtrag verantwortlich ist (siehe Kapitel 2.1). Die zusätzliche Einbeziehung der Pulsfrequenz f_p und damit der Pausendauer t_0 berücksichtigt zusätzliche werkstückwerkstoffliche Einflüsse, wie die Wärmeleitfähigkeit, und prozessbedingte Einflüsse, wie das hinreichende Abführen der Abtragspartikel aus dem Funkenspalt.

Im weiteren Vorgehen werden die Werte der identifizierten Parameter in den in Tabelle 4.1 dargestellten Bereichen variiert.

Prozessparameter	Minimum	Maximum
t_i [μ s]	0,3	3
f_p [kHz]	10	250
u_e [V]	10	80
I [-]	10	100

Tabelle 4.1: Parameter und deren Wertebereiche für die automatisierte Parametersuche

Dabei ist zu beachten, dass der Wert für die Stromstärke I ein Maschinenparameter ist und daraus nicht die physikalische Größe der Entladespannung i_e direkt abgeleitet werden kann. Da es sich bei der Parametersuche um eine Vorgehensweise handelt, die die Eingangsparameter für die Maschine und deren Auswirkungen auf das Prozessergebnis ermittelt, ist die tatsächliche Stromstärke nicht vorrangig von Bedeutung.

4.3 Definition einer Testgeometrie

Die maßgeblichen Kriterien für die Definition von Testkavitäten zur Ermittlung der optimalen Erosionsparameter sind die universelle Einsetzbarkeit bei verschiedenen Werkzeugelektrodengrößen und die flächen- sowie fertigungszeitoptimierte Herstellung.

Da bei der Formeinsatzherstellung die Kavität in der Regel in die Mitte des Werkstückes eingebracht wird und diese im Mikrobereich im Vergleich zur Größe des gesamten Formeinsatzes klein ist, wurde eine linienförmige Testgeometrie festgelegt, die 27 Mal nebeneinander auf dem Werkstück ausgeführt wird. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass sie in Randbereiche eines Formeinsatzes eingebracht werden kann, ohne dessen Funktionsflächen oder Flächen, die bei der Herstellung der Kavität bearbeitet werden, zu verletzen. Die Abbildung 1.1 zeigt die definierten Testkavitäten für die automatisierte Parametersuche.

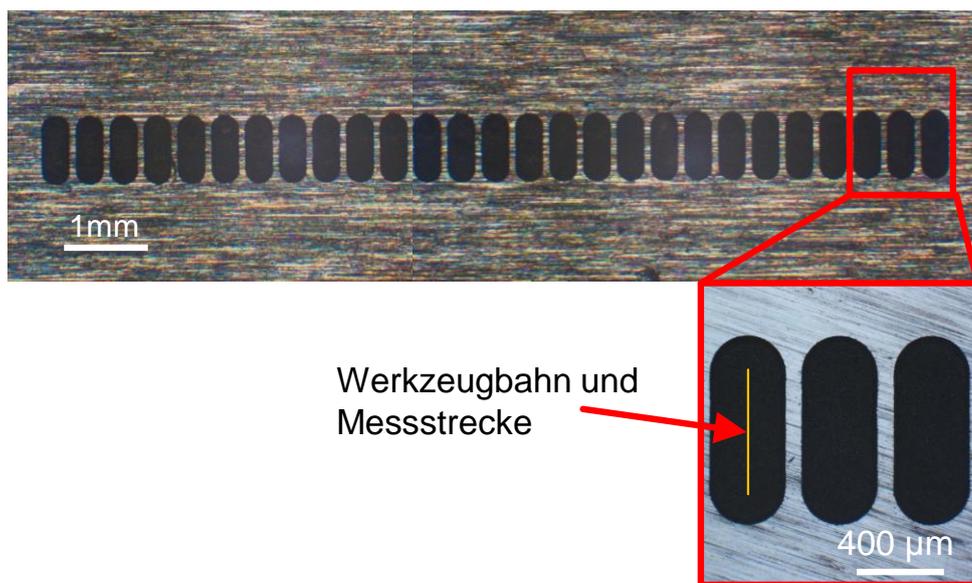


Abbildung 4.3: Testkavität für die automatisierte Parametersuche

Die 27 Testkavitäten, aus denen sich die Gesamtstruktur zusammensetzt, weisen eine Länge von $L = 600 \mu\text{m}$ und eine Tiefe von $T = 20 \mu\text{m}$ auf, was gleichzeitig die Messstrecke für den anschließenden Linienscan der Oberflächenrauheit darstellt.

In dem Beispiel in Abbildung 4.3 wurde die Geometrie mit einer Werkzeugelektrode mit einem Durchmesser von $D = 300 \mu\text{m}$ hergestellt. Weil im auszuführenden Programm nur der Werkzeugpfad und nicht dessen geometrische Abmessungen hinterlegt sind, können auch kleinere Werkzeugelektroden Durchmesser verwendet werden, ohne das Programm zur Fertigung zu modifizieren.

4.4 Implementierung einer automatisierten Parametersuche

Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte bei der entwickelten automatisierten Parametersuche vorgestellt. Zudem werden die mathematischen Zusammenhänge beschrieben, deren Lösung zum Erhalt der optimierten Erosionsparameter führen.

4.4.1 Vorgehensweise bei der Parametersuche

In einem ersten Schritt der Parametersuche wird als Arbeitsvorbereitung das Werkstück in das Koordinatensystem der Maschine eingemessen und die Werkzeugelektrode entsprechend über einem Referenzpunkt für die Herstellung der Testkavitäten positioniert. Im Anschluss wird mittels einer in LabView programmierten Benutzeroberfläche die Parametersuche gestartet. Ab diesem Zeitpunkt sind keine manuellen Schritte mehr erforderlich.

Innerhalb der vom Hauptprogramm gesteuerten Routine werden nacheinander alle 27 Testkavitäten entsprechend der Abbildung 4.3 gefertigt. Zur Herstellung jeder einzelnen Geometrie wird eine andere Parameterkombination der in Kapitel 4.2 ausgewählten Prozessgrößen verwendet. Diese Parameterkombinationen wurden entsprechend der in Kapitel 3.4.1 ausgewählten DOE-Methode definiert. Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 zeigen die festen und die variablen Prozessgrößen sowie die Ausprägung der Variation. Diese liegt in dem durch den Generator der Erodiermaschine vorgegebenen Prozessfenster, wie in Kapitel 4.2 beschrieben. Die Faktorenabstufung von f_i , t_i , I und u_e erfolgt dabei nach der Vorgehensweise eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans (Kapitel 3.4.2).

Bearbeitungsstrategie	pendelnde Werkzeugelektrodenbewegung keine Bahnüberlappung					
Elektroden, Prozessmedium	Werkzeugelektrode: Stabelektrode (WC-6Co, D = 300 μm) Dielektrikum = Hedma111					
Prozessparameter	Polarität der Werkzeugelektrode	-	t_i [μs]	var.	Korrekturfaktor	0
	u_0 [V]	90	f_p [Hz]	var.	Zustellung [μm]	0,9
	u_e [V]	var.	Impulsform	13	Technologie-typ	4000
	i_e [A]	var.	Servo-verstärkung	230	GAP Frontal [μm]	2,0

Tabelle 4.2: Feste und variable Prozessgrößen bei der Parametersuche

Syst. Nr.	f_i [kHz]	t_i [μ s]	I [-]	u_e [V]	Erläuterung
1	70	0,9	30	23	Vollständig faktoriell
2	190	0,9	30	23	
3	70	2,1	30	23	
4	190	2,1	30	23	
5	70	0,9	70	23	
6	190	0,9	70	23	
7	70	2,1	70	23	
8	190	2,1	70	23	
9	70	0,9	30	67	
10	190	0,9	30	67	
11	70	2,1	30	67	
12	190	2,1	30	67	
13	70	0,9	70	67	
14	190	0,9	70	67	
15	70	2,1	70	67	
16	190	2,1	70	67	
17	10	1,5	50	45	Sternpunkte
18	250	1,5	50	45	
19	130	0,3	50	45	
20	130	3,0	50	45	
21	130	1,5	10	45	
22	130	1,5	100	45	
23	130	1,5	50	10	
24	130	1,5	50	80	
25	130	1,5	50	45	Zentrum
26	130	1,5	50	45	
27	130	1,5	50	45	

Tabelle 4.3: Variation der Prozessgrößen bei der Parametersuche

Da bei dem konfokalen Weißlichtsensor aus Kapitel 3.3.2 ein Lichtpunkt auf die Oberfläche des Bauteils fokussiert und das rückgestrahlte Licht aufgefangen und ausgewertet wird, ist von zentraler Bedeutung, dass sich keine Verschmutzungen oder Dielektrikumrückstände auf der Bauteiloberfläche befinden. Um dies sicher zu stellen, werden die Kavitäten vor einem Messvorgang an der Maschine mit Druckluft für $t_b = 7$ s trocken und sauber geblasen. Hierzu hat sich ein Luftdruck von $p_b = 2$ bar aus einer Düse ($D_n = 3$ mm; $\varphi = 90^\circ$) im Abstand von 30 mm über dem Bauteil bei einer

gleichzeitigen linearen Bewegung entlang der Testgeometrien als zielführend erwiesen.

Im Anschluss an die Reinigung der Kavitäten erfolgt das Erfassen des Oberflächenprofils entlang der Werkzeugbahn. Dies hat den Vorteil, dass mit derselben Methode die Fertigungsergebnisse unterschiedlicher Werkzeug-elektrodendurchmesser untersucht werden können, da so immer eine ebene Messstrecke zur Verfügung steht, die unterhalb der Rotationsachse der Werkzeugelektrode gefertigt wurde. Durch den überwiegend stirnseitigen Verschleiß und die Rotation der Werkzeugelektrode ist gewährleistet, dass auch bei kleinsten Werkzeugelektrodendurchmessern dieser Bereich von der Kantenverrundung unbeeinflusst bleibt. Jede einzelne Kavität wird dabei drei Mal gemessen, um das Ergebnis statistisch abzusichern. Die im Programm hinterlegten Sensorparameter für das Erfassen der Oberflächendaten und deren Auswertung sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Abtastfrequenz f_a	100 Hz
Scangeschwindigkeit	0,5 mm/s
Gaußfilter λ	0,08 mm

Tabelle 4.4: Sensorparameter zum Erfassen und Auswerten der Oberflächenrauheit

Auf den Messvorgang folgen dann die Berechnungen der optimalen Erosionsparameter basierend auf den 81 Datensätzen der Oberflächenrauheit aus den Versuchen der einzelnen Faktorkombinationen. Diese Vorgehensweise ist im folgenden Kapitel 4.4.2 ausführlich beschrieben. Daran anschließend werden die Werte entsprechend den Ergebnissen einer nichtlinearen Regressionsanalyse ausgegeben. Die Abbildung 4.4 zeigt den Ablauf der gesamten Prozessabfolge. Die in Gelb gekennzeichneten Felder beinhalten die im Folgenden beschriebenen mathematischen Operationen.

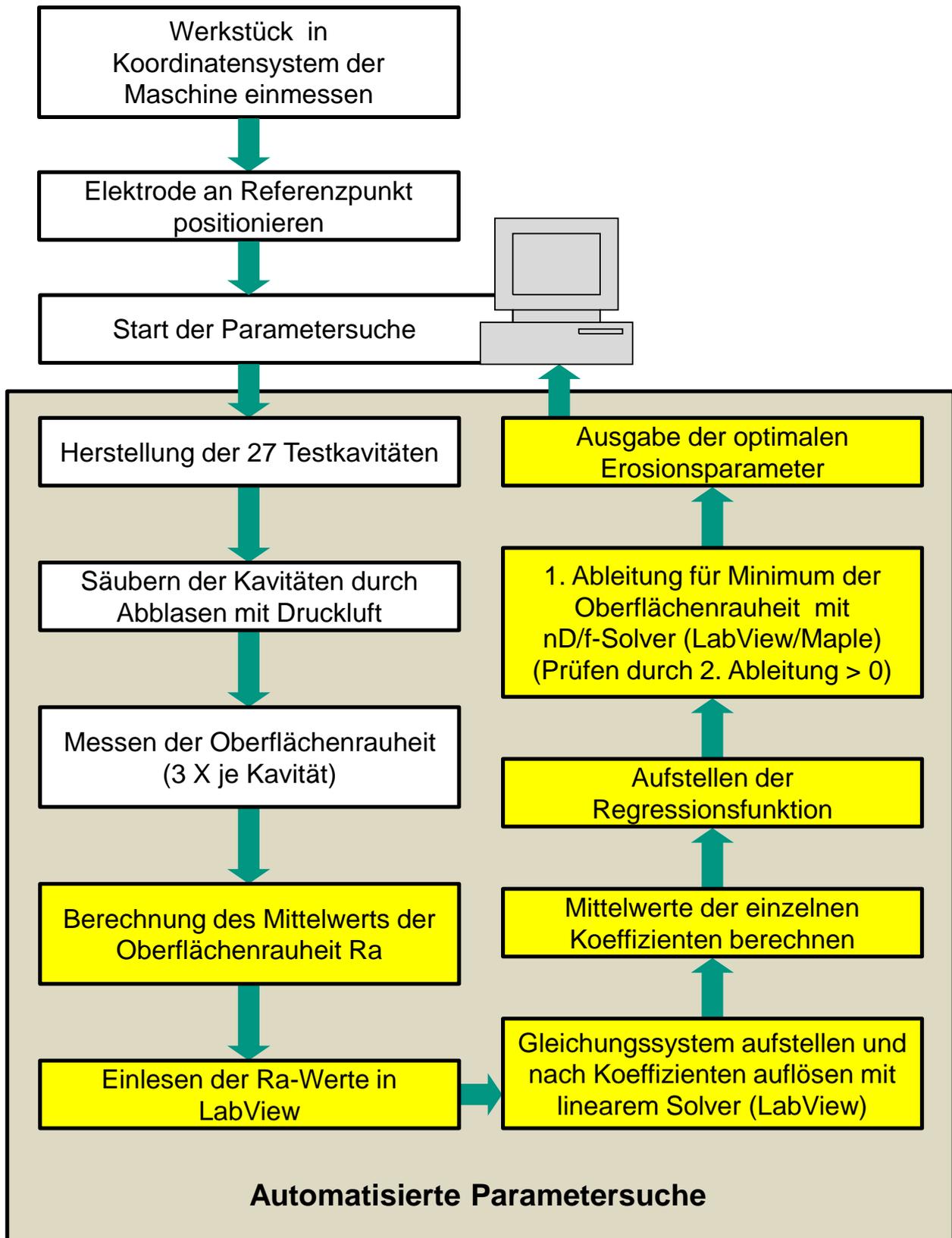


Abbildung 4.4: Prozessabfolge bei der automatisierten Parametersuche

4.4.2 Mathematische Auswertung der Messergebnisse

Nach dem automatischen Einlesen der Datei, die die 81 Messdaten beinhaltet, werden diese auf eine zuvor vorgegebene Anzahl an Dezimalstellen gerundet, um den Rechenaufwand für die nachfolgenden Prozessschritte zu minimieren.

Anschließend wird für jede Faktorstufenkombination der Mittelwert gebildet. Mit den Mittelwerten wird dann ein Gleichungssystem aufgestellt. Dies stellt das mathematische Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Oberflächenrauheit und den Systemvariablen dar. Das Gleichungssystem basiert auf der Grundlage einer nichtlinearen Regression, wie sie in Formel 3.1 dargestellt ist.

Bei jeder Gleichung des Systems wird der gemittelte Ra-Wert als Zielgröße und die Faktoren der zugehörigen Faktorstufenkombination eingesetzt. Die Variablen der Gleichungen sind die Koeffizienten des Modells $\beta_0, \dots, \beta_{1234}$ zur Beschreibung linearer und quadratischer Effekte. Diese fungieren als konstante Multiplikatoren vor den Faktoren des Modells und ermöglichen in diesem Fall die Beschreibung des mathematischen Zusammenhangs zwischen den Erosionsparametern f_i , t_i , l , u_e und der Zielgröße Ra.

$$\begin{aligned} Ra = & \beta_0 + \beta_1 \cdot f_i + \beta_2 \cdot t_i + \beta_3 \cdot l + \beta_4 \cdot u_e + \beta_{11} \cdot f_i^2 + \beta_{22} \cdot t_i^2 + \beta_{33} \cdot l^2 + \beta_{44} \cdot u_e^2 \\ & + \beta_{14} \cdot f_i \cdot u_e + \beta_{24} \cdot t_i \cdot u_e + \beta_{34} \cdot l \cdot u_e + \beta_{23} \cdot t_i \cdot l + \beta_{123} \cdot f_i \cdot t_i \cdot l + \beta_{1234} \cdot f_i \cdot t_i \cdot l \cdot u_e \end{aligned}$$

Formel 4.1

Da in dem Modell insgesamt 15 Koeffizienten vorkommen und durch die Versuche 27 Gleichungen zur Verfügung stehen, werden drei verschiedene Gleichungssysteme mit je 15 Gleichungen erstellt, mit denen alle Faktorstufenkombinationen erfasst werden können. Wichtig hierbei ist, dass alle Gleichungssysteme die Stern- und Zentrums kombinationen beinhalten (Faktorstufenkombinationen 17 bis 25 in Tabelle 4.3), da diese zur Ermittlung des nichtlinearen Charakters der Zusammenhänge notwendig sind.

In der entwickelten Routine werden folgende Gleichungssysteme, zusammengesetzt aus den Faktorkombinationen FK aus Tabelle 4.3, zur Auswertung herangezogen:

- Gleichungssystem 1: FK 1, FK 2, FK 3, FK 4, FK 5, FK 6, FK 17, FK 18, FK 19, FK 20, FK 21, FK 22, FK 23, FK 24, FK 25
- Gleichungssystem 2: FK 7, FK 8, FK 9, FK 10, FK 11, FK 26, FK 17, FK 18, FK 19, FK 20, FK 21, FK 22, FK 23, FK 24, FK 25

- Gleichungssystem 3: FK 12, FK 13, FK 14, FK 15, FK 16, FK 27, FK 17, FK 18, FK 19, FK 20, FK 21, FK 22, FK 23, FK 24, FK 25

Die Koeffizienten β_k und β_{kk} dieser linearen Gleichungssysteme werden darauf folgend mittels eines Solvers im Programm berechnet und anschließend der Mittelwert aus den drei Ergebnissen gebildet:

$$\bar{\beta}_k = \frac{\beta_{k1} + \beta_{k2} + \beta_{k3}}{2} ; \quad \bar{\beta}_{kk} = \frac{\beta_{kk1} + \beta_{kk2} + \beta_{kk3}}{2} \quad \text{Formel 4.2}$$

Mit den ermittelten Koeffizienten wird eine neue Funktion entsprechend der nichtlinearen Regression gebildet, die den mathematischen Zusammenhang zwischen Oberflächenrauheit und den Erosionsparametern im untersuchten Parameterfenster vollständig beschreibt:

$$\begin{aligned} \text{Ra}(f_i, t_i, l, u_e) = & \bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_1 \cdot f_i + \bar{\beta}_2 \cdot t_i + \bar{\beta}_3 \cdot l + \bar{\beta}_4 \cdot u_e + \bar{\beta}_{11} \cdot f_i^2 + \bar{\beta}_{22} \cdot t_i^2 + \bar{\beta}_{33} \cdot l^2 + \bar{\beta}_{44} \cdot u_e^2 \\ & + \bar{\beta}_{14} \cdot f_i \cdot u_e + \bar{\beta}_{24} \cdot t_i \cdot u_e + \bar{\beta}_{34} \cdot l \cdot u_e + \bar{\beta}_{23} \cdot t_i \cdot l + \bar{\beta}_{123} \cdot f_i \cdot t_i \cdot l + \bar{\beta}_{1234} \cdot f_i \cdot t_i \cdot l \cdot u_e \end{aligned}$$

Formel 4.3

Zur Berechnung der optimalen Erosionsparameter wird die Funktion jeweils nach den vier Variablen abgeleitet und jede Ableitung gleich null gesetzt, um deren Extremwerte zu bestimmen:

$$\frac{\partial \text{Ra}}{\partial f_i} = 0; \quad \frac{\partial \text{Ra}}{\partial t_i} = 0; \quad \frac{\partial \text{Ra}}{\partial l} = 0; \quad \frac{\partial \text{Ra}}{\partial u_e} = 0 \quad \text{Formel 4.4}$$

Die vier Ableitungen werden in der automatischen Routine mit einem nD-Solver in LabView berechnet. Dieser Solver ermöglicht das Lösen nichtlinearer Differenzialgleichungssysteme in einem definierten Bereich. Die Grenzen dieses Bereichs stellen die für die Faktoren definierten Prozessfenster dar (Kapitel 4.2). Im Anschluss findet eine ausgelagerte Berechnung der Nullstellen in dem CAS Maple mittels des fsolve-Befehls statt. Dieser numerische Ansatz dient speziell der Berechnung von Nullstellen einer komplexen Funktion. Die Lösung liefert die optimale Faktorkombination und somit die optimierten Erosionsparameter.

Abschließend wird überprüft, ob die Bedingung für ein lokales Minimum der Funktionen erfüllt ist. Hierzu wird die zweite Ableitung der *Formel 4.3* je Faktor berechnet und die ermittelten Parameterwerte eingesetzt.

Zusätzlich zur Ermittlung der optimierten Parameterkombination werden die Effektsignifikanzen berechnet und in einem Blockdiagramm auf der Benutzeroberfläche zusammen mit den Einzelmesswerten der Oberflächenrauheit und den optimalen Erosionsparametern ausgegeben (Abbildung 4.5).

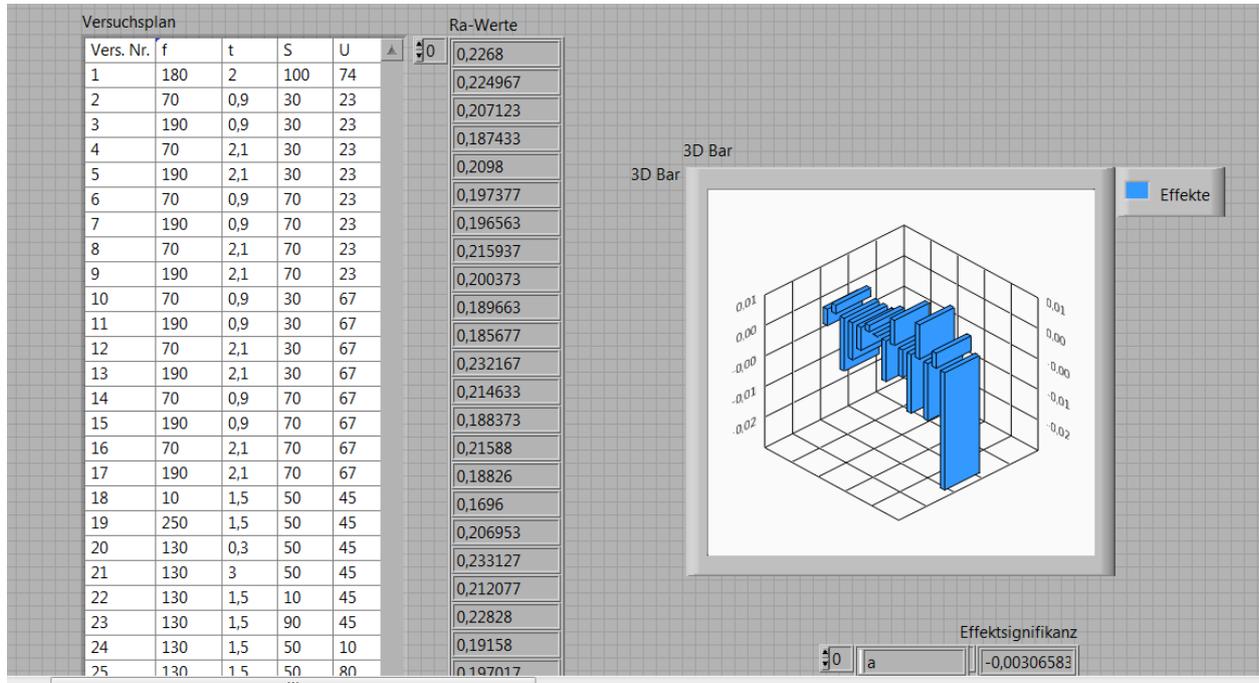


Abbildung 4.5: Benutzeroberfläche des erstellten Programms zur automatisierten Parametersuche

4.5 Validierung

Um den Nachweis der Leistungsfähigkeit der entwickelten Parametersuche zu erbringen, wurde diese anhand zweier Werkstoffe durchgeführt, für die bereits optimierte Erosionsparameter basierend auf Erfahrungswissen bestehen. Durch den Vergleich der Versuchsergebnisse mit den vorliegenden Parametern kann eine Aussage über die Güte der zu erwartenden Ergebnisse bei der Durchführung der Parametersuche getroffen werden.

Bei den Versuchsmaterialien handelt es sich um den niedriglegierten Werkzeugstahl 30CrMo6 und das Hartmetall WC-12Co. Die exakte chemische Zusammensetzung der Werkstoffe ist in Kapitel 3.1.2 dargestellt.

Zur Fertigung und Messung der Testkavitäten wurden die in Kapitel 4.4.1 aufgeführten Maschinen- und Sensorparameter verwendet, die fest im Programm hinterlegt sind. Die Tabelle 4.5 zeigt die Ergebnisse der gemittelten Oberflächengüte je Testkavität für 30CrMo6 und WC-12Co.

Syst. Nr.	f _i [kHz]	t _i [μs]	I [-]	u _e [V]	30CrMo6	WC-12Co
					Ra [μm]	Ra [μm]
1	70	0,9	30	23	0,146	0,143
2	190	0,9	30	23	0,166	0,168
3	70	2,1	30	23	0,145	0,140
4	190	2,1	30	23	0,165	0,157
95	70	0,9	70	23	0,188	0,179
6	190	0,9	70	23	0,175	0,182
7	70	2,1	70	23	0,168	0,160
8	190	2,1	70	23	0,163	0,159
9	70	0,9	30	67	0,142	0,140
10	190	0,9	30	67	0,152	0,146
11	70	2,1	30	67	0,147	0,139
12	190	2,1	30	67	0,157	0,157
13	70	0,9	70	67	0,146	0,132
14	190	0,9	70	67	0,154	0,149
15	70	2,1	70	67	0,144	0,141
16	190	2,1	70	67	0,154	0,148
17	10	1,5	50	45	0,175	0,164
18	250	1,5	50	45	0,181	0,176
19	130	0,3	50	45	0,148	0,147
20	130	3,0	50	45	0,176	0,176
21	130	1,5	10	45	0,177	0,145
22	130	1,5	100	45	0,147	0,136
23	130	1,5	50	10	0,151	0,143
24	130	1,5	50	80	0,143	0,132
25	130	1,5	50	45	0,154	0,151
26	130	1,5	50	45	0,156	0,149
27	150	1,5	50	45	0,156	0,152

Tabelle 4.5: Ergebnisse der gemittelten Oberflächengüte je Faktorkombination bzw. Testkavität für 30CrMo6 und WC-12Co

Im Anschluss an den Messvorgang wurden die Daten entsprechend der prozessseitigen und mathematischen Vorgehensweise aus Kapitel 4.4 ausgewertet und die nach der nichtlinearen Regression berechneten Erosionsparameter ausgegeben. Diese sind für beide Werkstoffe in Tabelle 4.6 dargestellt und den bekannten Parametern gegenübergestellt.

Material	30CrMo6		WC-12Co	
	Erfahrung	Ergebnis	Erfahrung	Ergebnis
Parameter aus...				
f_i [kHz]	140	121	120	112
t_i [μ s]	1,2	1,1	1,5	1,4
I [-]	80	76	90	84
u_e [V]	74	68	60	61

Tabelle 4.6: Vergleich der Parameter aus Erfahrungswissen und der Parametersuche

Die Ergebnisse zeigen, dass die Parametersätze eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen. Lediglich bei der Impulsfrequenz ist eine größere Abweichung zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einer bestimmten Impulszeit eine entsprechende Pausendauer erforderlich ist, um durch das strömende Dielektrikum im Funkenspalt wieder hinreichende Bedingungen für die nächste Entladung zu schaffen und die thermische Energie aus der Entladezone abzutransportieren. Diese Pausendauer muss für die Erzeugung einer guten Oberflächengüte vorhanden sein. Es hat allerdings keinen negativen Einfluss, wenn diese überschritten wird. Somit fällt das Ergebnis der Entladefrequenz etwas geringer aus, als dies bei den Erfahrungswerten der Fall ist.

Mit allen vier Parametersätzen aus Tabelle 4.6 wurden im Anschluss jeweils drei weitere Testkavitäten gefertigt und deren Oberflächengüte auf einer externen nach dem konfokalen Prinzip arbeitenden Messmaschine gemessen. Der Vergleich der Messergebnisse basierend auf Parametern aus Erfahrungswissen und aus der automatisierten Parametersuche ist in Tabelle 4.7 dargestellt.

Material	30CrMo6		WC-12Co	
	Erfahrung	Ergebnis	Erfahrung	Ergebnis
Parameter aus...				
Ra_1 [μ m]	0,136	0,145	0,132	0,129
Ra_2 [μ m]	0,141	0,137	0,130	0,136
Ra_3 [μ m]	0,140	0,143	0,135	0,131
Ra [μ m]	0,139	0,142	0,134	0,132

Tabelle 4.7: Vergleich der Oberflächengüte gefertigt mit Parametern aus Erfahrungswissen und aus der Parametersuche

Der Vergleich der Oberflächenrauheit ergibt, dass sich die Mittelwerte um maximal $\Delta Ra = 0,003 \mu\text{m}$ unterscheiden. Dies zeigt, dass mittels der entwickelten Parametersuche automatisiert und damit sehr effizient passende Erosionsparameter für die Mikrobahnerosion ermittelt werden können.

4.6 Fazit

Derzeit entspricht es dem Stand der Technik, geeignete Prozessparameter für die Bearbeitung neuer Werkstoffe mittels aufwändiger Versuchsreihen und einer manuellen Auswertung zu erarbeiten.

In diesem Kapitel ist die Vorgehensweise bei der automatisierten Parametersuche für die Feinschliffbearbeitung bei der Herstellung eines Formeinsatzes beschrieben. Die dabei verwendete Ergebnisgröße ist die Oberflächenrauheit (R_a) von Testkavitäten, die mittels eines konfokalen Weißlichtsensors an der Erodiermaschine gemessen wird. Bei der Fertigung der Testkavitäten werden die Erosionsparameter (u_e , i_e , t_i , f_p) anhand eines zusammengesetzten Versuchsplans variiert und nach der Messung mittels einer nichtlinearen Regression ausgewertet.

Anhand der Validierungsergebnisse der Werkstoffe 30CrMo6 und WC-12Co konnte gezeigt werden, dass die Erosionsparameter sehr nahe an denen lagen, die basierend auf Erfahrungswissen für diese Werkstoffe geeignet sind. Bei der Gegenüberstellung der gemittelten Oberflächenrauheit, erzeugt durch die beiden Parametersätze, wurde eine sehr geringe Abweichung von $\Delta R_a = 0,003 \mu\text{m}$ erzielt.

Der Mehrwert dieser automatisierten Parametersuche ist beim Übertrag auf neue Werkstoffe zu sehen, für die noch kein Erfahrungswissen vorliegt und die Prozessparameter mit der konventionellen Vorgehensweise aufwändig erarbeitet werden müssten.

5 Optimierte Zustellwerte für die Bearbeitung von 2,5D-Kavitäten

Bei der Mikrobahnerosion wird das Werkstückmaterial in einzelnen übereinanderliegenden Ebenen abgetragen. Im klassischen Falle findet demnach eine dreiachsige Bearbeitung statt, die einen konstanten Wert für die Zustellung der Werkzeugelektrode beim Übergang von einer Bearbeitungsebene zur nächsten vorsieht. Diese Strategie ist besonders für die Herstellung von 2,5D-Kavitäten mit konstantem Querschnitt und einer ebenen Oberfläche geeignet.

Die Herstellung von schrägen Oberflächen stellt eine größere Herausforderung an die Prozessauslegung dar. Durch die dreiachsige Bearbeitung werden schräge Wände mit der Kante der Werkzeugelektrode hergestellt, die je nach Wandwinkelschräge unterschiedlich stark verschleißt. Die Qualität der entstehenden Oberflächen wird maßgeblich von den Zustelltiefen zwischen den Bearbeitungsebenen beeinflusst.

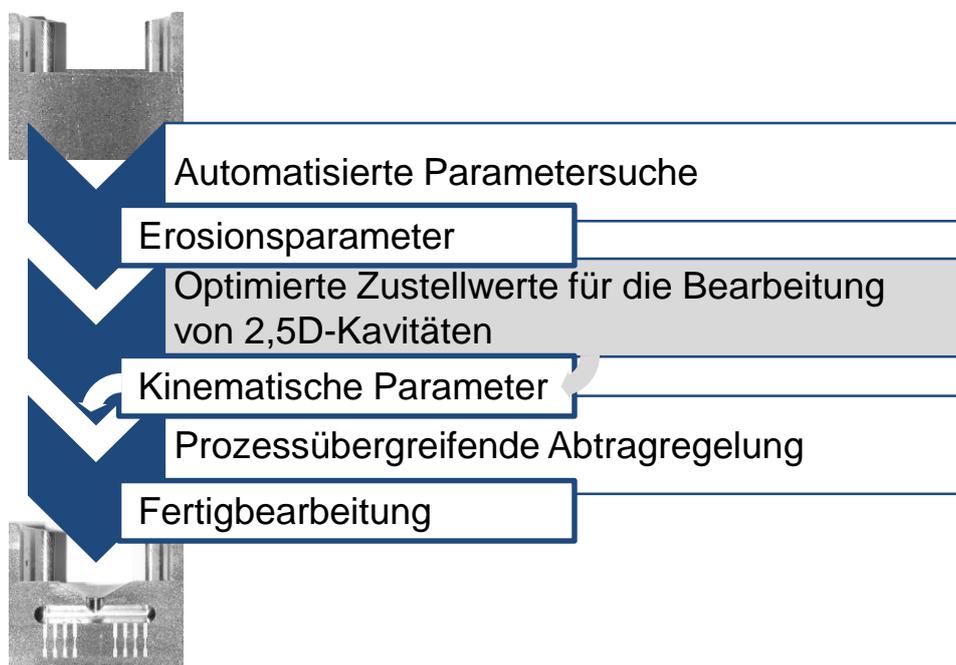


Abbildung 5.1: Eingliederung in den automatisierten Prozessablauf

Das Ziel der folgenden Untersuchungen ist es, für die Fertigung von schrägen Wänden in 2,5D-Kavitäten die optimalen Zustellwerte zu ermitteln, mit denen eine durchgängig hohe und möglichst homogene Oberflächenqualität erreicht wird (Abbildung 5.1). Dafür wurden Kavitäten mit unterschiedlichen Zustellungen gefertigt, die verschiedene Wandwinkelschrägen aufwiesen. Diese wurden dann hinsichtlich ihrer Oberflächenqualität beurteilt. Zudem wurde der Einfluss der Wandwinkelschräge auf die Größe der Kantenverrundung an der Stirnseite der

Werkzeugelektrode überprüft. Als Ergebnis lag abschließend ein mathematischer Zusammenhang zwischen dem zu fertigenden Wandwinkel und der optimalen Zustellung der Werkzeugelektrode vor.

5.1 Versuchsdurchführung

Innerhalb der Untersuchungen wurden unterschiedliche Testkavitäten gefertigt und anschließend Geometriedetails sowie die Oberflächengüte gemessen. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Erzeugung und Auswertung des Probenmaterials beschrieben.

5.1.1 Probengeometrie und -herstellung

Für die Untersuchungen war es wichtig eine Probengeometrie zu definieren, die einerseits eine Aussage über die Fertigung einer 2,5D-Kavität mit veränderlichem Querschnitt zulässt und andererseits ebene Messstrecken für eine anschließende optische Detektion der Oberflächengüte beinhaltet. Dafür wurden aus dem gesamten fertigmöglichen Wandwinkelbereich von $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ fünf äquidistante Werte definiert, die in einer jeweiligen Testgeometrie gefertigt wurden. Die Probengeometrie ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

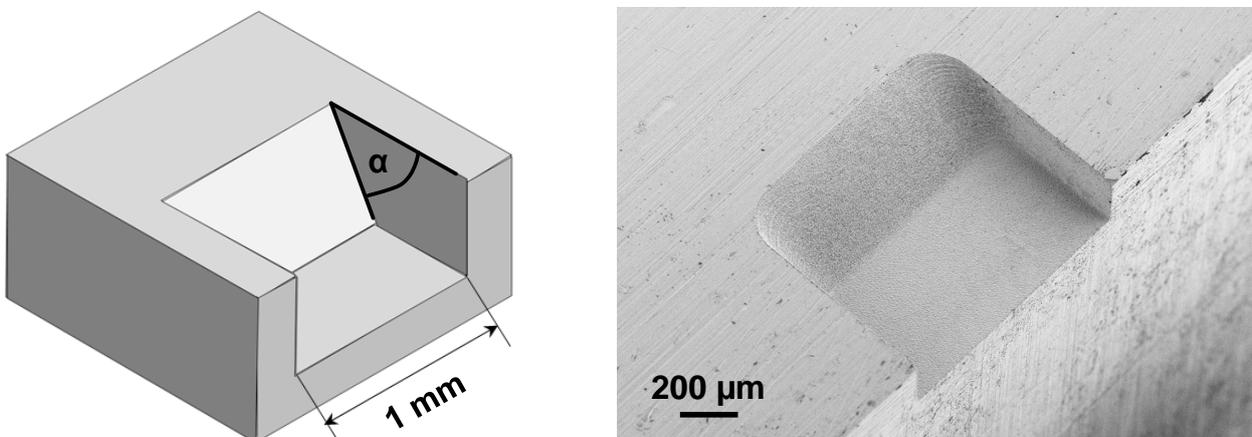


Abbildung 5.2: Testkavität mit unterschiedlichen Wandwinkelschrägen

Die unterschiedlichen Winkelschrägen $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ wurden in offenen Taschen mit einer Breite von $B = 1 \text{ mm}$ realisiert. Die Tiefe der Kavität richtete sich nach dem Winkel und der konstanten Länge von $L = 500 \text{ µm}$ der schrägen Fläche, die damit für alle Messungen gleich war. Um den Zusammenhang von der Zustelltiefe der Werkzeugelektrode und der entstehenden Oberflächengüte bei verschiedenen Winkeln zu untersuchen, wurde jede Schräge mit den Zustellungen $a_p = 0,3 \text{ µm}, 0,6 \text{ µm}, 0,9 \text{ µm}, 1,2 \text{ µm}, 1,5 \text{ µm}$ und $2,0 \text{ µm}$ hergestellt (a_p in Anlehnung an die Zerspanung). Zur

Fertigung wurde eine zylindrische Werkzeugelektrode aus WC-6Co mit einem Durchmesser von $D = 300 \mu\text{m}$ verwendet. Als Werkstückmaterial kam 30CrMo6 zum Einsatz. Dies ist in Kapitel 3.1.2 näher beschrieben. Die verwendeten Erosionsparameter für Schruppen, Schlichten und Feinschichten sind in den Kapiteln 5.2, 5.3 und 5.4 dargestellt.

5.1.2 Korrekturfaktor für die Verschleißkompensation

Vor der eigentlichen Versuchsdurchführung wurde der korrekte Faktor für die Verschleißkompensation bestimmt. Er ist ein Maß dafür, um welchen Wert die Werkzeugelektrode kontinuierlich während der Bearbeitung einer Abtragsebene zugestellt wird. Dieser Faktor wird maßgeblich durch die Zustellung beeinflusst und wurde daher für jeden einzelnen Zustellwert separat ermittelt. Die Vorgehensweise bei der Bestimmung der korrekten Verschleißkompensation ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Durch diesen Ablauf konnte der Einfluss einer fehlerhaften Zustellung der Werkzeugelektrode minimiert werden.

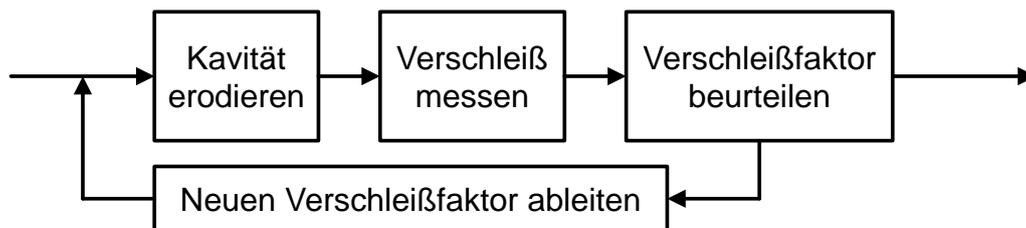


Abbildung 5.3: Vorgehensweise bei der Bestimmung der Verschleißkompensation

5.1.3 Messdatenerfassung und -auswertung

Zur Messdatenerfassung der Oberflächenrauheit wurde das in Kapitel 3.3.2 beschriebene konfokale Messsystem verwendet. Hierbei wurde die Oberfläche in sechs nebeneinanderliegenden Messstrecken abgetastet, um das ermittelte Ergebnis statistisch abzusichern. Zur Messwarterfassung wurde die schräge Fläche im rechten Winkel zum Strahlengang des Sensors positioniert, um für alle Wandwinkel gleiche Messbedingungen zu gewährleisten und optimale Rückstrahlwerte zu erzielen. Für die Auswertung der erzeugten Daten wurde ein Filter von $\lambda = 0,08 \text{ mm}$ verwendet, um die langwelligen Anteile aus den Messdaten auszublenden. Aufgrund der geringen lateralen Ausdehnung der Probe konnte keine Ermittlung der Oberflächengüte nach DIN EN ISO 4288 erfolgen [DIN-98]. Die Position der sechs Messstrecken und die Ausrichtung der Probe unter dem konfokalen Sensor sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

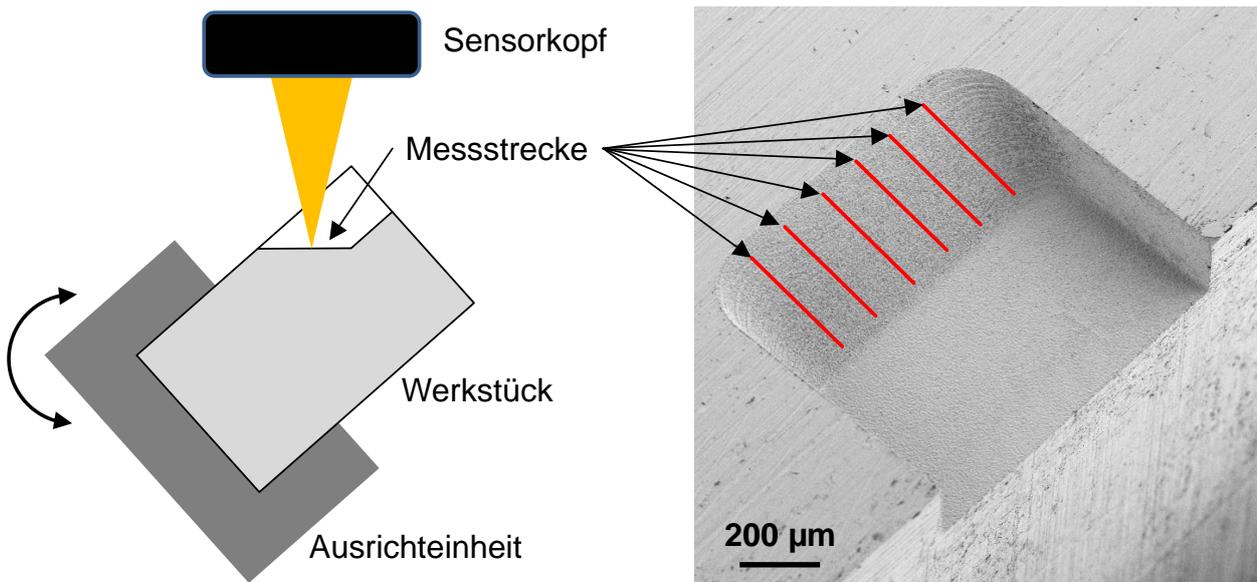


Abbildung 5.4 Ausrichtung der Probe unter dem konfokalen Sensor (links);
Position der Messstrecken auf der Schräge (rechts)

Neben der Oberflächengüte der Schrägen wurde die Kantenverrundung an der Stirnseite der Werkzeugelektrode detektiert. Hierzu wurde bei der Fertigung einer jeden Kavität der Erosionsprozess in dem Moment unterbrochen, als die Werkzeugelektrode gerade eine Bearbeitungsbahn direkt an der Winkelschräge gefertigt hatte. Die Strecke war ausreichend groß, um einen stationären Verschleißzustand der Kante einzustellen. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass der erzeugte Kantenradius direkt durch die Fertigung der Winkelschräge beeinflusst wurde. Die Kantenradien der Werkzeugelektroden wurden im Anschluss durch eine wiederholte optische Messung nach dem Gegenlichtprinzip mit dem in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Mikroskop erfasst.

Zudem wurde die Winkelschräge auf ihre Maßhaltigkeit überprüft. Dazu wurde die Probe so unter dem Sensor ausgerichtet, dass die Winkelhalbierende zwischen der Schräge und dem Boden einer Kavität auf der Achse der unterschiedlichen Fokusslagen des Lichtspektrums lag. Daran anschließend wurden drei nebeneinanderliegende Scans senkrecht zum Übergang vom Boden- in den Wandbereich durchgeführt.

5.2 Schruppbearbeitung von schrägen Wänden

Die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Testkavitäten mit unterschiedlichen Wandwinkelschrägen wurden mit den verschiedenen Zustellwerten im Bearbeitungsmodus „Schruppen“ hergestellt. Dabei wurde eine Bahnüberlappung von 60% bei der Bearbeitungsstrategie von „außen nach

innen“ verwendet. Die Bearbeitungsstrategie, Werkzeugelektrodenmaterialien, Prozessmedien und Prozessparameter sind in Abbildung 5.1 dargestellt.

Bearbeitungsstrategie	Von „außen nach innen“ Bahnüberlappung im Schrumpmodus = 60 %					
Elektroden, Prozessmedium	Werkzeugelektrode: Stabelektrode (WC-6Co, D = 300 μm) Werkstückwerkstoff: 30CrMo6 Dielektrikum = Hedma111					
Prozessparameter	Polarität der Werkzeug-elektrode	-	t_i [μs]	6,6	Korrekturfaktor	var.
	u_0 [V]	150	f_p [Hz]	90	Zustellung [μm]	var.
	u_e [V]	60	Impulsform	365	Technologie-typ	4101
	i_e [A]	15	Servo-verstärkung	1000	GAP Frontal [μm]	5,0

Tabelle 5.1: Bearbeitungsstrategie, Werkzeugelektrodenmaterialien, Prozessmedien und Prozessparameter bei der Schrumpbearbeitung

5.2.1 Einfluss auf die Oberflächenrauheit

Die Ergebnisse der optischen Oberflächenmessung der im Schrumpmodus gefertigten Taschen sind im Diagramm in Abbildung 5.5 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass für die Fertigung von kleinen Wandwinkeln geringe Zustelltiefen besser geeignet sind. So wurde bei einer Zustellung von $a_p = 0,3 \mu\text{m}$ eine Oberflächengüte von $R_a = 2,03 \mu\text{m}$ bei der 15° -Schräge und $R_a = 2,36 \mu\text{m}$ bei der 75° -Schräge erzielt. Dieses Phänomen kehrt sich bei größeren Wandwinkeln um. Hier führt die Verwendung von größeren Zustelltiefen zu besseren Ergebnissen in der Oberflächenqualität. Dieses Verhalten kann damit begründet werden, dass bei kleinen Wandwinkeln trotz geringer Zustellungen die Werkzeugelektrodenbahnen der einzelnen Bearbeitungsebenen an der schrägen Fläche in x-/y-Richtung weit genug auseinander liegen, um laterale Funkenüberschläge zur bearbeiteten Wand hin zu minimieren. Bei großen Wandwinkeln sind größere Zustellungen erforderlich um diesen Effekt zu umgehen. Bei großen Zustellungen und kleinen Wandwinkeln überwiegt dagegen der rein geometrische Einfluss der sehr weit auseinanderliegenden

Werkzeugelektrodenbahnen an der schrägen Fläche. So wurde bei einer Zustellung von $a_p = 2,0 \mu\text{m}$ eine Oberflächengüte von $R_a = 1,66 \mu\text{m}$ bei der 75° -Schräge und $R_a = 2,64 \mu\text{m}$ bei der 15° -Schräge erzielt. Zudem wird bei der Schruppbearbeitung deutlich, dass die Werte der Oberflächenrauheit über den gesamten Wandwinkelbereich bei gleicher Zustellung immer in einem ähnlich großen Bereich liegen. Dabei wechselt je nach Zustellwert lediglich der Wandwinkel, an dem das Minimum bzw. das Maximum der Oberflächenrauheit auftritt. Die erzielbaren Werte sind dabei näherungsweise gleich.

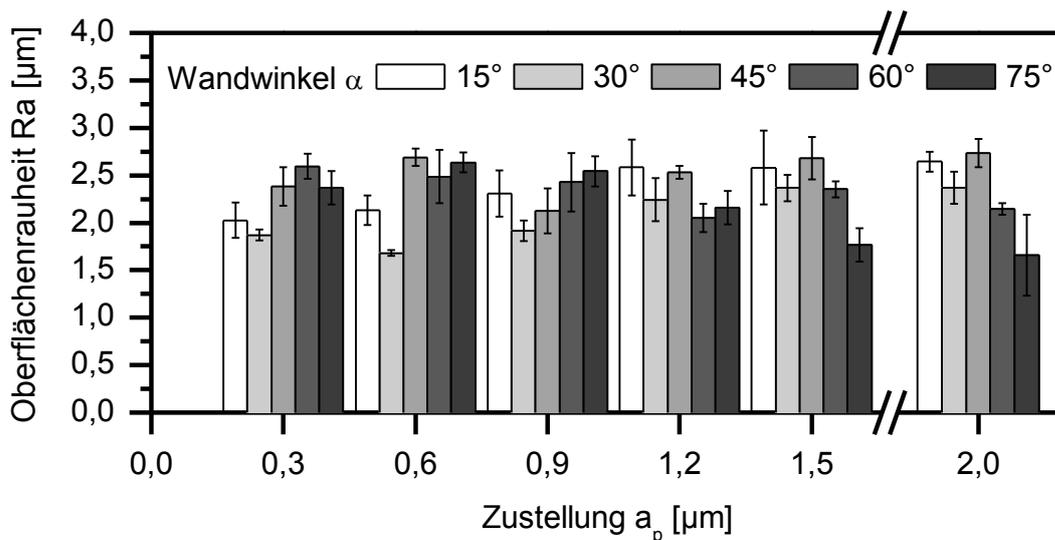


Abbildung 5.5: Oberflächenqualität unterschiedlicher Wandwinkel gefertigt mit verschiedenen Zustellungen (Schruppen)

Zudem ist auffällig, dass alle dargestellten Werte die Oberflächenrauheit des Bodens der Kavität deutlich übersteigen, die bei den unterschiedlichen Zustellungen zwischen $R_a = 1,19 \mu\text{m}$ und $R_a = 1,22 \mu\text{m}$ liegt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim Übergang vom Bodenbereich in die Schräge wechselnde Erosionsbedingungen vorliegen, da hier der Funkenüberschlag nicht mehr nur an der Stirnseite und damit am geringsten Abstand zwischen den Elektroden, sondern auch vereinzelt am Übergang zum lateralen Bereich der Werkzeugelektrode stattfindet. Der zur schrägen Wand hin größer werdende Funkenspalt hat eine Deformation der Schmelzzone bei einer Einzelentladung zur Folge. Dies wird deutlich, dass die erkaltete Schmelze an der Wand eine deutlich andere Struktur aufweist, als es am Boden der Fall ist. Am Boden wird immer eine gesamte Fläche mit einem nahezu konstanten Funkenspalt bearbeitet, d.h. die Schmelze dehnt sich nach allen Seiten gleich stark aus und erkaltet in einem flächigen, oft runden Krater. Wie in Abbildung 5.6 dargestellt, ist dies an schrägen Wänden nicht der Fall. Hier dehnt sich der Plasmakanal einer Funkenentladung zur Wand hin aus, da hier ein niedrigerer Druck herrscht.

Dadurch wird die Schmelze in Richtung der Wand geschoben und erkaltet dort nach der Entladedauer. Dadurch entsteht die dargestellte schuppige Oberflächenstruktur, die eine deutlich schlechtere Güte aufweist als die im Bodenbereich.

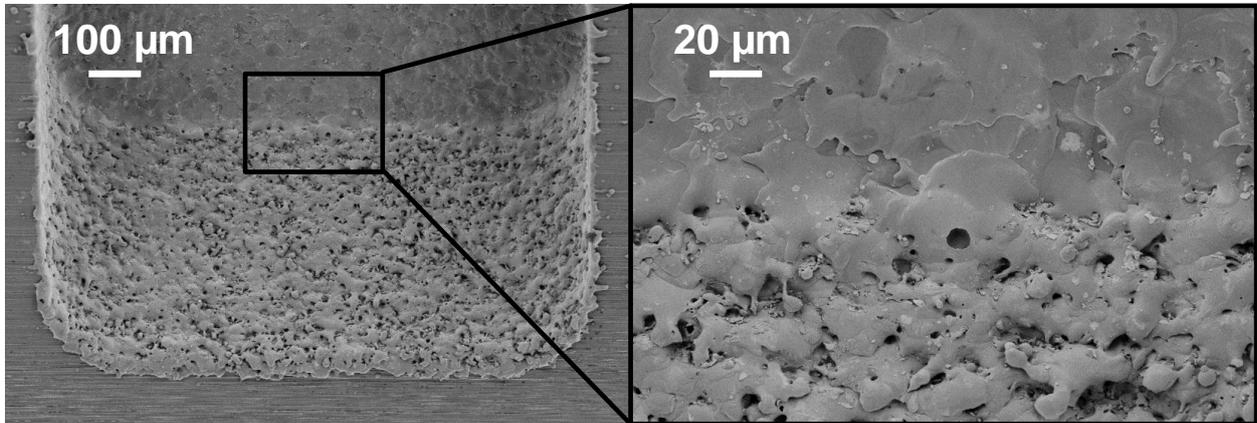


Abbildung 5.6: Übergang vom Boden in den Wandbereich einer Testkavität (Schruppen, $\alpha = 45^\circ$, $a_p = 2,0 \mu\text{m}$)

5.2.2 Einfluss auf den Kantenradius der Werkzeugelektrode

Um zu untersuchen, wie groß der Einfluss der Wandwinkelschräge und der Zustellung auf den Radius an der Werkzeugelektrodenkante ist, wurde die Werkzeugelektrode nach der Fertigung einer Bahn entlang der Schräge gemäß dem beschriebenen Vorgehen in Kapitel 5.1.3 vermessen. Die Ergebnisse der Messreihen sind in den Diagrammen in Abbildung 5.7 dargestellt.

Bei einem Winkel von $\alpha = 15^\circ$ ergibt sich eine über alle Zustellungen gemittelte Kantenverrundung von $r_k = 37,7 \mu\text{m}$. Dagegen trat bei einer Schräge von $\alpha = 75^\circ$ ein mittlerer Kantenradius von $r_k = 39,9 \mu\text{m}$ auf. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass bei kleineren Wandwinkeln der Kantenverschleiß tendenziell etwas geringer ausfällt als bei großen Schrägen.

Zudem wird aus den Diagrammen deutlich, dass bei Wandwinkeln kleiner als $\alpha = 45^\circ$ der Kantenradius mit zunehmenden Zustellwerten abnimmt. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei kleinen Wandwinkeln und großen Zustellungen die laterale Entfernung der ersten Bahn einer Wandwinkelschräge relativ gesehen weit entfernt ist von der ersten Bahn der darüber liegenden Ebene. Dies führt zu einem vermehrt auftretenden stirnseitigen Werkzeugelektrodenverschleiß. Bei kleineren Zustellwerten dagegen ist der Einfluss der nahe gelegenen Schräge merklich vorhanden. Hier finden Funkenüberschläge vermehrt auch in lateraler Richtung statt, was zu einer Kantenverrundung am Übergang der Stirn- zur Mantelfläche der Werkzeugelektrode führt.

Bei einer Schräge von 45° sind die Ergebnisse der Kantenverrundung im Rahmen der Messgenauigkeit auf demselben Niveau. Hierbei liegen alle Werte im Bereich zwischen $r_k = 35,5 \mu\text{m}$ und $r_k = 40,8 \mu\text{m}$ und sind stochastisch über den Bereich der unterschiedlichen Zustellungen verteilt.

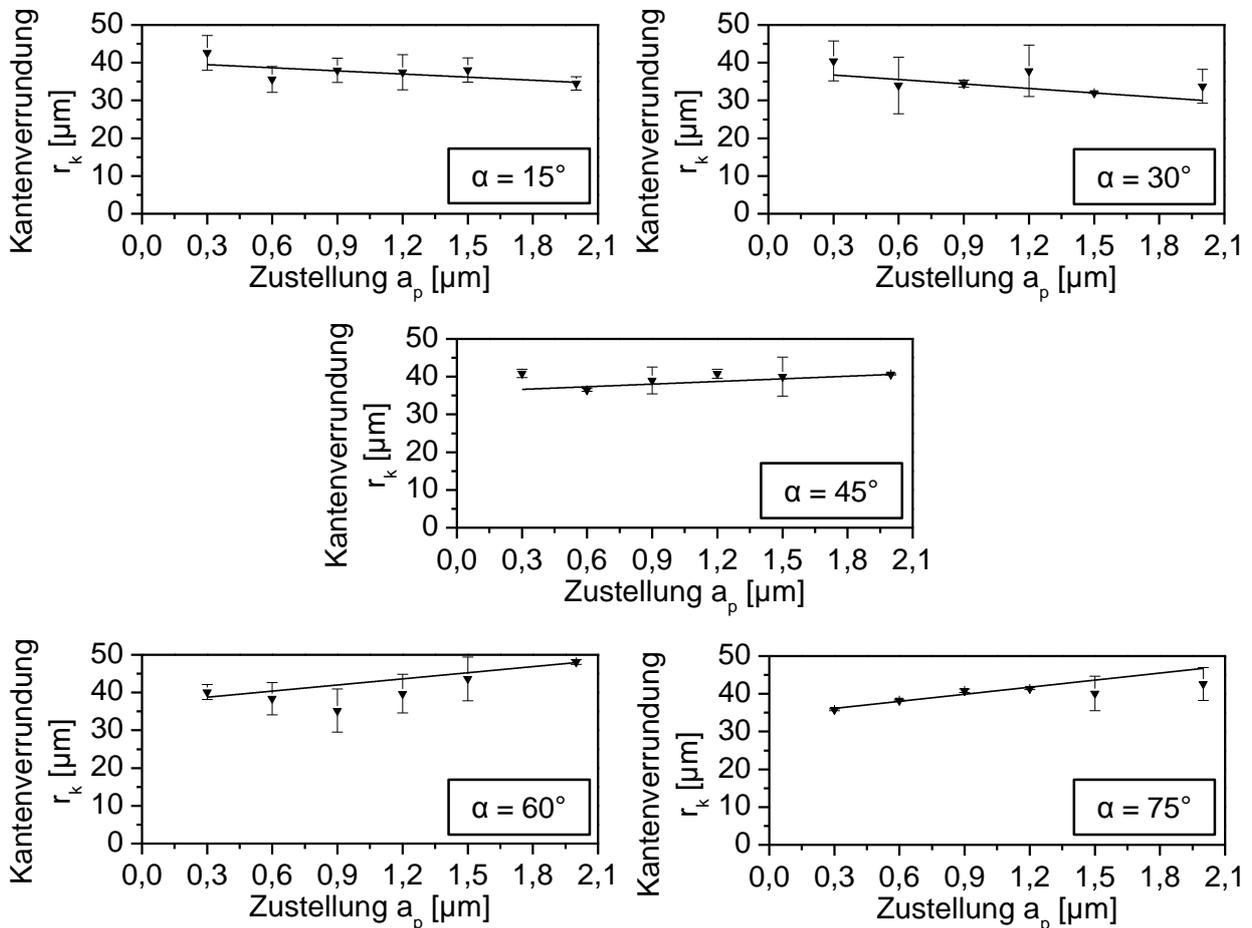


Abbildung 5.7: Einfluss der Zustellung bei unterschiedlichen Wandwinkeln auf die Kantenverrundung der Werkzeugelektrode bei der Schruppbearbeitung

Das Verschleißverhalten der Kante der Werkzeugelektrode kehrt sich beim Überschreiten des Wandwinkels von $\alpha = 45^\circ$ um. In den Diagrammen der 60° - und 75° -Schräge ist dargestellt, dass sich die Kantenverrundung mit ansteigender Zustellung vergrößert. Entgegen dem Phänomen bei kleinen Winkeln wird hier die Werkzeugelektrode bei großen Zustellungen lateral im Bereich der Kante deutlich mehr beansprucht. Dies wirkt sich in einer deutlich größeren Kantenverrundung aus.

5.2.3 Einfluss der Zustellung auf den Wandwinkel

Im Anschluss an die Variation der Zustelltiefen bei verschiedenen Wandwinkeln wurde der Winkel der gefertigten Schräge detektiert. Hierbei wurde die Vorgehensweise aus Kapitel 5.1.3 angewandt. In Abbildung 5.8 sind die gemessenen Winkel den Sollwerten der Winkel beim Schruppen gegenübergestellt. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Winkelabweichung einen Wert von $\Delta\alpha = \pm 1^\circ$ nicht überschreitet. Diese Genauigkeit wird bei allen Winkeln, gefertigt mit unterschiedlichen Zustellungen, erreicht. Trotz vereinzelter kleiner Abweichungen vom Sollwert kann keine Regelmäßigkeit festgestellt werden. Ein Einfluss dieser kinematischen Größe auf den Wandwinkel ist damit nicht ableitbar.

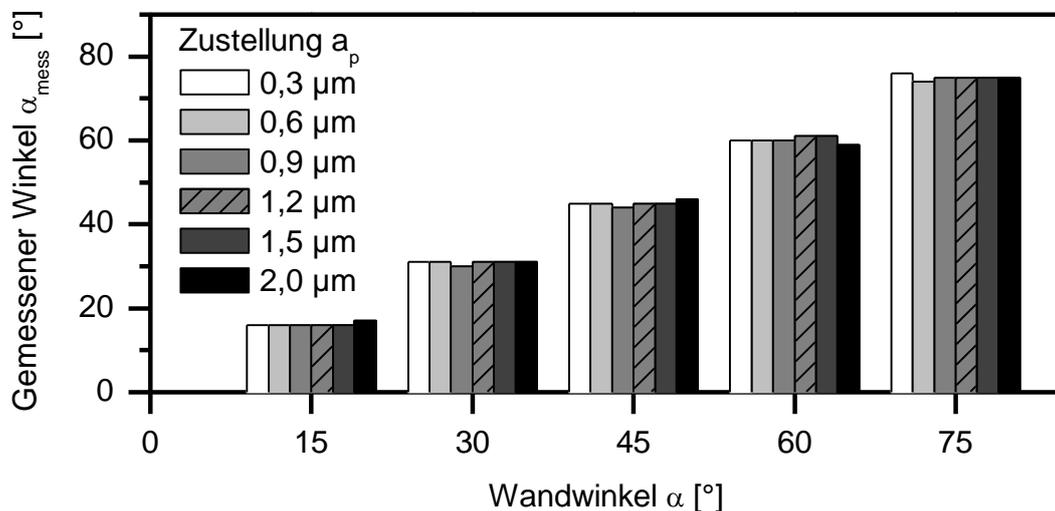


Abbildung 5.8: Gemessene Wandwinkel bei unterschiedlichen Zustellwerten (Schruppen)

5.3 Schlichtbearbeitung von schrägen Wänden

Für die Untersuchungen zur Schlichtbearbeitung wurden die Testkavitäten aus Kapitel 5.1.1 mit den Parametern in Tabelle 5.2 hergestellt. Dabei wurden die gleichen Wandwinkel und Zustellungen verwendet wie bei der Schruppbearbeitung, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Dabei wurde eine Bahnüberlappung von 60% bei der Bearbeitungsstrategie von „außen nach innen“ verwendet.

Bearbeitungsstrategie	Von „außen nach innen“ Bahnüberlappung im Schlichtmodus = 60 %					
Elektroden, Prozessmedium	Werkzeugelektrode: Stabelektrode (WC-6Co, D = 300 μm) Werkstückwerkstoff: 30CrMo6 Dielektrikum = Hedma111					
Prozessparameter	Polarität der Werkzeugelektrode	-	t_i [μs]	4,0	Korrekturfaktor	var.
	u_0 [V]	100	f_p [Hz]	160	Zustellung [μm]	var.
	u_e [V]	72	Impulsform	100	Technologie-typ	4101
	i_e [A]	1,5	Servo-verstärkung	220	GAP Frontal [μm]	2,0

Tabelle 5.2: Bearbeitungsstrategie, Werkzeugelektrodenmaterialien, Prozessmedien und Prozessparameter bei der Schlichtbearbeitung

5.3.1 Einfluss auf die Oberflächenrauheit

Die Ergebnisse der Messung der Oberflächenrauheit von den verschiedenen schrägen Flächen sind im Diagramm in Abbildung 5.9 dargestellt. Dabei ist auffällig, dass im Gegensatz zum Schruppen über den gesamten Zustellbereich bei kleinen Wandwinkeln immer die beste Oberflächengüte erzielt wird. Diese steigt bei allen Zustellwerten mit größer werdenden Wandwinkeln an.

Analog zu den Ergebnissen bei der Schruppbearbeitung ist in Abbildung 5.9 der Einfluss der Zustellungen auf die Oberflächenrauheit bei ansteigenden Wandwinkeln zu erkennen. Bei einer 15°-Schräge und einer Zustellung von $a_p = 0,3 \mu\text{m}$ konnte die beste Oberflächenrauheit von $R_a = 0,57 \mu\text{m}$ erzielt werden. Dieser Wert steigt dann bei einer Zustellung von $a_p = 2,0 \mu\text{m}$ auf einen Wert von $R_a = 0,70 \mu\text{m}$ leicht an.

Zudem ist dem Diagramm zu entnehmen, dass bei großen Winkeln die Oberflächenrauheit mit steigender Zustellung abnimmt. Ausgehend von einem Wert von $R_a = 1,42 \mu\text{m}$ bei einer Zustellung von $a_p = 0,3 \mu\text{m}$ verbessert sich Wert auf $R_a = 1,22 \mu\text{m}$ bei einer Zustellung von $a_p = 2,0 \mu\text{m}$.

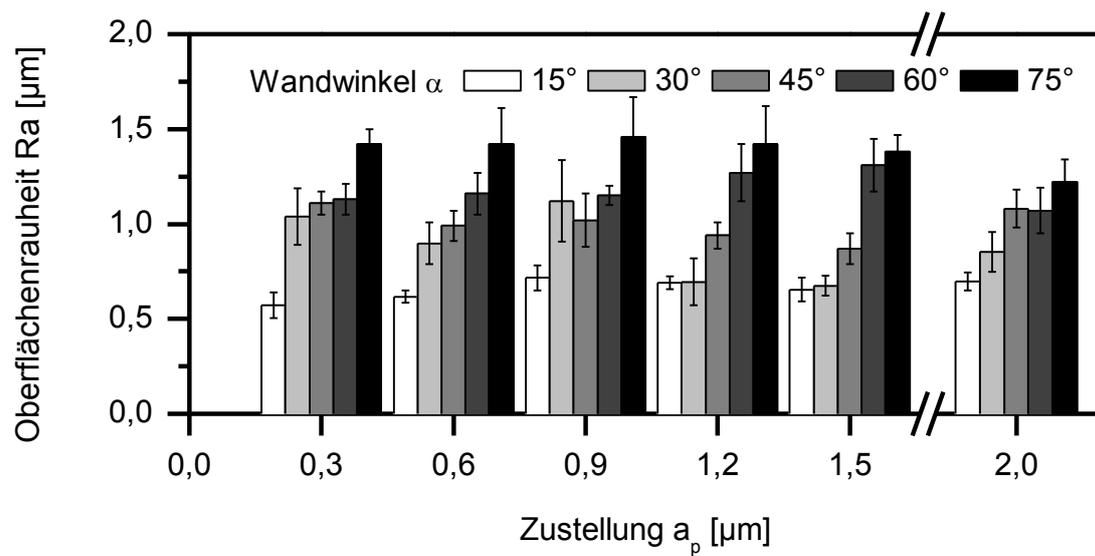


Abbildung 5.9: Oberflächenqualität unterschiedlicher Wandwinkel gefertigt mit verschiedenen Zustellungen (Schichten)

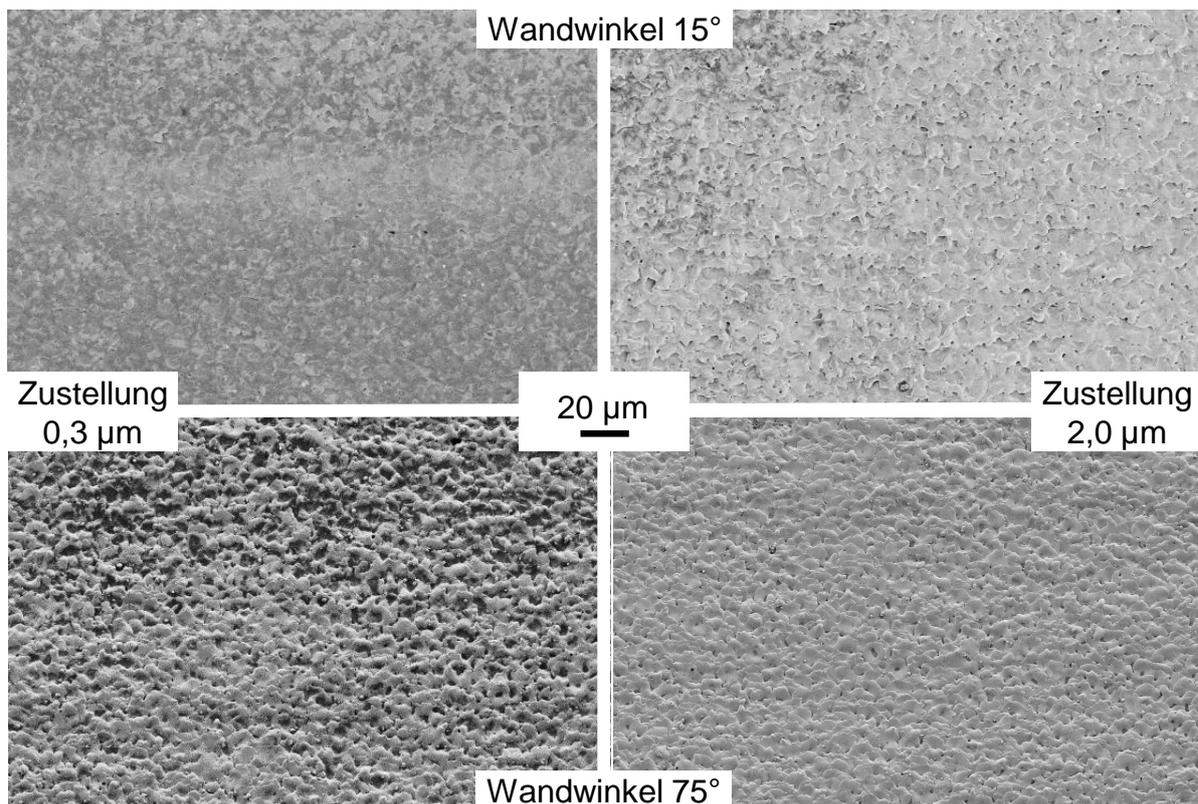


Abbildung 5.10: REM-Aufnahmen der Oberflächen bei den Wandwinkeln $\alpha = 15^\circ$ und $\alpha = 75^\circ$ und Zustellungen von $a_p = 0,3 \mu\text{m}$ und $a_p = 2,0 \mu\text{m}$

Die entsprechenden Werte der Oberflächenrauheit lassen sich anhand von REM-Aufnahmen bestätigen. Wie in Abbildung 5.10 dargestellt, weist die Oberfläche einer 15°-Schräge eine höhere Schuppigkeit der unteren Randbereiche der Erosionskrater auf als die Oberfläche gefertigt mit kleinen Zustellwerten. Bei

großen Wandwinkeln, in der Abbildung liegt dieser bei 75° , dreht sich der Effekt um, wie es auch schon durch die Messung der Oberflächengüte nachgewiesen wurde. Hier ist bei einer Zustellung von $0,3\ \mu\text{m}$ eine deutlich schuppigere Oberflächenstruktur zu erkennen als bei Zustellwerten von $2,0\ \mu\text{m}$. Dies liegt daran, dass bei kleineren Zustellungen im Bereich des Übergangs vom Boden zur Wand die Schmelze nach jeder Einzelentladung in Richtung der schrägen Wand abgedrängt wird, da sich im Randbereich der Funkenpalt vergrößert. Bei größeren Zustellungen tritt dieser Effekt weniger ausgeprägt auf.

5.3.2 Einfluss auf den Kantenradius der Werkzeugelektrode

Die Untersuchungen zum Kantenradius an der Werkzeugelektrode bei der Schlichtbearbeitung wurden, wie auch schon beim Schrappen, entsprechend der Vorgehensweise in Kapitel 5.1.3 durchgeführt. Die Abbildung 5.11 visualisiert die Ergebnisse der Mehrfachmessungen des Kantenradius der Werkzeugelektrode direkt nach der Fertigung einer Bahn an der Wandschräge.

Aus den Diagrammen aus Abbildung 5.11 geht hervor, dass die Werte für den Kantenverschleiß für kleine und große Wandwinkel nicht signifikant variieren. Für die Schlichtbearbeitung ergibt sich bei 15° eine über alle Zustellungen gemittelte Kantenverrundung von $r_k = 14,5\ \mu\text{m}$. Dagegen trat bei einer Schräge von $\alpha = 75^\circ$ ein mittlerer Kantenradius von $r_k = 15,1\ \mu\text{m}$ auf. Die Ergebnisse weisen demnach einen Unterschied von $\Delta r_k = 0,6\ \mu\text{m}$ auf, der im Bereich der Messungenauigkeit liegt. Bei der Schrubbearbeitung war der Unterschied mit $\Delta r_k = 2,2\ \mu\text{m}$ deutlich größer.

Auch bei der Schlichtbearbeitung wird deutlich, dass bei Wandwinkeln kleiner als $\alpha = 45^\circ$ der Kantenradius mit zunehmenden Zustellwerten abnimmt. Das heißt, hier dominiert ebenfalls der Effekt, dass bei kleinen Wandwinkeln und großen Zustellungen die Entfernung von einer höher liegenden gefertigten Bahn an der Wandwinkelschräge relativ gesehen weit entfernt ist von der nächsten darunter liegenden Bahn an der Schräge. Dies führt zu einem vermehrt auftretenden stirnseitigen Werkzeugelektrodenverschleiß. Bei kleineren Zustellwerten ist dagegen der Einfluss der nahe gelegenen Schräge merklich vorhanden. Hier findet vermehrt ein lateral auftretender Funkenüberschlag statt. Dies führt wiederum zu einer Verrundung der Kante der Werkzeugelektrode.

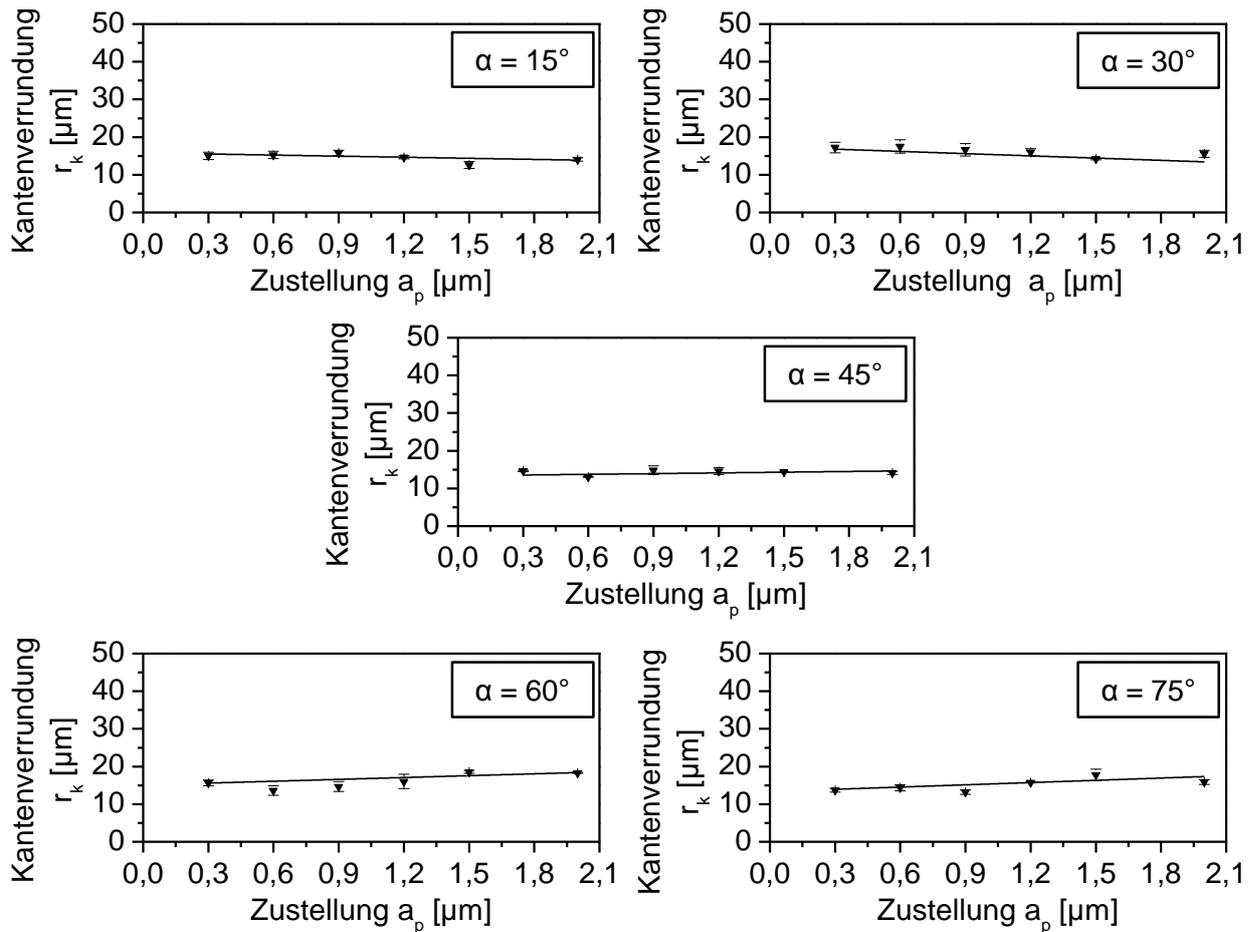


Abbildung 5.11: Einfluss der Zustellung bei unterschiedlichen Wandwinkeln auf die Kantenverrundung der Werkzeugelektrode bei der Schlichtbearbeitung

Die 45° -Schräge stellt den Wendepunkt des abfallenden Kantenradius bei ansteigenden Zustellungen dar. Hierbei liegen alle Werte im Bereich zwischen $r_k = 13,0 \mu\text{m}$ und $r_k = 14,8 \mu\text{m}$ und weisen, wie auch schon die Ergebnisse in Kapitel 5.2.2, keinen eindeutigen Trend auf.

Übersteigt der Wandwinkel $\alpha = 45^\circ$ ist ein Anstieg der Kantenverrundung mit zunehmenden Zustellwerten zu verzeichnen. In den Diagrammen der 60° - und 75° -Schräge ist dargestellt, dass sich die Kantenverrundung mit ansteigender Zustellung vergrößert. In diesem Bereich wurden die größten Kantenradien mit $r_k = 18,5 \mu\text{m}$ detektiert.

5.3.3 Einfluss der Zustellung auf den Wandwinkel

Die tatsächlich gefertigten Wandwinkel bei der Schlichtbearbeitung der Testkavitäten wurden entsprechend der Vorgehensweise aus Kapitel 5.1.3 gemessen. In Abbildung 5.12 sind die gemessenen Winkel den Sollwerten der Winkel beim Schlichten gegenübergestellt. Im Diagramm ist ersichtlich, dass die Zustellung keinen Einfluss auf die Winkelabweichung hat. Die Abweichungen unterliegen einer zufälligen Verteilung, wie es auch bei der Schruppbearbeitung der Fall war.

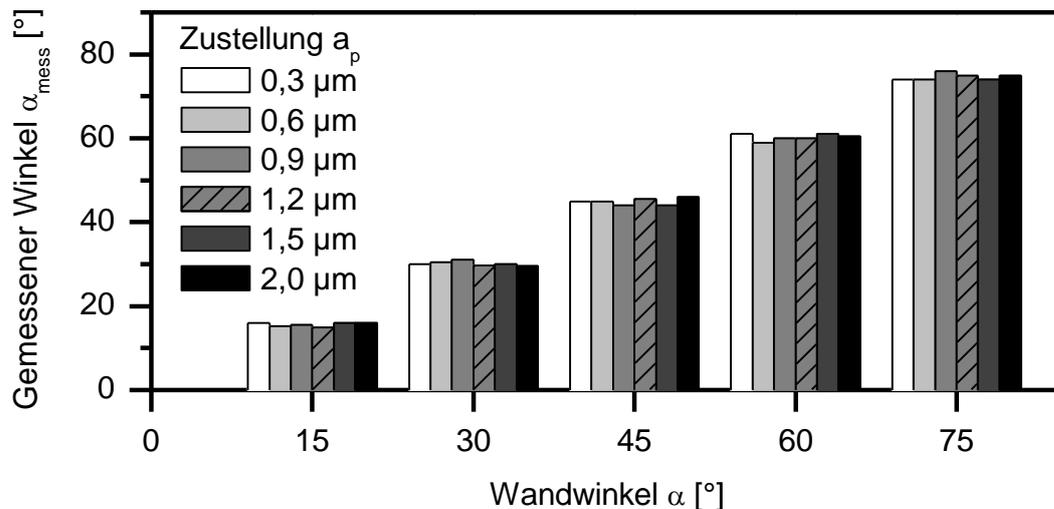


Abbildung 5.12: Gemessene Wandwinkel bei unterschiedlichen Zustellwerten (Schlichten)

Die Schlichtbearbeitung besitzt mit $\Delta\alpha = \pm 1^\circ$ trotz einer kleineren Entladeenergie den gleichen Wert für die maximale Winkelabweichung wie die Schruppbearbeitung. Diese Größe ist in diesen beiden Fällen nur von der Positioniergenauigkeit der Maschine und der Verschleißkompensation abhängig.

5.4 Feinschlichtbearbeitung von schrägen Wänden

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Zustellungen auf das Prozessergebnis bei der Feinschlichtbearbeitung zu untersuchen, wurden die Testkavitäten aus Kapitel 5.1.1 mit den Parametern in Tabelle 5.2 hergestellt. Diese wurden ebenfalls mit den Zustellungen $a_p = 0,3 \mu\text{m}$, $0,6 \mu\text{m}$, $0,9 \mu\text{m}$, $1,2 \mu\text{m}$, $1,5 \mu\text{m}$ und $2,0 \mu\text{m}$ gefertigt. Zudem wurde die Bahnüberlappung von 60% gleich gehalten bei derselben Bearbeitungsstrategie, die eine Bearbeitung von „außen nach innen“ vorsieht.

Bearbeitungsstrategie	Von „außen nach innen“ Bahnüberlappung im Feinschlichtmodus = 60 %					
Elektroden, Prozessmedium	Werkzeugelektrode: Stabelektrode (WC-6Co, D = 300 μm) Werkstückwerkstoff: 30CrMo6 Dielektrikum = Hedma111					
Prozessparameter	Polarität der Werkzeug-elektrode	-	t_i [μs]	2,0	Korrektur-faktor	var.
	u_0 [V]	90	f_p [Hz]	180	Zustellung [μm]	var.
	u_e [V]	74	Impulsform	13	Technologie-typ	4000
	i_e [A]	0,8	Servo-verstärkung	230	GAP Frontal [μm]	2,0

Tabelle 5.3: Bearbeitungsstrategie, Werkzeugelektrodenmaterialien, Prozessmedien und Prozessparameter bei der Feinschlichtbearbeitung

5.4.1 Einfluss auf die Oberflächenrauheit

Das Diagramm in Abbildung 5.13 zeigt die Ergebnisse der Oberflächenrauheitsmessung. Grundsätzlich ist ersichtlich, dass die Werte sehr nahe beieinander liegen und somit hier nur Tendenzen abgeleitet werden können. Die Werte der Oberflächenqualität befinden sich in einem Spektrum von $R_a = 0,48 \mu\text{m}$ bis $R_a = 0,78 \mu\text{m}$.

Im Vergleich zur Schlicht- und Schruppbearbeitung ist zu erkennen, dass die besten Rauheitswerte nicht bei den kleinsten Wandwinkeln erzielt werden. Bei der Feinschlichtbearbeitung kommt der geometrische Aspekt bedingt durch die geringen Entladeenergien am stärksten zum Tragen. Hier bildet sich bei einer Wandwinkelschräge von 45° und einer Zustellung von $0,6 \mu\text{m}$ die geringste Oberflächenrauheit von $R_a = 0,42 \mu\text{m}$ aus.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei der Schlicht- und Schruppbearbeitung ist in Abbildung 5.13 dargestellt, dass über das gesamte Winkelspektrum gesehen die jeweils minimale Oberflächenrauheit mit Zustellwerten zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und $0,9 \mu\text{m}$ erzielt werden.

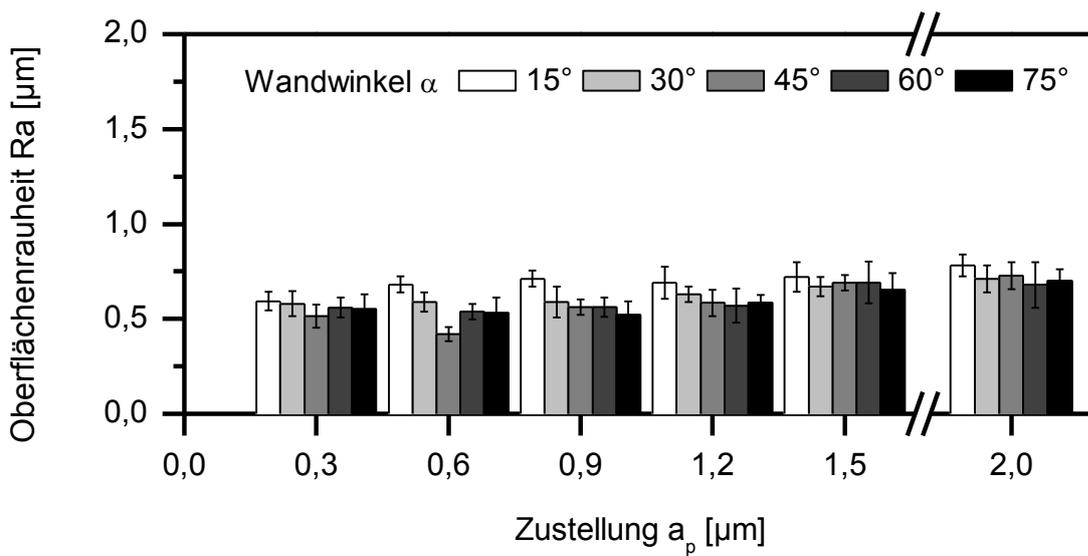


Abbildung 5.13: Oberflächenqualität unterschiedlicher Wandwinkel gefertigt mit verschiedenen Zustellungen (Feinschichten)

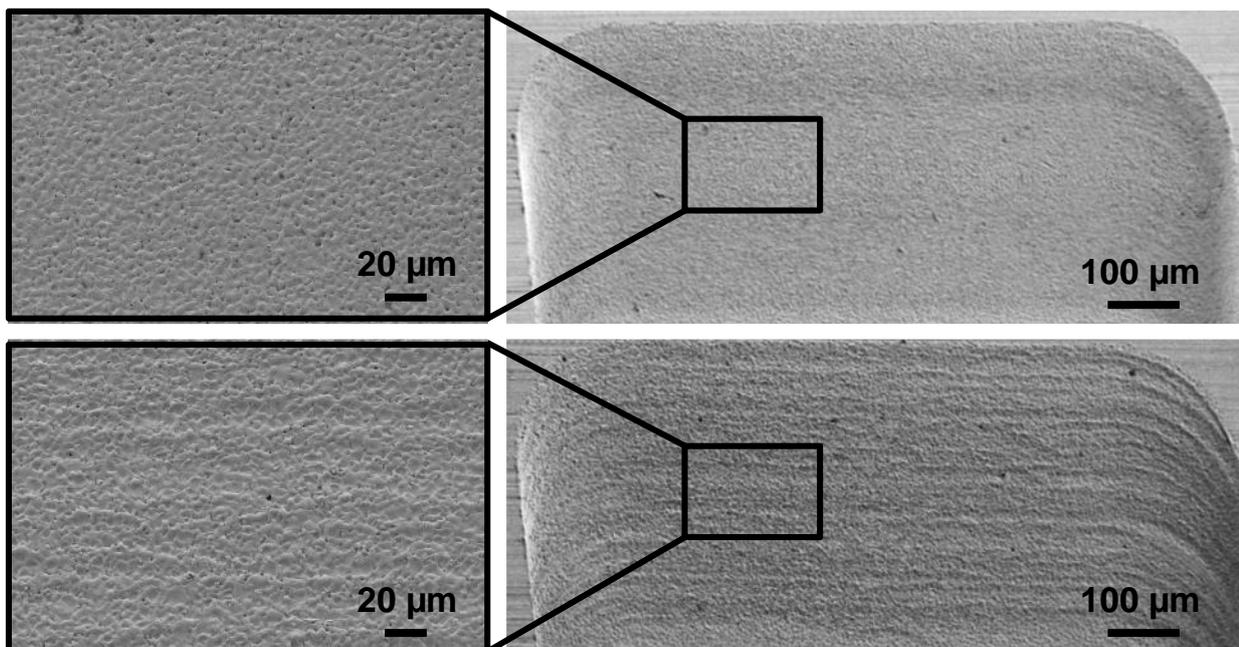


Abbildung 5.14: Oberflächenausprägung einer 15°-schrägen Wand; gefertigt mit einer Zustellung von $a_p = 0,3 \mu\text{m}$ (oben) und mit einer Zustellung von $a_p = 2,0 \mu\text{m}$ (unten)

Die Oberflächenrauheit steigt bei den Zustellungen $a_p = 1,5 \mu\text{m}$ und $a_p = 2,0 \mu\text{m}$ merklich an, da diese in den Bereich der Größe des Funkenpaltes ($L_F = 3-5 \mu\text{m}$) kommen. Dadurch werden somit laterale Funkenüberschläge in Richtung der schrägen Wand begünstigt, was dort die Oberfläche negativ beeinflusst. Dies äußert sich in einer Riefenbildung an der Oberfläche der schrägen Wand. In Abbildung 5.14 ist die Oberflächenausprägung zweier 15°-Schrägen dargestellt, die mit den Zustellungen $a_p = 0,3 \mu\text{m}$ und $a_p = 2,0 \mu\text{m}$ gefertigt wurden. Hier ist

deutlich die durch die zu hohe Zustellung hervorgerufene Oberflächenabweichung zu erkennen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Zustellwerte $a_p = 1,2 \mu\text{m}$, $1,5 \mu\text{m}$ und $2,0 \mu\text{m}$ nicht weiter betrachtet.

Im Bereich der ersten drei Zustellwerte ist in Abbildung 5.13 festzustellen, dass sich die Oberflächengüte bei gleichen Winkelschrägen und unterschiedlichen Zustellungen ähnlich verhält, wie die Ergebnisse bei der Schrupp- und Schlichtbearbeitung. Auch hier wird bei einer Zustellung von $a_p = 0,3 \mu\text{m}$ die Oberflächenrauheit minimal für $\alpha = 15^\circ$ sowie bei Zustellungen von $a_p = 0,9 \mu\text{m}$ für $\alpha = 75^\circ$.

5.4.2 Einfluss auf den Kantenradius der Werkzeugelektrode

Wie in Abbildung 5.15 dargestellt, ergaben die Ergebnisse der Messungen des Kantenradius im Gegensatz zur Schrupp- und Schlichtbearbeitung ein sehr gleichbleibendes Bild bei ansteigenden Wandwinkeln.

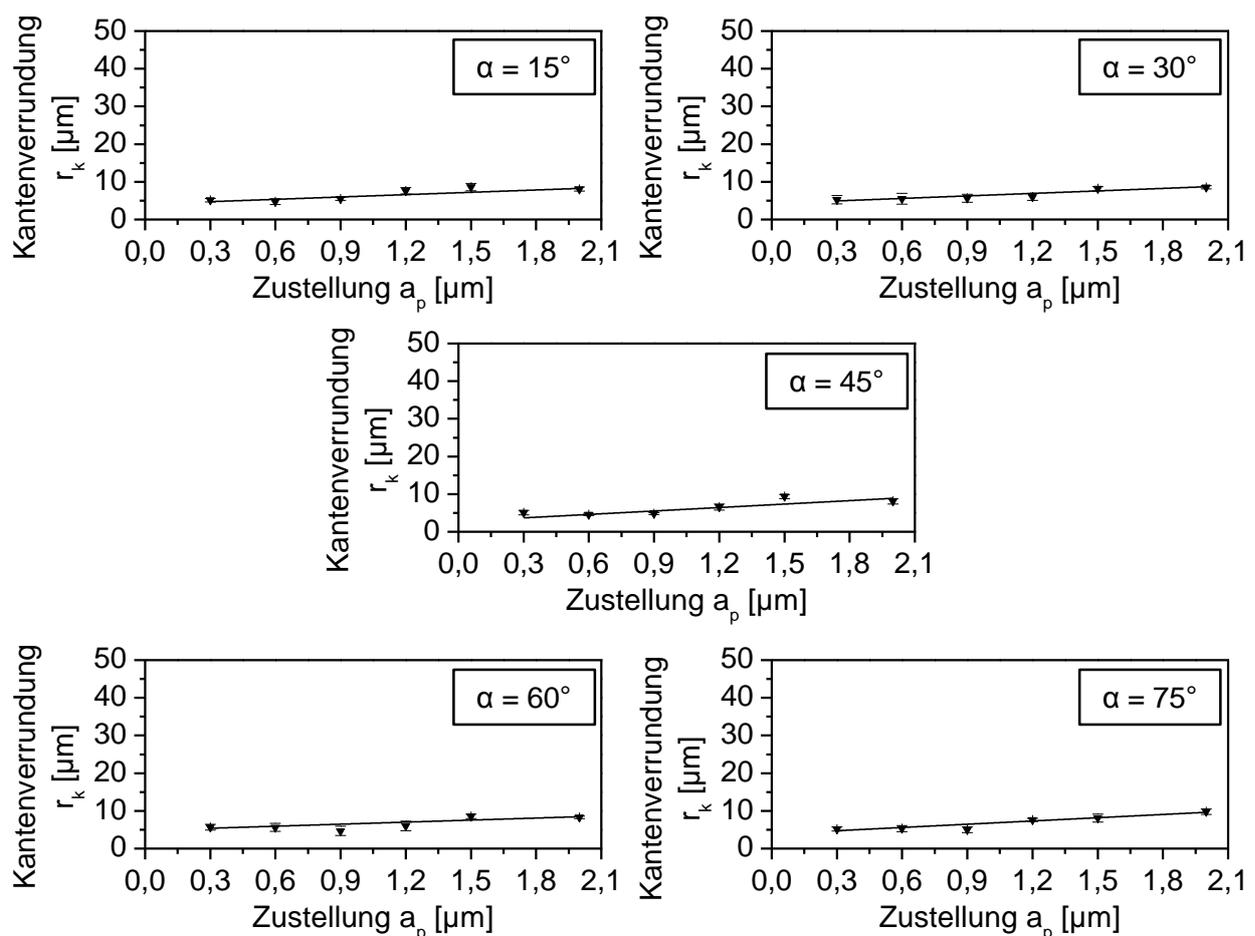


Abbildung 5.15: Einfluss der Zustellung bei unterschiedlichen Wandwinkeln auf die Kantenverrundung der Werkzeugelektrode bei der Feinschlichtbearbeitung

Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass der Erosionsprozess nicht maßgeblich von der Wandwinkelschräge der gefertigten Kavität beeinflusst wird. Vielmehr ist die Größe der Zustellung verantwortlich für die Ausprägung des Kantenradius.

Unabhängig vom Wandwinkel verdoppelt sich nahezu der Kantenradius bei den Zustellungen $a_p = 1,5 \mu\text{m}$ und $a_p = 2,0 \mu\text{m}$. Dieses Phänomen ist ein Indiz für einen zu hohen Zustellwert, was sich auch schon in den Ergebnissen der Oberflächenrauheit gezeigt hat. Die Größe der Kantenverrundung bei kleinen Zustellungen lässt darauf schließen, dass die Erosion vorwiegend stirnseitig an der Werkzeugelektrode stattfindet, was sich in einem kleinen Kantenradius von $r_k = 4-6 \mu\text{m}$ auswirkt. Dies bestätigt die Ergebnisse der Oberflächengüte aus dem Kapitel 5.3.1.

5.4.3 Einfluss der Zustellung auf den Wandwinkel

Die tatsächlich gefertigten Wandwinkel bei der Feinschlichtbearbeitung der Testkavitäten wurden entsprechend der Vorgehensweise aus Kapitel 5.1.3 gemessen. In Abbildung 5.16 sind die Ergebnisse der Winkelmessung dargestellt. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Winkelabweichung bei den ersten drei Zustellungen keine merkliche Tendenz aufweist. Hier beträgt die Abweichung $\Delta\alpha = \pm 0,7^\circ$. Diese ändert sich bei den Zustellungen $a_p = 1,5 \mu\text{m}$ und $a_p = 2,0 \mu\text{m}$ auf zu $\Delta\alpha = \pm 1,9^\circ$. Dies muss allerdings der Beeinflussung des Messsystems durch die zerklüftete Oberfläche zugeschrieben werden. Durch die Oberflächenausprägung konnten die Messdaten nicht korrekt erfasst werden.

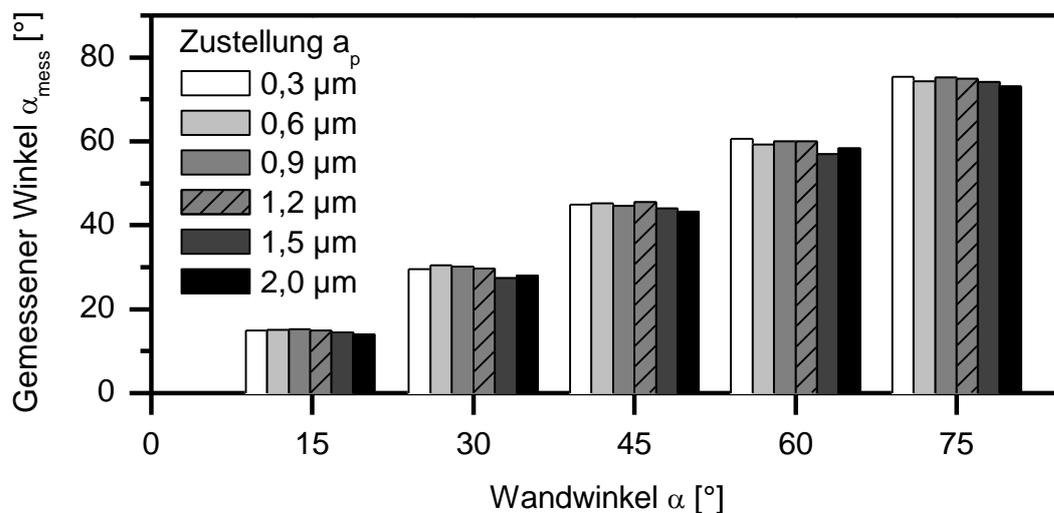


Abbildung 5.16: Gemessene Wandwinkel bei unterschiedlichen Zustellwerten (Feinschlichten)

5.5 Regressionsfunktionen

In diesem Kapitel werden aus den vorangegangenen Ergebnissen Funktionen abgeleitet, um für jeden Wandwinkel einer zu fertigenden 2,5D-Kavität einen entsprechenden Zustellwert zu berechnen, um eine optimierte Oberflächengüte zu erzielen. In Abbildung 5.17 sind jeweils die aus den Messergebnissen besten Zustellungen bei jedem Wandwinkel für die Schrupp-, Schlicht- und Feinschlichtbearbeitung dargestellt. Zudem wurde eine Regressionsfunktion basierend auf einem trigonometrischen Verlauf für jeden Bearbeitungsmodus abgeleitet, da diese rein geometrisch den mathematischen Zusammenhang zwischen einer Zustellung und einem zugehörigen Wandwinkel wiedergibt.

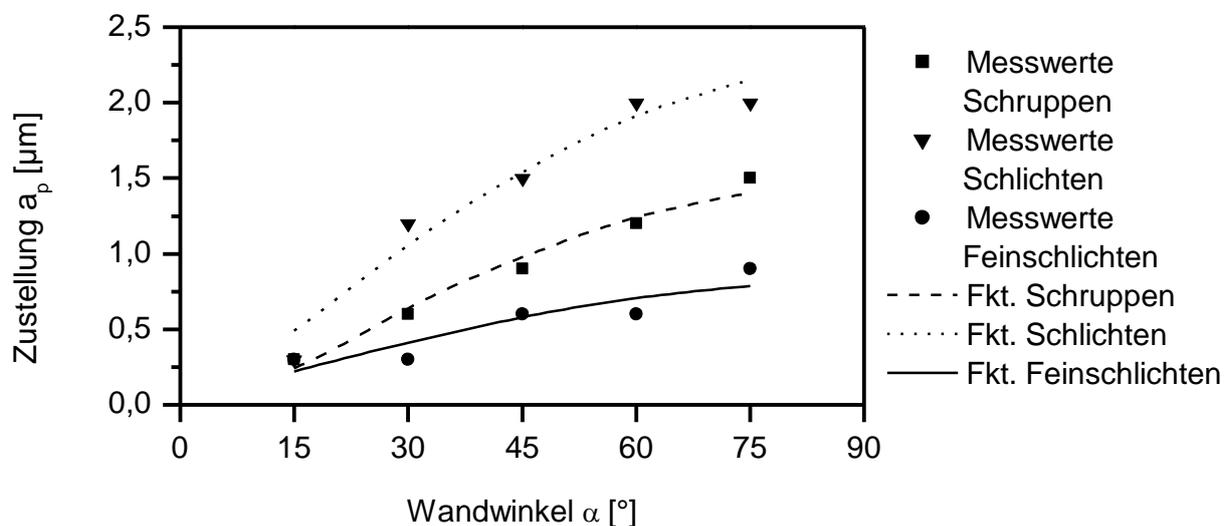


Abbildung 5.17: Optimierte Zustellwerte für die Schrupp-, Schlicht- und Feinschlichtbearbeitung in Abhängigkeit vom Wandwinkel

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass bei der Schruppbearbeitung die Zustellwerte mit größer werdendem Winkel nahezu linear ansteigen. Die Ergebnisse der Schlichtbearbeitung zeigen, dass hier die kinematischen Einflüsse stärker zum Tragen kommen und der Verlauf der im Diagramm dargestellten Funktion besser mit einem trigonometrischen Verlauf zwischen $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ korreliert. Für die Feinschlichtbearbeitung lagen die optimalen Zustellungen unterhalb von $a_p = 0,9 \mu\text{m}$. Für die verwendete Entladeenergie wirkten sich größere Zustellungen negativ auf das Prozessergebnis aus. Aus diesem Grund liegt hier die ermittelte Funktion deutlich unter denen der anderen beiden Bearbeitungsmodi.

Für eine weitere Berechnung optimaler Zustellungen wurden, wie im Diagramm dargestellt, Näherungsfunktionen abgeleitet. Die zugehörigen Formeln sind im Folgenden dargestellt:

Schruppen: $a_p(\alpha)[\mu\text{m}] = 1,64 \cdot \sin\alpha - 0,185$ Formel 5.1

Schichten: $a_p(\alpha)[\mu\text{m}] = 2,34 \cdot \sin\alpha - 0,116$ Formel 5.2

Feinschichten: $a_p(\alpha)[\mu\text{m}] = 0,80 \cdot \sin\alpha - 0,012$ Formel 5.3

Diese Formeln können dazu verwendet werden, um die Fertigung von variablen Wandwinkeln optimal auszulegen. Dies wird im folgenden Kapitel 5.6 anhand eines Validierungsbeispiels bestätigt.

5.6 Validierung an einer sphärischen Geometrie

Um nachzuweisen, dass die für die Schlichtbearbeitung ermittelte Regressionsfunktion (Formel 5.2) die erarbeiteten Ergebnisse abbildet, wurde eine sphärische Kavität hergestellt. Dabei wurden gemäß der abgeleiteten Funktion die optimalen Zustellungen für definierte Abschnitte der Kavität berechnet (Tabelle 5.4), die approximiert die in Abbildung 5.18 dargestellten Wandwinkel repräsentieren. Die Geometrie mit einem Radius von $r = 2$ mm wurde als offene Tasche gefertigt, um eine bessere Zugänglichkeit für den Messprozess zu gewährleisten. In Abbildung 5.18 sind die offene sphärische Kavität und deren unterschiedliche Tiefensegmente dargestellt, die mit der zugehörigen optimierten Zustellung gefertigt wurden. Vor dem Herstellungsprozess wurden die entsprechenden Werte für die Verschleißkompensation ermittelt, um die verschleißbedingte Geometrieabweichung zu minimieren. Die Vorgehensweise entspricht dabei der in Kapitel 5.1.2 beschriebenen.

Tiefensegment	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Winkel α [°]	75	60	45	30	15
Berechnete Zustellung $a_{p,cal}$ [μm] (Schichten)	2,2	1,9	1,5	1,0	0,5
Segmenttiefe T _s [mm]	0 bis -0,598	-0,598 bis -1,118	-1,118 bis -1,539	-1,539 bis -1,840	-1,840 bis -2,0

Tabelle 5.4: Berechnete Zustellwerte für die aufeinanderfolgenden Tiefenbereiche

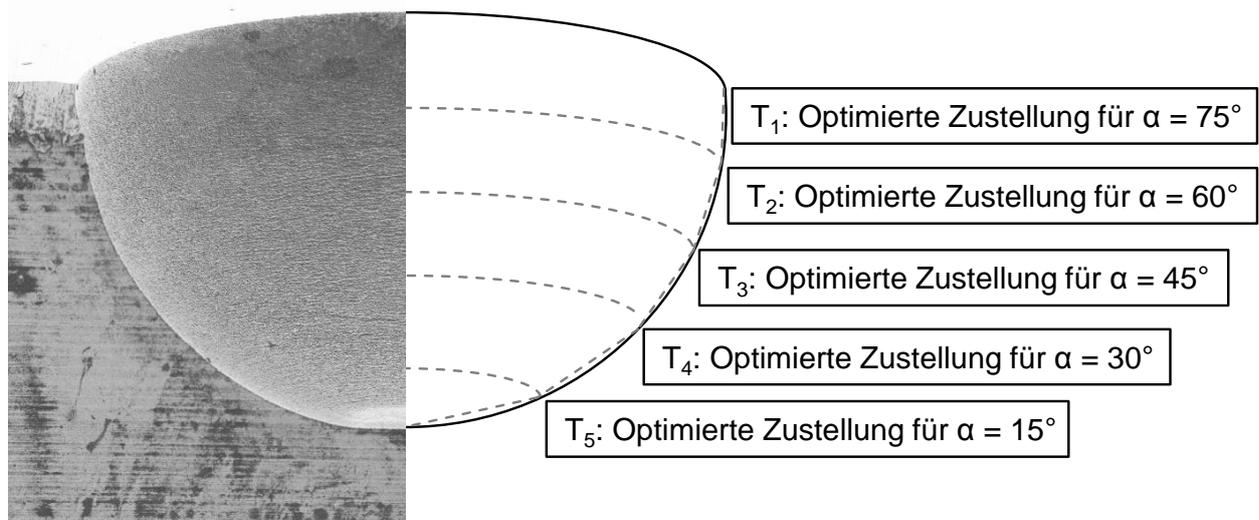


Abbildung 5.18: Sphärische Kavität, gefertigt mit optimierten Zustellwerten in Abhängigkeit vom approximierten Wandwinkel

Für die Messung und Beurteilung der Oberfläche wurde die offene sphärische Geometrie ebenfalls in die Tiefensegmente T_1 bis T_5 unterteilt und diese jeweils auf ihre Oberflächenqualität hin untersucht. Wie schon bei den vorherigen Versuchen wurde die Oberflächenmessung gemäß der Vorgehensweise aus Kapitel 5.1.3 mit sechs einzelnen Messstrecken durchgeführt, um eine statistische Absicherung zu gewährleisten. Im Diagramm in Abbildung 5.19 sind die Messergebnisse dargestellt und den minimalen Rauheitswerten aus den Untersuchungen an den Winkelschrägen aus Kapitel 5.3.1 gegenübergestellt.

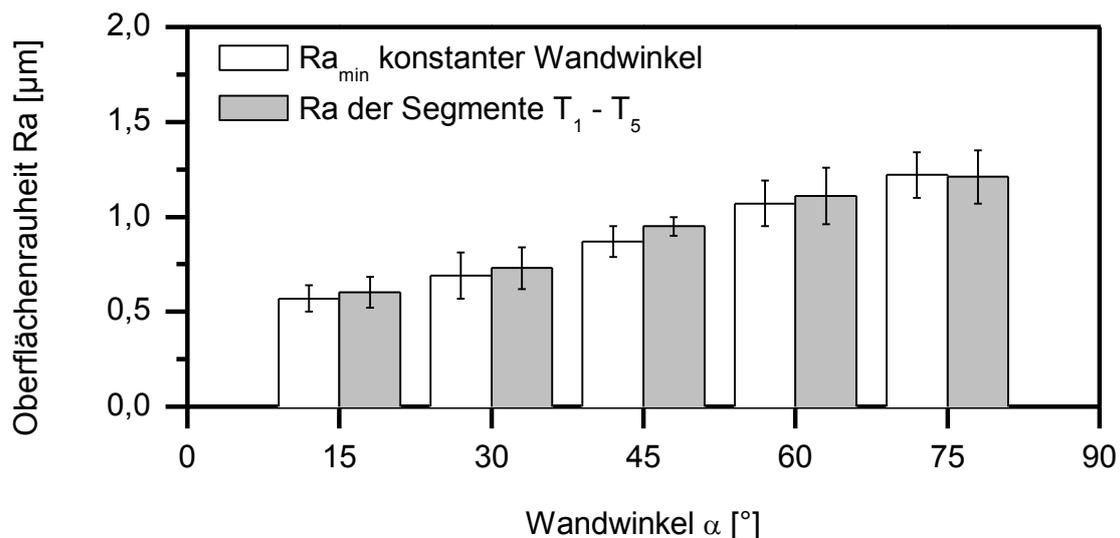


Abbildung 5.19: Oberflächengüte der approximierten Wandschrägen der sphärischen Geometrie und der Einzelsegmente (Schlichtbearbeitung)

Der Darstellung ist zu entnehmen, dass die Rauheitswerte von einem approximierten Wandwinkel von $\alpha = 75^\circ$ (T_1) bis zum Winkel von $\alpha = 15^\circ$ (T_1) abnehmen. Diese Tendenz ist bereits bei den Versuchen in Kapitel 5.3.1 aufgetreten und wurde durch die berechnete Regressionsfunktion entsprechend abgebildet.

Beim Vergleich der Ergebnisse der sphärischen Kavität und der Wandschrägen bei gleichem bzw. approximiertem Wandwinkel ist deutlich zu erkennen, dass die Werte der sphärischen Kavität immer über denen der konstanten schrägen Flächen liegen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die fünf Segmente T_1 bis T_5 lediglich Annäherungen an einen Winkel darstellen und dieser über das gesamte Segment hin nicht konstant bleibt. Es gibt demnach Bereiche innerhalb eines Segments, für die die Zustellung nicht optimal ist. Bei einer konstanten Winkelschräge tritt dieser Effekt nicht auf. Dennoch konnten die Ergebnisse durch die Regressionsfunktion in hinreichender Genauigkeit wiederholt und damit bestätigt werden.

5.7 Optimierte Vorschubgeschwindigkeiten

Da die Bahnerosion ein NC-gesteuerter Prozess ist, bei dem eine Kavität Ebene für Ebene in die Tiefe gearbeitet wird, ist die Bearbeitungszeit bei einer bestimmten Werkstoffpaarung durch die Werkzeugelektrodengröße, die Erosionsparameter, die z-Zustellung je Ebene, die Bahnüberlappung und die Vorschubgeschwindigkeit v_f beeinflusst. Da die ersten drei Größen durch die herzustellende Geometrie und die Anforderungen an die Oberflächenrauheit definiert sind, können die Prozesszeiten maßgeblich durch die Bahnüberlappung und die Vorschubgeschwindigkeit in lateraler Richtung beeinflusst werden. Um einen effizienten Prozess zu gewährleisten, wurden im Rahmen dieser Arbeit diese beiden Parameter unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Kapitel 5.2, 5.3 und 5.4 untersucht. Es sollte also die Oberflächengüte nicht negativ beeinflusst werden, um bei Schrupp-, Schlicht- und Feinschlichtbearbeitung eine möglichst gute Voraussetzung für die darauffolgenden Prozessschritte zu schaffen.

Als Werkzeug für die Versuchsreihen wurde eine Stabelektrode aus WC-6Co mit einem Durchmesser von 300 μm verwendet. Um das Ergebnis nicht negativ durch Beschleunigungs- und Abbremsseffekte der Maschine zu beeinflussen, wurde eine gerade, längliche, aber dennoch flächige Struktur für die Geschwindigkeitstests festgelegt, um auch eine Aussage über die Bahnüberlappung treffen zu können. Die Testkavität bestand aus einer Nut, die mit nebeneinanderliegenden Werkzeugelektrodenbahnen im pendelnden Modus

hergestellt wurde. Die Abbildung 5.20 zeigt die Probengeometrie und deren Abmaß. Die in der Abbildung dargestellte und durch den Werkzeugelektrodendurchmesser hervorgerufene Eckenverrundung an der Kavität wurde bei der Berechnung der Abtragsrate berücksichtigt. Diese Geometrie wurde für jeden Parametersatz in einer Tiefe von 50 μm in den Stahl 30CrMo6 eingebracht. Die Versuche wurden für die Bearbeitungsmodi „Schruppen“ und „Schlichten“ durchgeführt. Auf „Feinschlichten“ wurde bewusst verzichtet, da hier durch das sehr geringe Abtragsvolumen je Entladung das Optimierungspotential sehr gering ist. Für die Untersuchungen wurden dieselben Erosionsparameter verwendet, wie bei den Versuchen zur Optimierung der Zustelltiefen in den Kapiteln 5.2 und 5.3.

In einer ersten Versuchsreihe wurde untersucht, ob sich verschiedene Bahnüberlappungen auf die Oberflächenrauheit der gefertigten Kavität auswirken. Dazu wurde die Testkavität mit Bahnüberlappungen von 30 % bis 70 % gefertigt und anschließend die Oberflächenrauheit mit einem optisch-konfokalen Messsystem bestimmt. Die sich ergebenden Oberflächengüten sind im nachfolgenden Diagramm dargestellt (Abbildung 5.21).

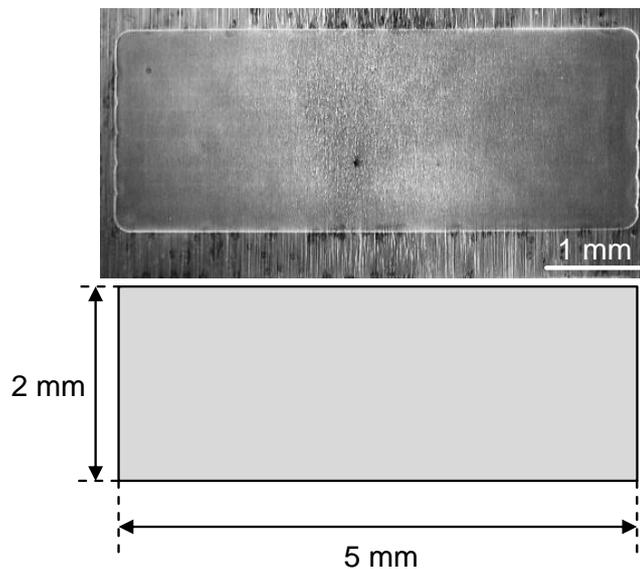


Abbildung 5.20: Testgeometrie zur Optimierung der Vorschubgeschwindigkeit

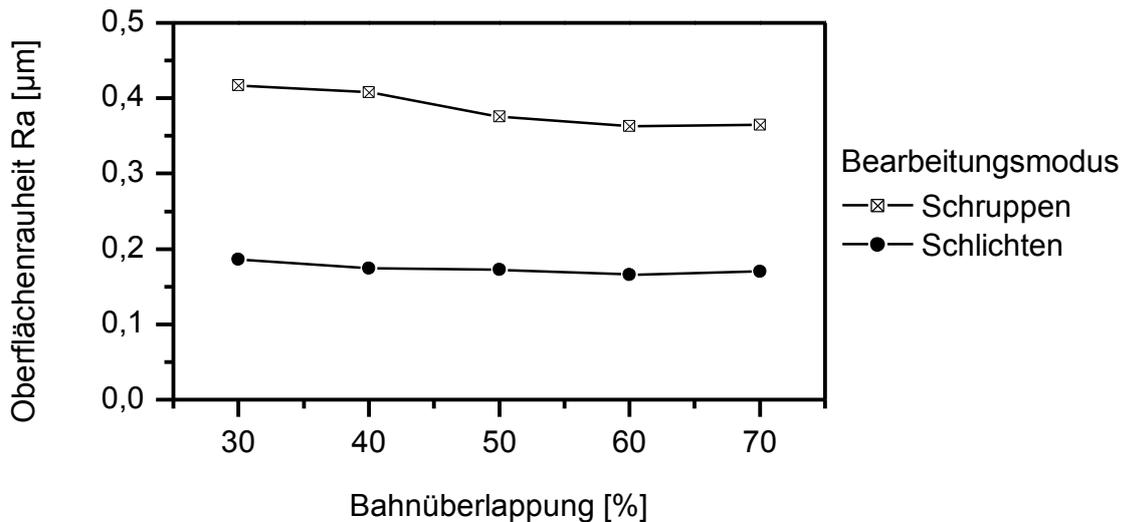


Abbildung 5.21: Oberflächenrauheit bei Variation der Bahnüberlappung

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Bahnüberlappung beim Schlichten keinen signifikanten Einfluss auf die Oberflächen hat. Dagegen ist bei der Schruppbearbeitung bei einer Bahnüberlappung von 50 % eine erhebliche Verbesserung der Oberflächengüte gegenüber kleineren Überlappungen zu verzeichnen. Das lässt darauf schließen, dass es bei höheren Entladeenergien vorteilig ist, jede zu bearbeitende Stelle der Kavität doppelt anzufahren, um entstandene Rauheitsspitzen nachträglich zu glätten.

Der allgemeine Verlauf des Graphen weist eine leichte Abnahme der Oberflächenrauheit bei größer werdenden Bahnüberlappungen auf. Bei den weiteren Untersuchungen zur Optimierung der Vorschubgeschwindigkeit wurde mit einer Bahnüberlappung von 60 % gearbeitet, da hier eine um $\Delta\text{MRR} = 0,0036 \text{ mm}^3/\text{min}$ höhere Abtragsrate im Vergleich zur Abtragsrate bei einer Überlappung von 70 % bei nahezu gleicher Oberflächengüte erreicht wurde.

5.7.1 Schruppen

Um den Einfluss der lateralen Vorschubgeschwindigkeit auf die Abtragsrate bei der Schruppbearbeitung zu untersuchen, wurden den Geschwindigkeiten $v_f = 1,5 \text{ mm/s}$, $2,0 \text{ mm/s}$, $3,0 \text{ mm/s}$, $4,0 \text{ mm/s}$, $6,0 \text{ mm/s}$, $8,0 \text{ mm/s}$ die z-Zustellungen von $a_p = 0,3 \text{ µm}$, $0,6 \text{ µm}$, $0,9 \text{ µm}$, $1,2 \text{ µm}$, $1,5 \text{ µm}$, $2,0 \text{ µm}$ überlagert. Das Diagramm in Abbildung 5.22 zeigt den Verlauf der Abtragsraten für unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten der Werkzeugelektrode und z-Zustellungen.

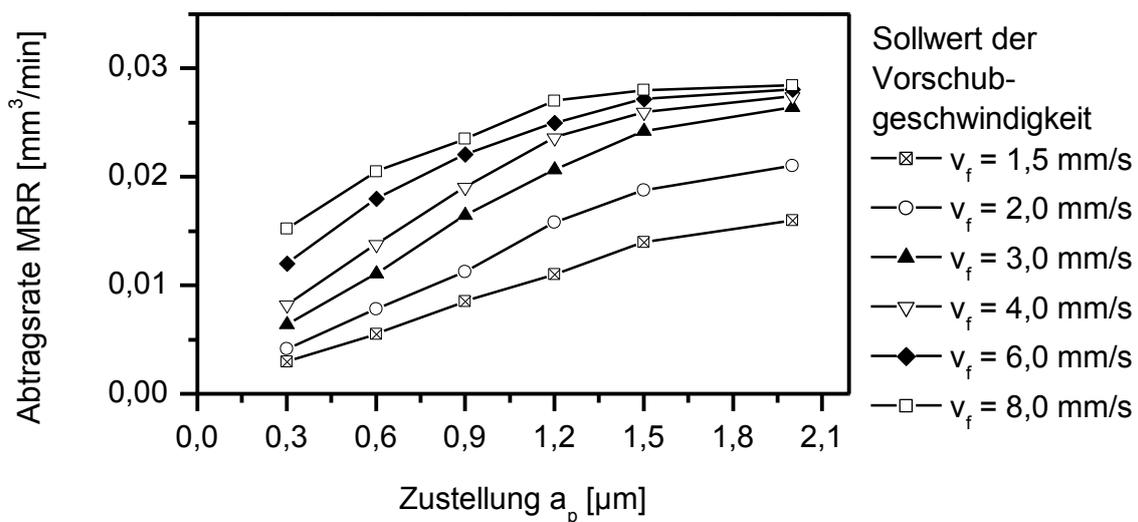


Abbildung 5.22: Abtragsrate bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit und der z-Zustellung (Schruppen)

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass sich bei der Schruppbearbeitung im unteren Geschwindigkeitsbereich bis $v_f = 2,0$ mm/s ein nahezu linearer Anstieg bei größer werdenden Ebenenabständen bzw. z-Zustellungen einstellt. Besonders bei der kleinsten Vorschubgeschwindigkeit zeichnet sich deutlich ab, dass durch eine Verdopplung der Zustellung eine Verdopplung des volumetrischen Abtrags realisiert werden kann. Hier findet also bei allen Zustellungen ein kontinuierlicher Erosionsprozess statt, bei dem die Vorschubregelung der Maschine minimal in den Prozess eingreift. Dieser lineare Zusammenhang ist ebenfalls bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 3,0$ mm/s und $v_f = 4,0$ mm/s bis zu einer z-Zustellung von $a_p = 1,2$ μm zu erkennen. Ab diesem Zeitpunkt wird der Erosionsprozess aufgrund von häufig auftretenden Kurzschlüssen verzögert und angegebenen Sollwerte der Vorschubgeschwindigkeit nicht mehr erreicht. Besonders stark wirkt sich dies bei größer werdenden Vorschubgeschwindigkeiten aus. Schon bei $v_f = 2$ mm/s ist über ansteigende z-Zustellungen ein leicht degressiver Kurvenverlauf zu erkennen. Dieser Effekt nimmt mit größer werdenden Vorschubgeschwindigkeiten zu. Bei den Sollwerten der Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 6$ mm/s und $v_f = 8$ mm/s wird die Bewegung der Elektrode durch die Regelung der Maschine so stark gebremst, dass sich die Graphen asymptotisch einem Wert von $\text{MRR} = 0,028$ mm^3/min nähern.

Bei der Messung der Oberflächengüte hat sich gezeigt, dass die Vorschubgeschwindigkeit keinen merklichen Einfluss hat, aber sich eine leichte Verbesserung der Oberflächengüte bei ansteigenden z-Zustellungen ergibt. So liegt die Oberflächengüte bei einer Zustellung von $a_p = 0,3$ μm im Bereich von

$R_a = 0,54 \mu\text{m}$ bis $R_a = 0,61 \mu\text{m}$ und bei der Zustellung von $a_p = 2,0 \mu\text{m}$ zwischen $R_a = 0,49 \mu\text{m}$ bis $R_a = 0,57 \mu\text{m}$. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch eine größere Zustellung der Funkenpalt zwischen Werkzeugelektrode und Werkstück verkleinert wird. Dadurch wiederum wird die Entladeenergie abgesenkt, die benötigt wird, um die Funkenstrecke zu durchschlagen, wodurch sich kleinere Entladekrater an der Werkstückoberfläche ausbilden.

5.7.2 Schlichten

Die entsprechenden Ergebnisse für die Schlichtbearbeitung sind in Abbildung 5.23 dargestellt. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass sich aufgrund der niedrigeren Entladeenergien deutlich früher eine negative Beeinflussung des linearen Anstiegs der Abtragsrate bei größer werdenden z-Zustellungen einstellt. Hier werden also die Sollwerte Vorschubgeschwindigkeit schon früher nicht mehr erreicht, da das Material nicht schnell genug abgetragen wird und die Regelung der Maschine daraufhin die Elektrodenbewegung verlangsamt. So kann lediglich bei $v_f = 1,5 \text{ mm/s}$ und $v_f = 2 \text{ mm/s}$ bis zu einer Zustellung von $a_p = 0,9 \mu\text{m}$ von einer nahezu linearen Steigerung des Verlaufs der Abtragsrate ausgegangen werden. Es ist auffällig, dass bei der kleinsten Zustellung von $a_p = 0,3 \mu\text{m}$ die Abtragsraten bei den Geschwindigkeiten von $v_f = 3 \text{ mm/s}$ auf $v_f = 6,0 \text{ mm/s}$ und von $v_f = 4 \text{ mm/s}$ auf $v_f = 8,0 \text{ mm/s}$ nicht verdoppeln, wie es noch bei der Schruppbearbeitung der Fall war. Das bedeutet, dass bei $v_f = 6,0 \text{ mm/s}$ und $v_f = 8,0 \text{ mm/s}$ schon bei $a_p = 0,3 \mu\text{m}$ vermehrt Kurzschlüsse auftreten und somit kein kontinuierlicher Erosionsprozess stattfindet. Zudem ist ersichtlich, dass bei allen Vorschubgeschwindigkeiten die Steigerung der Abtragsrate ab der Zustellung von $a_p = 1,2 \mu\text{m}$ nahezu stagniert. Ab diesem Punkt erhöht sich der volumetrische Abtrag in allen Geschwindigkeitsprofilen um lediglich $\Delta\text{MRR} = 0,005 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Das Ergebnis der Messung der Oberflächenrauheit ist äquivalent zu dem der Schruppbearbeitung. Auch hier ist kein eindeutiger Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit zu erkennen. Bei größer werdenden z-Zustellungen ist dagegen eine leichte Verbesserung der Oberflächengüte zu vermerken. Hier verbessert sich die Oberflächenrauheit ausgehend von $R_a = 0,183 \mu\text{m}$ bis $R_a = 0,205 \mu\text{m}$ bei einer z-Zustellung von $a_p = 0,3 \mu\text{m}$ bis zu einer Oberflächengüte zwischen $R_a = 0,172 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,184 \mu\text{m}$ bei der Zustellung von $2,0 \mu\text{m}$.

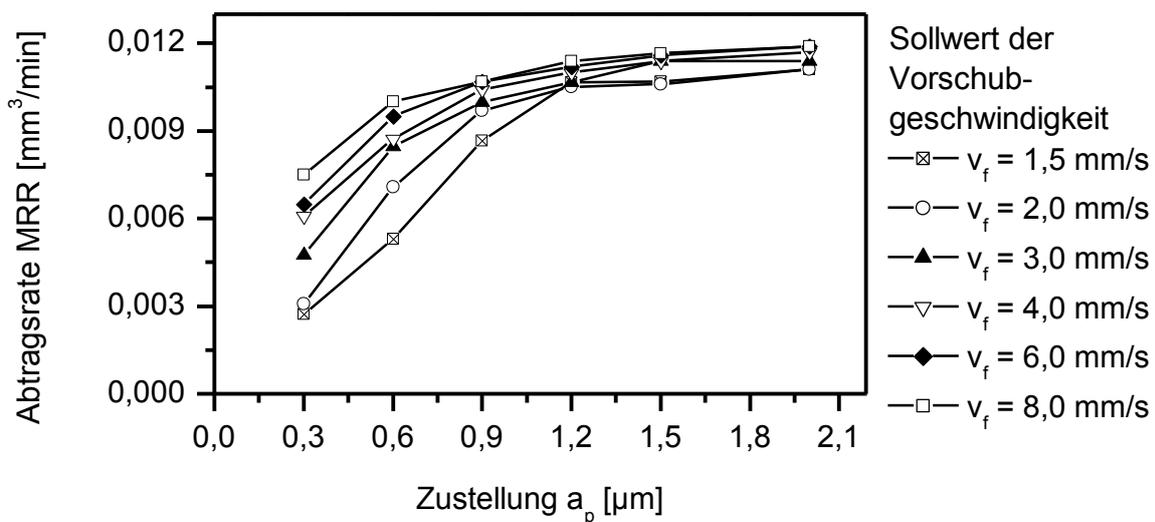


Abbildung 5.23: Abtragsrate bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit und der z-Zustellung (Schlichten)

5.8 Fazit

In den dargestellten Arbeiten wurde der Einfluss der Werkzeugelektrodenzustellung auf variierende Wandwinkel zwischen $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ untersucht, um im Anschluss jeweils eine Regressionsfunktion abzuleiten, die die optimalen Zustellungen für die Fertigung von variablen Wandwinkeln innerhalb einer 2,5D-Kavität wiedergibt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Zustellung der Werkzeugelektrode bei dem Übergang von einer Bearbeitungsebene zur nächsten ein maßgeblicher Faktor für die sich ausbildende Oberflächenrauheit an schrägen Wänden ist. Dabei wurden die drei unterschiedlichen Bearbeitungsmodi Schruppen, Schlichten und Feinschlichten bei der Fertigung von Wandwinkelschrägen untersucht. Zudem wurde die Kantenverrundung der Werkzeugelektrode nach der Fertigung einer jeden Winkelschräge gemessen und der Einfluss unterschiedlicher Zustellwerte auf die Geometrieabweichung ermittelt. Für die Versuchsreihen wurden Werkzeugelektroden aus WC-6Co mit einem Durchmesser von $D = 300 \mu\text{m}$ verwendet.

Für alle drei Bearbeitungsmodi konnte nachgewiesen werden, dass sich größere Zustellungen tendenziell für die Fertigung von großen Wandwinkeln besser eignen. Die exakte Zustellung für die einzelnen Wandwinkel ist allerdings von der Entladeenergie abhängig. So haben die Zustellungen $a_p = 1,5 \mu\text{m}$ und $a_p = 2,0 \mu\text{m}$ einen negativen Einfluss auf das Prozessergebnis beim Feinschlichten, da die Größe der Zustellung hier schon im Bereich des Funkenspalts liegt und somit der Abtragprozess überwiegend lateral an der

Werkzeugelektrode verläuft. Dies konnte durch den Verschleiß an der Kante der Werkzeugelektrode nachgewiesen werden. Der Kantenverschleiß hat sich hier für diese beiden Zustellungen nahezu verdoppelt. Bei den ersten Zustellwerten $a_p = 0,3 \mu\text{m}$, $0,6 \mu\text{m}$ und $0,9 \mu\text{m}$ hingegen blieb die Kantenverrundung bei ansteigenden Wandwinkeln nahezu konstant. Dieses Phänomen konnte bei der Schrupp- und Schlichtbearbeitung nicht beobachtet werden. Hier stellte sich bei einem Wandwinkel von $\alpha = 45^\circ$ ein Wendepunkt in der Kantenverrundung heraus. Für kleine Wandwinkel steigt hier die Verrundung mit größer werdender Zustellung an. Für Winkel größer $\alpha = 45^\circ$ kehrt sich dieses Phänomen entsprechend um.

Die Ergebnisse der geometrischen Messung der Wandwinkelschrägen haben für die Schrupp- und Schlichtbearbeitung gezeigt, dass die Zustellung keinen Einfluss auf auftretende Geometrieabweichungen hat. Es wurden maximale Winkelabweichungen von $\Delta\alpha = \pm 1 \mu\text{m}$ ermittelt. Maßgeblich für die geometrische Genauigkeit ist die Kenntnis über die maximal zulässige Zustellung, die Größe des Funkenspalts, die Verschleißkompensation und die Genauigkeit der Werkzeugmaschine.

Im Anschluss an die experimentellen Untersuchungen wurde für jeden Bearbeitungsmodus eine Regressionsfunktion basierend auf den optimalen Zustellwerten je Wandwinkel berechnet. Als Grundlage für die Berechnung wurde ein trigonometrischer Verlauf angenommen, da dieser mathematisch den geometrischen Zusammenhang zwischen einer Zustellung und einem zugehörigen Wandwinkel wiedergibt.

Zur Validierung wurden mit der Regressionsfunktion für die Schlichtbearbeitung optimierte Zustellwerte für die Fertigung einer sphärischen Kavität berechnet. Die Ergebnisse der Oberflächenmessung haben gezeigt, dass die Näherungsfunktion die Resultate der Untersuchungen an den schrägen Wänden sehr gut abbildet. Mit diesem Ergebnis konnte gezeigt werden, dass sich durch die Optimierung der Zustellung die jeweils besten Oberflächenresultate an schrägen Wänden einstellen lassen.

Um die Fertigungszeit bei der Herstellung von Kavitäten zu senken ohne dabei die Oberflächengüte negativ zu beeinflussen, wurden optimierte Vorschubparameter für die laterale Werkzeugelektrodenbewegung erarbeitet. Dabei war auffällig, dass die Abtragsrate bei den beiden untersuchten Bearbeitungsmodi Schruppen und Schlichten durch höhere Vorschubgeschwindigkeiten bis zu einer bestimmten Sättigungsgrenze gesteigert werden kann. Begünstigt wird die Senkung der Prozesszeiten ebenfalls durch

eine Zunahme der z-Zustellungen bzw. der Abstände der Bearbeitungsebenen. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass durch größere z-Zustellungen eine Verbesserung der Oberflächengüte an planen Flächen herbeigeführt werden kann.

Basierend auf den Ergebnissen dieses Kapitels können bei gegebenen Erosionsparametern in Abhängigkeit eines Wandwinkels optimierte z-Zustellwerte und darauf aufbauend laterale Vorschubgeschwindigkeiten gezielt festgelegt werden, um eine effiziente Bearbeitung einer Kavität mit minimaler Oberflächenrauheit auszuführen.

6 Prozessübergreifende Abtragsregelung

Der prozessbedingte Werkzeugelektrodenverschleiß bei der Mikrobahnerosion wird durch eine kontinuierliche Zustellbewegung des Werkzeugs kompensiert, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben. Die Parameter für die Verschleißkompensation beruhen meist auf Erfahrungswissen und können sich durch veränderte Prozessbedingungen während der Bearbeitung ändern. So haben die fortschreitende Bearbeitungstiefe, die Spülung des Funkenspalts durch das Dielektrikum und eine variierende Bahnüberlappung durch Morphing einen großen Einfluss auf das Ausmaß des Werkzeugelektrodenverschleißes. Somit entspricht die erforderliche Werkzeugelektrodenzustellung nicht dem linearen Verlauf wie er in heutigen Maschinensteuerungen hinterlegt ist (Abbildung 6.1). Zudem nimmt der relative Werkzeugverschleiß mit steigender Bearbeitungstiefe zu, so dass die gewünschte Tiefe bei der Fertigung nicht immer erreicht wird. Hinzu kommt, dass jede Abtrageebene entweder mit der Fertigungsstrategie „von außen nach innen“ oder „von innen nach außen“ abgetragen wird. Je nach Bearbeitungsstrategie kommt es bei einer ungenauen Verschleißkompensation daher zur Ausprägung einer Geometrieabweichung am Grund einer Kavität, da die Werkzeugelektrode bei der Bearbeitung einer Ebene entweder zu viel oder zu wenig zugestellt wird. Dementsprechend erfolgt dann auch der Materialabtrag am Bauteil.

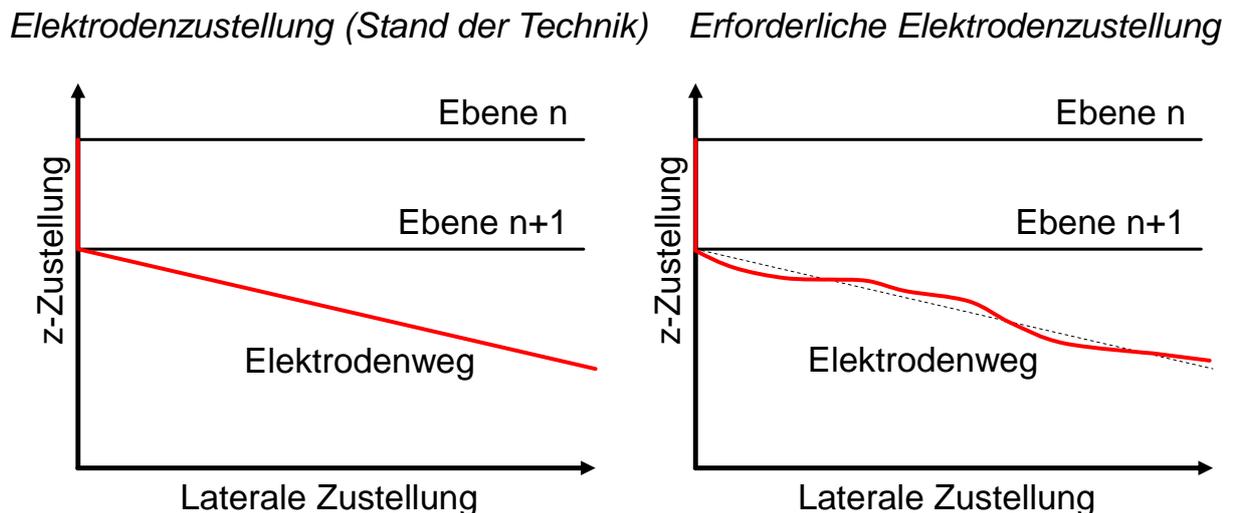


Abbildung 6.1: Werkzeugelektrodenzustellung (Stand der Technik) (links); Erforderliche Werkzeugelektrodenzustellung (rechts) bei der Bearbeitung einer Abtrageebene

In diesem Kapitel wird eine automatisierte Lösung vorgestellt, wie die elektrodenverschleißbedingte Geometrieabweichung detektiert und kompensiert werden kann, ohne das Bauteil aus der Maschine auszuspannen (Abbildung 6.2).

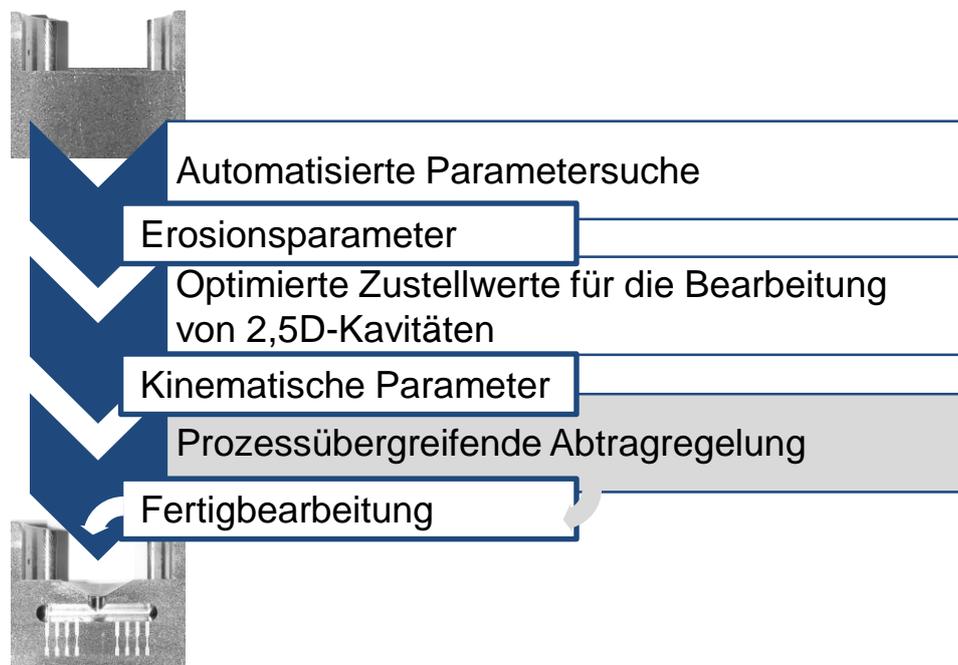


Abbildung 6.2: Eingliederung in den automatisierten Prozessablauf

6.1 Kategorisierung der Geometrieabweichungen

Da die Ausprägung der geometrischen Abweichung sehr stark variieren kann, wird im Folgenden eine Einteilung in Abweichungen mit „globaler“ Auswirkung und mit „lokaler“ Auswirkung vorgenommen. Basierend auf dieser Unterteilung werden dann spezifische Messstrategien abgeleitet, um den Messaufwand zu minimieren und trotzdem ein belastbares Ergebnis zu erhalten.

6.1.1 Abweichung von der Solltiefe

Bei einer fehlerhaften Verschleißkompensation während des Mikrobahnerosionsprozesses treten Abweichungen der gefertigten Tiefe von der Solltiefe einer Kavität auf. Versuchsreihen haben gezeigt, dass diese Abweichung von der Solltiefe bei Materialien, für die noch kein Erfahrungswissen vorliegt, im Bereich von bis zu $\Delta T = 10 \mu\text{m}$ liegen kann. Diese Problematik tritt – allerdings in vermindertem Maße - auch bei Materialien mit bekannten Zustellwerten für die Verschleißkompensation auf.

Die Abweichung von der Solltiefe ist im Folgenden so definiert, dass sie den Abstand zwischen der Solltiefe der Kavität und dem tiefsten gefertigten bzw. gemessenen Punkt der tatsächlich gefertigten Oberfläche der Kavität darstellt. Die Ausprägung der Oberfläche wird dabei nicht betrachtet. Diese wird im folgenden Kapitel näher beschrieben.

6.1.2 Fehlerhafte Oberflächenausprägung

Eine fehlerhafte Oberflächenausprägung kann sich entweder in einer konvexen oder konkaven Wölbung der Oberfläche des Bodens einer Kavität äußern. Hierbei spielen die Größe der Zustellung bei der Verschleißkompensation und die Bearbeitungsstrategie eine zentrale Rolle.

Für die Bearbeitungsstrategie „von außen nach innen“ ergeben sich die folgenden Varianten der Oberflächenausprägung (Abbildung 6.3):

- Zu tiefe Kavität, konkave Oberfläche → Kompensation ist zu hoch
- Solltiefe wurde erreicht, ebene Oberfläche → Kompensation ist korrekt
- Zu flache Kavität, konvexe Oberfläche → Kompensation ist zu gering

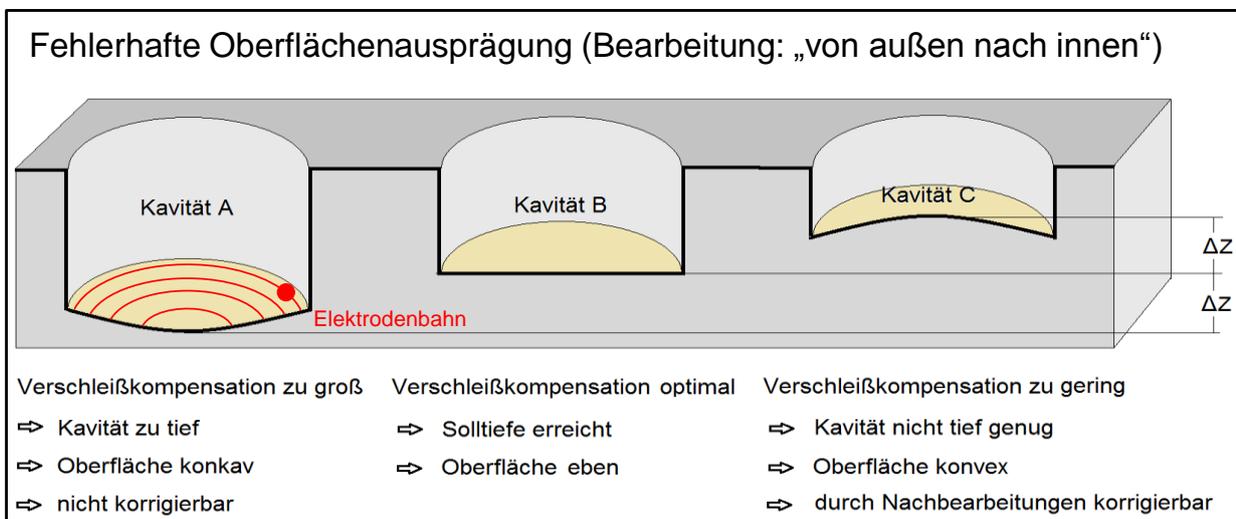


Abbildung 6.3: Oberflächenausprägung bei der Bearbeitungsstrategie „von außen nach innen“

Bei der Bearbeitungsstrategie „von innen nach außen“ dreht sich bei gleicher Tiefe die Ausprägung der Oberflächenwölbung um. So bildet sich bei dieser Strategie bei einem zu großen Kompensationswert in einer zu tiefen Kavität eine konvexe Oberfläche und in einer zu flachen Kavität eine konkave Oberfläche aus.

Um dies zu belegen, wurde mit einer Werkzeugelektrode aus WC-6Co ($D = 100 \mu\text{m}$) eine kreisförmige Kavität ($T_{\text{soll}} = 100 \mu\text{m}$, $D = 1,2 \text{ mm}$) erodiert und deren Tiefe im Anschluss mittels konfokaler Messtechnik ermittelt. Die Kavität wurde mit einem linienförmigen Scan durch deren Mittelpunkt erfasst. Abbildung 6.4 stellt das Profil des Bodens der Kavität dar, wobei es sich bei der roten Linie um die Rohdaten des Sensors handelt und bei der schwarzen um die nach Gauß ($\lambda = 0,8$) gefilterte Profillinie.

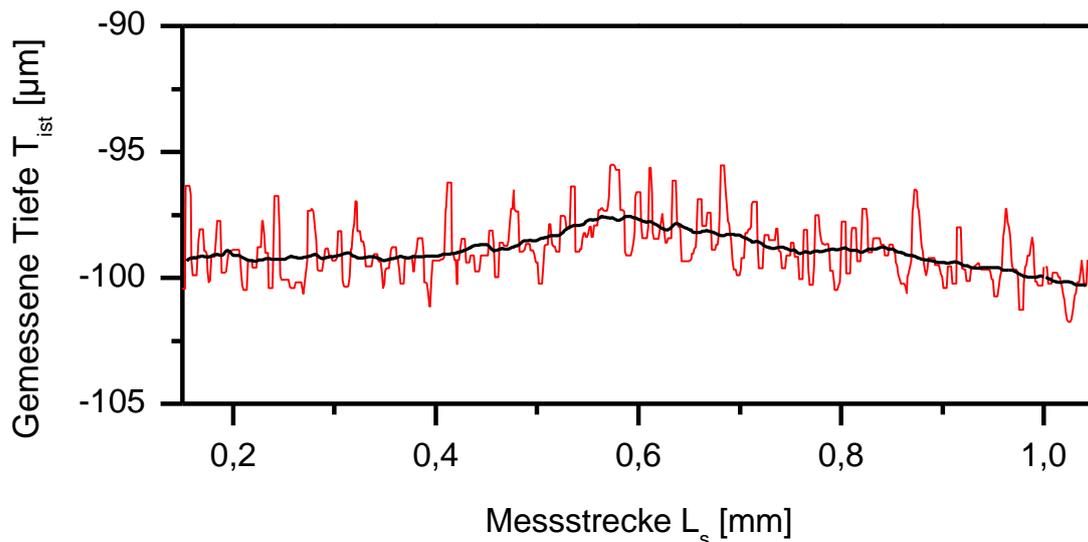


Abbildung 6.4: Ansteigende Profillinie einer konvexen Oberfläche

Aus dem Profilausschnitt des mittleren Bereichs der Kavität wird deutlich, dass die Solltiefe nur annähernd in den Randbereichen erreicht wurde und damit die z-Zustellung bzw. Verschleißkompensation zu gering war. Dies bestätigt auch der Profilverlauf, der in der Mitte der Kavität einen Maximalwert der gemessenen Isttiefe von $T_{\text{ist}} = 97,6 \mu\text{m}$ erreicht. Dies zeigt, dass während der Bearbeitung einzelner Abtragsebenen die Werkzeugelektrode nicht ausreichend zugestellt und somit zur Mitte der Kavität hin zu wenig Material abgetragen wurde. Diese Problematik besteht insbesondere dann, wenn es sich um die Fertigung komplexer Geometrien handelt, da hier die Prozessbedingungen durch wechselnde Spülbedingungen und Morphing stark variieren können.

Eine weitere Variante von Oberflächenausprägungen sind sporadisch und nur lokal auftretende Fehler in der Oberfläche aufgrund von lokal veränderten Prozessbedingungen. Die Größenordnung dieser Artefakte liegt im Bereich von wenigen Mikrometern. Eine mögliche Ausprägung ist die Bildung einer Stufe entlang der Werkzeugelektrodenbahn, deren Ausbildung bspw. durch eine erschwerte Zugänglichkeit des Prozessmediums begünstigt werden kann (Abbildung 6.5).

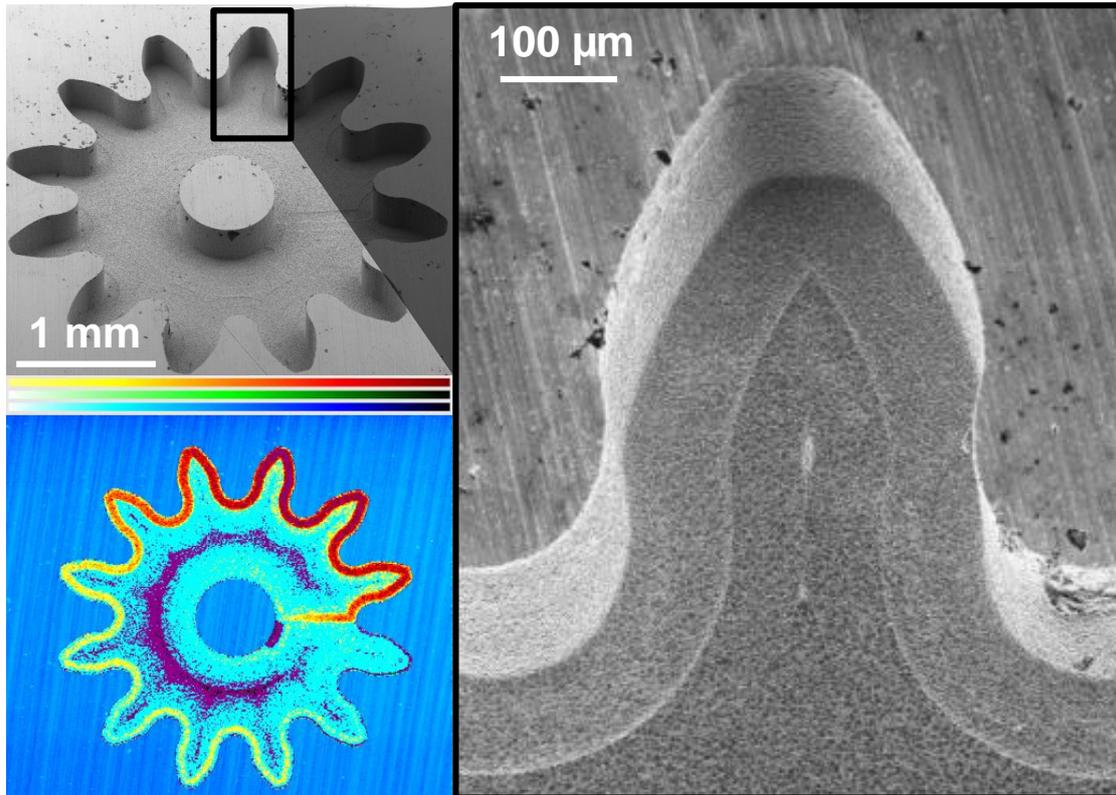


Abbildung 6.5: Lokale fehlerhafte Oberflächenausprägung

Die Abbildung 6.5 zeigt eine Zahnradkavität gefertigt mit der Bearbeitungsstrategie „von außen nach innen“. Die Darstellung links unten wurde nach dem konfokalen Messprinzip aufgenommen und die Höhenunterschiede durch eine unterschiedliche Farbgebung zur rein qualitativen Bewertung kenntlich gemacht. In diesem negativen Beispiel ist zu erkennen, dass sich die Stufenstruktur nur über einen Teil der äußersten Werkzeugelektrodenbahn erstreckt. Dies kann beispielsweise mit einem zu großen Ebenenabstand oder der Anströmrichtung durch das Dielektrikum zu tun haben. Zudem ist eine leichte Absenkung des Bodens in den lilafarbenen Bereichen zu erkennen, die durch Morphing der Werkzeugelektrodenbahn in diesem Bereich der Kavität entstanden ist. Beim Morphing werden die Werkzeugbahnen ausgehend von der Innen- an die Außenkontur kontinuierlich angenähert. Dadurch ergeben sich Bereiche mit unterschiedlichen Bahnüberlappungen.

Die lokale Oberflächenausprägung stellt im Vergleich zu einer Abweichung von der Solltiefe die größere Herausforderung für eine automatisierte Detektion, eine Weiter- und die Endbearbeitung dar.

6.2 Definition von Testkavitäten

Um basierend auf der Unterscheidung der Ausprägung von Geometrieabweichungen Strategien abzuleiten, diese zu erfassen und zu kompensieren, wurden zwei Testgeometrien festgelegt, anhand derer eine Abtragsregelung aufgebaut und validiert werden kann.

Als erste Testkavität wurde eine einfache kreisförmige Testkavität gewählt, die in begleitenden Versuchen mit einer Stabelektrode aus WC-6Co ($D = 100 \mu\text{m}$) gefertigt wurde. Der Durchmesser der Geometrie wurde auf $D = 1 \text{ mm}$ festgelegt und bei der Fertigung eine schneckenförmige Bearbeitungsstrategie gewählt. Eine Draufsicht der Kontur von Testkavität 1 und die dazugehörigen Werkzeugbahnen sind in Abbildung 6.6 links dargestellt. Für die Fertigung der Kavität wurde immer der Stahl 30CrMo6 eingesetzt. Die für die Herstellung der Testgeometrie verwendeten Bearbeitungsparameter können der Tabelle 6.1 entnommen werden.

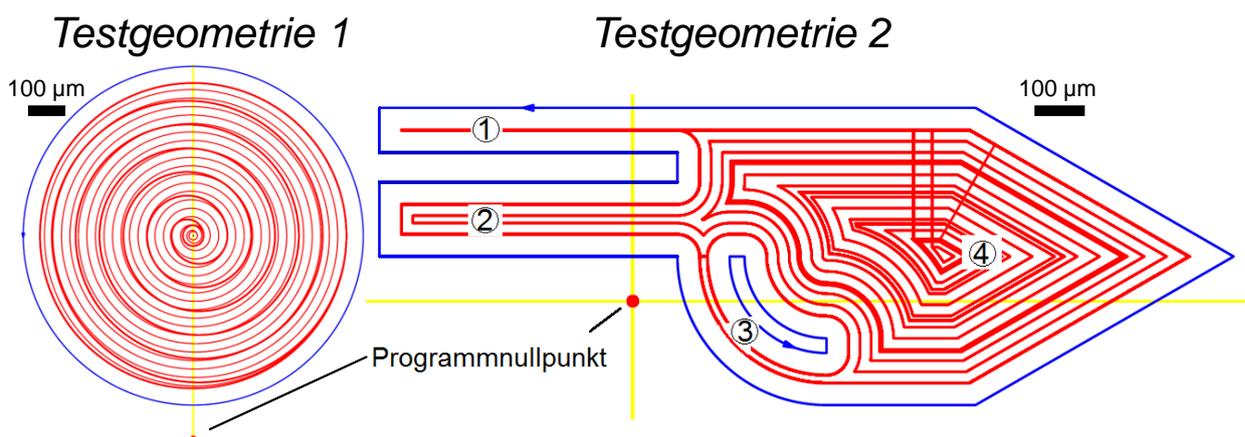


Abbildung 6.6: Testgeometrien für den Aufbau der Abtragsregelung

Um entsprechende Mess- und Weiterbearbeitungsstrategien auch an komplexen Kavitäten testen zu können, wurde eine weitere Kontur entsprechend der Abbildung 6.6 rechts erstellt. Diese Kavität beinhaltet neben zwei schmalen Nuten auch einen flächigen Bereich, der von einer Ecke mit einem Öffnungswinkel begrenzt wird. Die Maße der Kavität sind an den Durchmesser der Werkzeugelektrode angepasst. Die Breite der oberen Nut (1) entspricht dabei genau einem Werkzeugelektrodendurchmesser. Die der unteren Nut (2) entspricht dem 1,5-fachen des Werkzeugelektrodendurchmessers. Dadurch wurden an separaten Strecken unterschiedliche Bahnüberlappungen in derselben Kavität erzeugt. Das Geometriedetail (3) verkörpert eine beliebig geformte nicht zentrisch liegende Inselstruktur. Zudem kommt es fertigungsstrategiebedingt zum Morphing der Werkzeugelektrodenbahn (4), was

zu einem ungewollten Materialabtrag in diesem Bereich führen kann. Der NC-Code der Werkzeugbahn wurde mit der Bearbeitungsstrategie „von außen nach innen“ programmiert. Wie auch bei der Testgeometrie 1 wurde Geometrie 2 mit einer Stabelektrode aus WC-6Co ($D = 100 \mu\text{m}$) in das Werkstückmaterial 30CrMo6 gefertigt. Die verwendeten Prozessparameter sind der Tabelle 6.1 zu entnehmen.

Bearbeitungsstrategie	Von „außen nach innen“ Bahnüberlappung im Schruppmodus = 60 % Bahnüberlappung im Schlichtmodus = 25 %, Schlichtaufmaß = $5 \mu\text{m}$					
Elektroden, Prozessmedium	Werkzeugelektrode: Stabelektrode (WC-6Co, $D = 100 \mu\text{m}$) Werkstückwerkstoff: 30CrMo6 Dielektrikum = Hedma111					
Prozessparameter	Polarität der Werkzeug-elektrode	-	t_i [μs]	1,0	Korrekturfaktor	0,227
	u_0 [V]	80	f_p [Hz]	160	Zustellung [μm]	1,2
	u_e [V]	72	Impulsform	100	Technologie-typ	4000
	i_e [A]	1,2	Servo-verstärkung	600	GAP Frontal [μm]	3,0

Tabelle 6.1: Bearbeitungsparameter für die Fertigung der Testgeometrien

6.3 Vorgehensweise bei der Abtragsregelung

Den zentralen Baustein bei der zu entwickelnden Abtragsregelung stellt der verwendete chromatisch konfokale Weißlichtsensor dar. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, ist dieser direkt in die Mikrobahnerodiermaschine integriert und kann so fertigungsprozessbegleitend eingesetzt werden.

Da bei diesem Messprinzip ein Lichtpunkt auf die Oberfläche des Bauteils fokussiert und das rückgestrahlte Licht aufgefangen und ausgewertet wird, ist von zentraler Bedeutung, dass sich keine Verschmutzungen oder Dielektrikumrückstände auf der Bauteiloberfläche befinden. Um dies sicher zu stellen, wird eine gefertigte Kavität vor einem Messvorgang an der Maschine mit Druckluft für $t_b = 7 \text{ s}$ trocken und sauber geblasen. Hierzu hat sich ein Luftdruck

von $p_b = 2$ bar aus einer Düse ($D_n = 3$ mm; $\varphi = 90^\circ$) im Abstand von 30 mm über dem Bauteil bei einer gleichzeitigen planetären Bewegung mit einem Durchmesser von $D = 10$ mm als zielführend erwiesen.

Ein weiterer Aspekt für eine prozesssichere Messung ist, dass keine Hindernisse den Weg des Lichts während der Messung stören. Während eines Messprozesses mit dieser Art von Sensor sind demnach Bereiche mit großen Höhenunterschieden besonders kritisch zu bewerten. Vor allem an den steilen Kanten am Übergang von der Bauteiloberfläche zum Grund einer Kavität sind Abschattungseffekte zu erwarten (Abbildung 6.7).

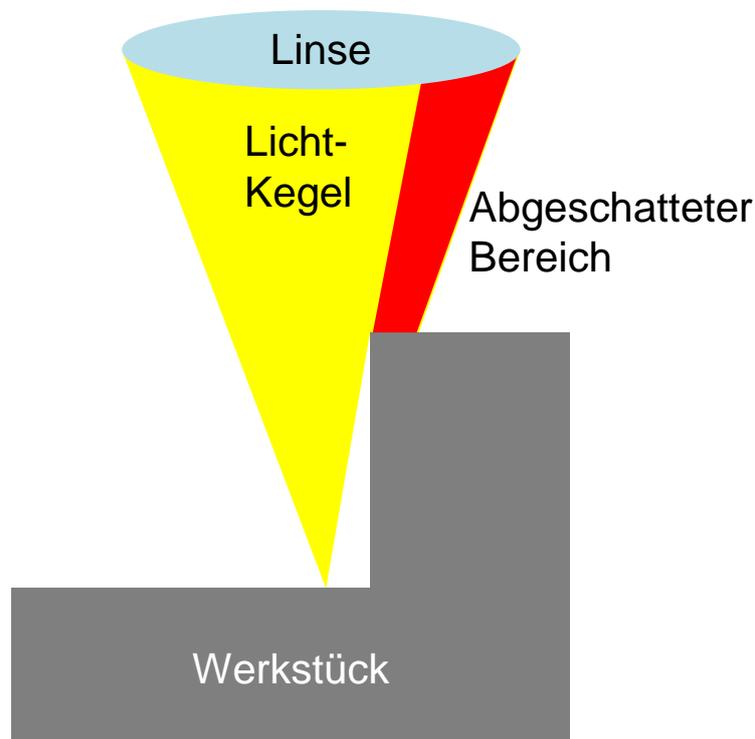


Abbildung 6.7: Kantenabschattung beim konfokalen Messprinzip

Kantenabschattungen äußern sich normalerweise durch fehlerhafte oder gänzlich fehlende Daten in den betroffenen Bereichen. In Abbildung 6.8 ist exemplarisch das Diagramm eines Linienscans durch den Mittelpunkt der Testgeometrie 1 ($T_{\text{soll}} = 70 \mu\text{m}$) dargestellt. Der Grafik ist zu entnehmen, dass die Bereiche des Grundes unmittelbar neben den Kanten nicht korrekt vom Sensor erfasst wurden. Dieser Bereich hat bei einer Tiefe von $T = 70 \mu\text{m}$ eine Länge von etwa $L_{\text{krit}} = 11 \mu\text{m}$. Ab einem Abstand zur Kante größer L_{krit} liefert der Sensor wieder zuverlässige Daten.

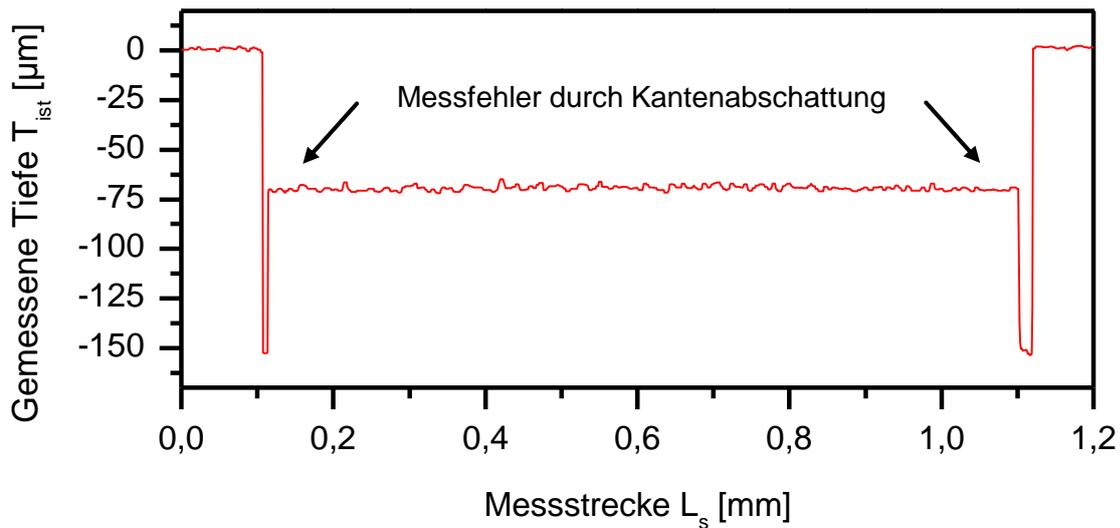


Abbildung 6.8: Linienscan durch eine 70 µm tiefe Testgeometrie 1

Um ein Verständnis über die Größe der abgeschatteten Bereiche bei tieferen Kavitäten zu erlangen, wurde die Testgeometrie 1 in den Tiefen $T = 25 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$ und $400 \mu\text{m}$ hergestellt und jeweils sieben Linienscans durchgeführt und ausgewertet.

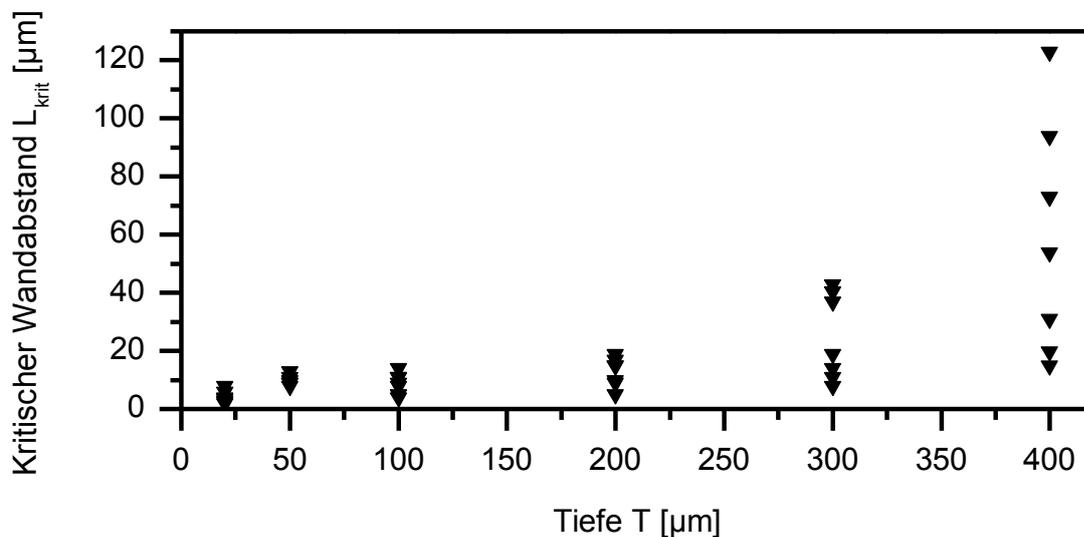


Abbildung 6.9: Kritischer Wandabstand für Kantenabschattung bei ansteigender Tiefe der Kavität

In Abbildung 6.9 ist der jeweils kritische Wandabstand über die Tiefe aufgetragen, bei dem keine Abschattungsfehler mehr aufgetreten sind. Es zeigt sich, dass der Randbereich, in dem es zu Fehlmessungen kommen kann, tendenziell mit zunehmender Tiefe der Kavität überproportional ansteigt. Bis zu einer gefertigten Tiefe von $T = 200 \mu\text{m}$ beläuft sich der gemessene kritische Abstand auf maximal $L_{\text{krit}} = 20 \mu\text{m}$. In allen sieben Versuchen je

Bearbeitungstiefe wurde dieser Wert nicht überschritten. Bei der Messung der Kavitäten mit einer Tiefe von $T = 300 \mu\text{m}$ trat eine sehr große Streubreite der Messergebnisse auf. Der kritische Wandabstand variierte in den Versuchen im Bereich von $L_{\text{krit}} = 7 \mu\text{m}$ bis $L_{\text{krit}} = 46 \mu\text{m}$. Bei der Kavität mit einer Tiefe von $400 \mu\text{m}$ vergrößerte sich die ermittelte Streubreite weiter. Hier wurden in einem Versuch schon bei einem Wandabstand von $L_{\text{krit}} = 124 \mu\text{m}$ fehlerhafte Daten aufgenommen.

Um die Problematik der Kantenabschattung zu umgehen, ist es von zentraler Bedeutung, die kritischen Wandabstände zu kennen, um diese dann bei der Tiefenmessung berücksichtigen zu können. Diese Untersuchung bildet die Basis für die entwickelten Messstrategien zur Detektion von globalen und lokalen Geometrieabweichungen (Kapitel 6.3.1 und 6.3.2).

Optimierte Messstrategien sind hier erforderlich, da ein kompletter Scan, zusammengesetzt aus mehreren Linien, einen zu hohen Messaufwand und eine nicht tragbare Prozesszeit bedeutet.

6.3.1 Messung und Weiterbearbeitung der gefertigten Tiefe

Zur Detektion von Abweichungen von der Solltiefe ist es wichtig, das Höhenniveau der Werkstückoberfläche zu erfassen, das den Ausgangspunkt der Bearbeitung darstellt. Dieses Niveau dient als Referenzhöhe für die spätere Ermittlung der gefertigten Isttiefe der Kavität. Zudem ist es erforderlich, die Abtragstiefe der am höchsten und der am niedrigsten gelegenen Werkzeugelektrodenbahn zu erfassen, da dadurch alle Punkte vorliegen, um eine Weiterbearbeitung einzuleiten. Um die Messzeit so gering wie möglich zu halten, wurde für diese Vermessung ein geradliniger Scan verwendet, der sich in Richtung und Länge an der Bearbeitungsstrategie orientiert. Bei den verwendeten Bearbeitungsstrategien „von innen nach außen“ und „von außen nach innen“ entspricht bei globalen Geometrieabweichungen die höchste und die niedrigste Bahn einer Ebene immer der äußersten oder innersten Bahn, je nach konvexer oder konkaver Oberflächenausprägung. Aus diesem Grund wurde die Bahn des geradlinigen Scans so gewählt, dass deren Startpunkt auf dem Programmnullpunkt der Bearbeitung (siehe Abbildung 6.6) liegt. Dieser Punkt liegt aus Gründen der Genauigkeit immer sehr dicht an der zu fertigenden Kavität und dient auch der Maschine als Höhenreferenz. Durch das Gleichsetzen der Referenzen des Fertigungsprozesses und des Messprozesses kann zudem die Präzision erhöht werden. Der Endpunkt des geradlinigen Scans muss außerhalb der Kavität liegen, um das Nullniveau für die Bearbeitung exakt zu definieren und eine Schrägstellung der Werkstückoberfläche mathematisch berücksichtigen zu

können. Hierbei wird der Mittelwert des Anfangs- und des Endpunkts als Referenzniveau für die weitere Datenauswertung verwendet. Die Richtung des Scans in der x-/y-Ebene wird durch die Bearbeitungsbahnen der Bearbeitungsstrategie bestimmt. Bei den beiden betrachteten Bearbeitungsstrategien existiert je Bearbeitungsebene immer ein Mittelpunkt der Bearbeitung, auf den die immer kleiner werdenden Bahnen konzentrisch zulaufen („von außen nach innen“) oder von dem die Bearbeitung einer Ebene startet (Abbildung 6.10). Im Falle von Kavitäten mit mittigen Inselstrukturen, wurde die Messstrategie so gewählt, dass die innerste Bahn, also die Werkzeugelektrodenbahn, die direkt an die Inselstruktur anliegt, von dem Linienscan erfasst wird. So kann bei allen Geometrievarianten sichergestellt werden, dass die relevanten Höhenniveaus für eine Weiter- und Endbearbeitung der Tiefe der Kavität detektiert werden.

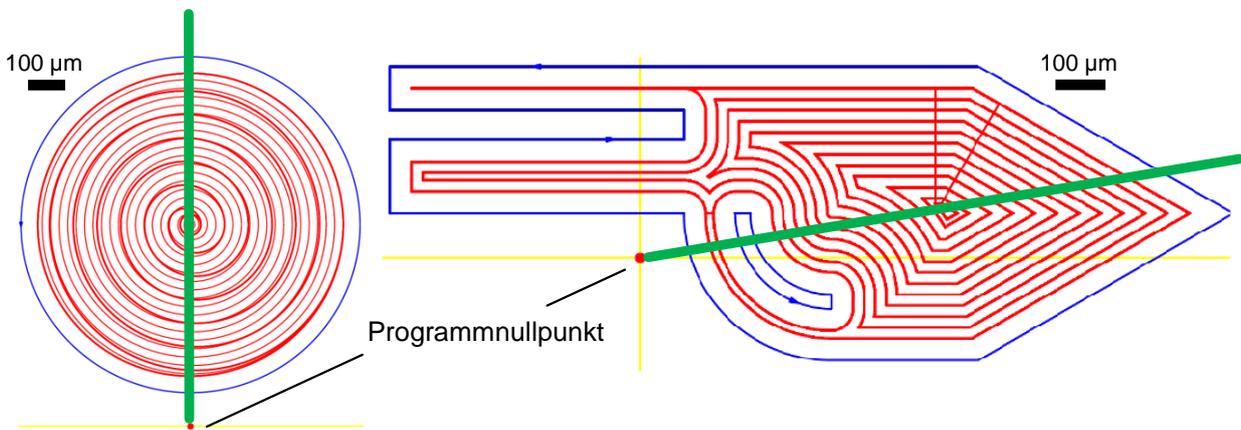


Abbildung 6.10: Geradliniger Scanverlauf über die Testgeometrien 1 und 2

Die Abweichung von der Solltiefe kann bei variierenden Prozessbedingungen und einer nicht korrekten Kompensation des Werkzeugelektrodenverschleißes $\Delta T = 10 \mu\text{m}$ und mehr betragen. Das überschüssige Material muss daher nach Vorbild der Grundbearbeitung ebenfalls in mehreren Schichten abgetragen werden. Hierbei wird nach der Strategie vorgegangen, dass der verwendete NC-Code der Grundbearbeitung dahingehend modifiziert wird, dass der höchste gemessene Punkt der Kavität unter Berücksichtigung der Größe des Funkenspalts als Startpunkt für die folgende Bearbeitung festgelegt wird. Zudem werden die z-Zustellungen im NC-Code der Grundbearbeitung vom Programmende her summiert, bis die Höhe des gemessenen Aufmaßes erreicht ist. Die einzelnen inkrementellen z-Zustellungen und die dazwischenliegenden Bearbeitungsebenen stellen dann den NC-Code für die Weiterbearbeitung dar.

Da bei der Weiterbearbeitung von Abweichungen von der Solltiefe in der Regel viel Restmaterial abgetragen werden muss, wird bei dieser Variante wiederum mit einem Kompensationsfaktor für den Werkzeugelektrodenverschleiß

gearbeitet. Dieser entspricht aber nicht dem der Grundbearbeitung. Es wird ein korrigierter Korrekturfaktor aus dem aktuellen ermittelten Verschleißverhalten der Werkzeugelektrode verwendet, das durch Antasten auf einem Referenzpunkt gemessen wird. Dieser Kompensationsfaktor kommt direkt aus dem Prozess bei aktueller Bearbeitungstiefe und ist daher eine treffendere Annäherung an den realen Wert. Durch die Starttiefe, die inkrementellen z-Zustellungen mit dem zugehörigen NC-Code für die Bearbeitungsebenen und dem angepassten Korrekturfaktor für die Verschleißkompensation erfolgt dann die Weiter- bzw. die Endbearbeitung.

6.3.2 Messung und Weiterbearbeitung fehlerhafter Oberflächenausprägungen

Um fehlerhafte Oberflächenausprägungen innerhalb einer bahnerodierten Kavität detektieren zu können, ist insbesondere bei komplexen Konturen eine einfache, geradlinige Abtastung quer über die Kavität nicht ausreichend. Um die zeilenweise Abtaststrategie der gesamten Kavität und damit eine lange Messdauer zu vermeiden, wurde für diesen Fall der Geometrieabweichung eine neue Abtaststrategie definiert, die auf den Werkzeugbahnen des Bearbeitungsprozesses der gefertigten Kavität basiert. Diese Vorgehensweise ist zulässig, da durch die Rotation der Werkzeugelektrode und durch die z-Zustellungen, die deutlich kleiner sind als der Funkenspalt, der Werkzeugelektrodenabbrand nur stirnseitig und gleichmäßig über die kreisförmige Fläche stattfindet. Deshalb gilt die Voraussetzung, dass entlang der Breite einer Werkzeugelektrodenbahn keine Tiefenabweichungen auftreten, die die Größenordnung der erzielbaren Oberflächenrauheit überschreiten.

Bei einem Messvorgang tastet der konfokale Sensor entsprechend dem NC-Code der untersten Bearbeitungsebene die Oberfläche des Bodens der gefertigten Kavität ab. Dabei befindet sich der Messfleck genau in der Mitte der Werkzeugelektrodenbahn. Die so erfassten Daten werden dann mit einem Filter nach Gauß ($\lambda = 0,8 \mu\text{m}$) gefiltert und die Profillinie der Kavität erzeugt. Abbildung 6.11 zeigt exemplarisch den Profilverlauf einer Kavität (Testgeometrie 1). Der Profilanstieg lässt auf eine Unterkompensation des Werkzeugelektrodenverschleißes schließen.

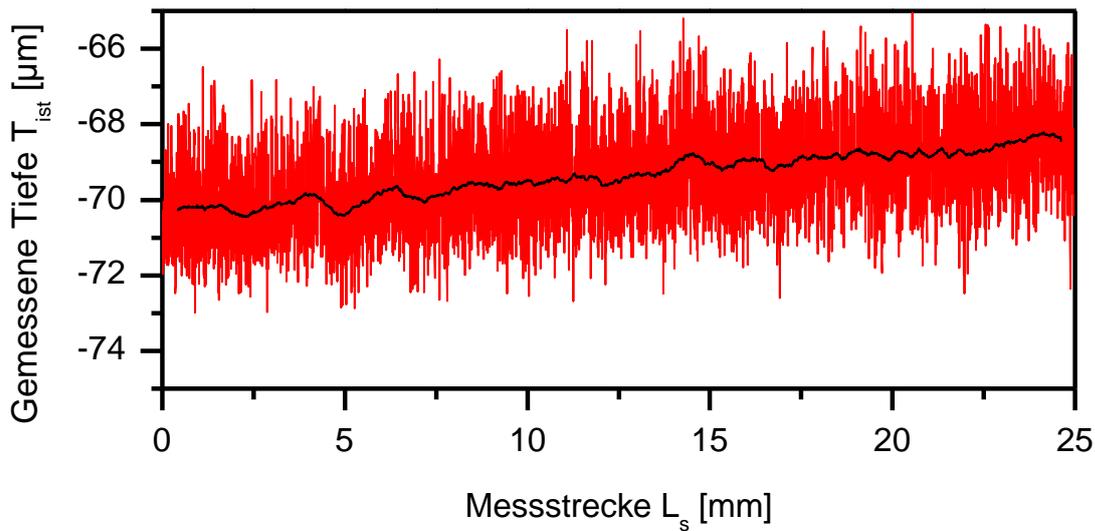


Abbildung 6.11: Tiefenprofil der Testgeometrie 1 entlang der Werkzeugbahn

Für die Korrektur der fehlerhaften Oberflächenausprägung des Bodens der Kavität, wird eine vorherige Bearbeitung auf Solltiefe vorausgesetzt, d.h. dass das tiefste Niveau der Bearbeitung einem kleinen definierten Aufmaß entspricht. Das heißt, dass erst nach dem Korrigieren der Tiefe einer Kavität die Bearbeitung der Oberfläche des Bodens erfolgt. Für diesen Prozessschritt wird wiederum die Werkzeugbahn der ursprünglichen Grundbearbeitung verwendet. Das Niveau des Startpunkts der Weiterbearbeitung wird dabei so gewählt, dass es über dem höchsten gemessenen Punkt des Tiefenprofils liegt. Die Bearbeitungsebenen entsprechen dabei denen der letzten Ebenen der Grundbearbeitung. Dazu wird der NC-Code der Grundbearbeitung ausgelesen und alle Steuerbefehle nach der letzten z-Zustellung entnommen. Unter Berücksichtigung des Funkenspalts, dessen Erfahrungswert ebenfalls aus dem NC-Code der Grundbearbeitung entnommen werden kann, kann auf Basis der Solltiefe und des Niveaus des Startpunkts ein neues Bearbeitungsprogramm erzeugt werden. Die Inkremente der z-Zustellung entsprechen dabei denen der Grundbearbeitung. Bei dieser Variante der Weiterbearbeitung wird mit keiner Verschleißkompensation gearbeitet, da der Materialabtrag im Vergleich zur Grundbearbeitung oder zur Weiterbearbeitung der Tiefe sehr gering ist. Aus diesem Grund ist das Messen, das Weiter- und das Endbearbeiten von fehlerhaften Ausprägungen der Oberfläche einer Kavität als iterativer Prozess anzuwenden (Abbildung 6.12). Dabei variiert der absolute Verschleiß je Bearbeitungsebene sehr stark von einem iterativen Bearbeitungsschritt zum nächsten, was eine exakte Kompensation verhindert.

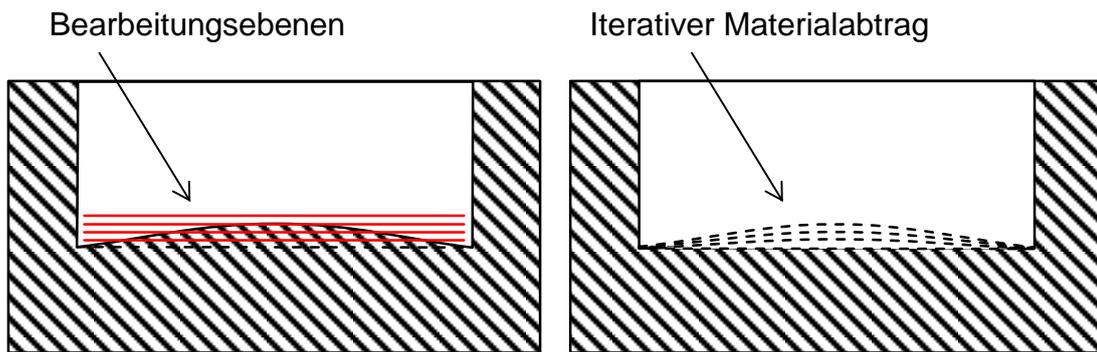


Abbildung 6.12: Bearbeitungsebenen des iterativen Weiter- und Endbearbeitungsprozesses

6.4 Implementierung einer NC-Code-basierten Abtragsregelung

Basierend auf den Vorgehensweisen zur Messung von Tiefe und Oberflächenausprägungen einer Kavität wurde eine NC-Code-basierte Abtragsregelung entwickelt und in einer automatisierten Software umgesetzt. Die programmiertechnische Umsetzung wurde mittels der optischen Programmieroberfläche LabView2009 realisiert. Zur Kommunikation des Benutzers mit der Software wurde eine Benutzeroberfläche programmiert, die sich im Wesentlichen aus vier Modulen zusammensetzt:

- Modul 1: Regelungseinstellungen
- Modul 2: Datenauswertung Oberfläche
- Modul 3: Datenauswertung Tiefe
- Modul 4: Weiterbearbeitungsprogramme

Die Benutzeroberflächen dienen vorwiegend zur Eingabe der Eingangsparameter für die Abtragsregelung und als Anzeige der Ergebnisse der Auswertung der Sensordaten. Letzteres wird jedoch für den automatisierten Ablauf des Programms nicht benötigt.

6.4.1 Modul 1: Regelungseinstellungen

Das Modul 1 ist die Ausgangsoberfläche, auf der die Grundeinstellungen für die Abtastprogramme, zum Steuern des Sensors und die Einstellungen für den Qualitätsregelkreis vorgenommen werden (Abbildung 6.13).

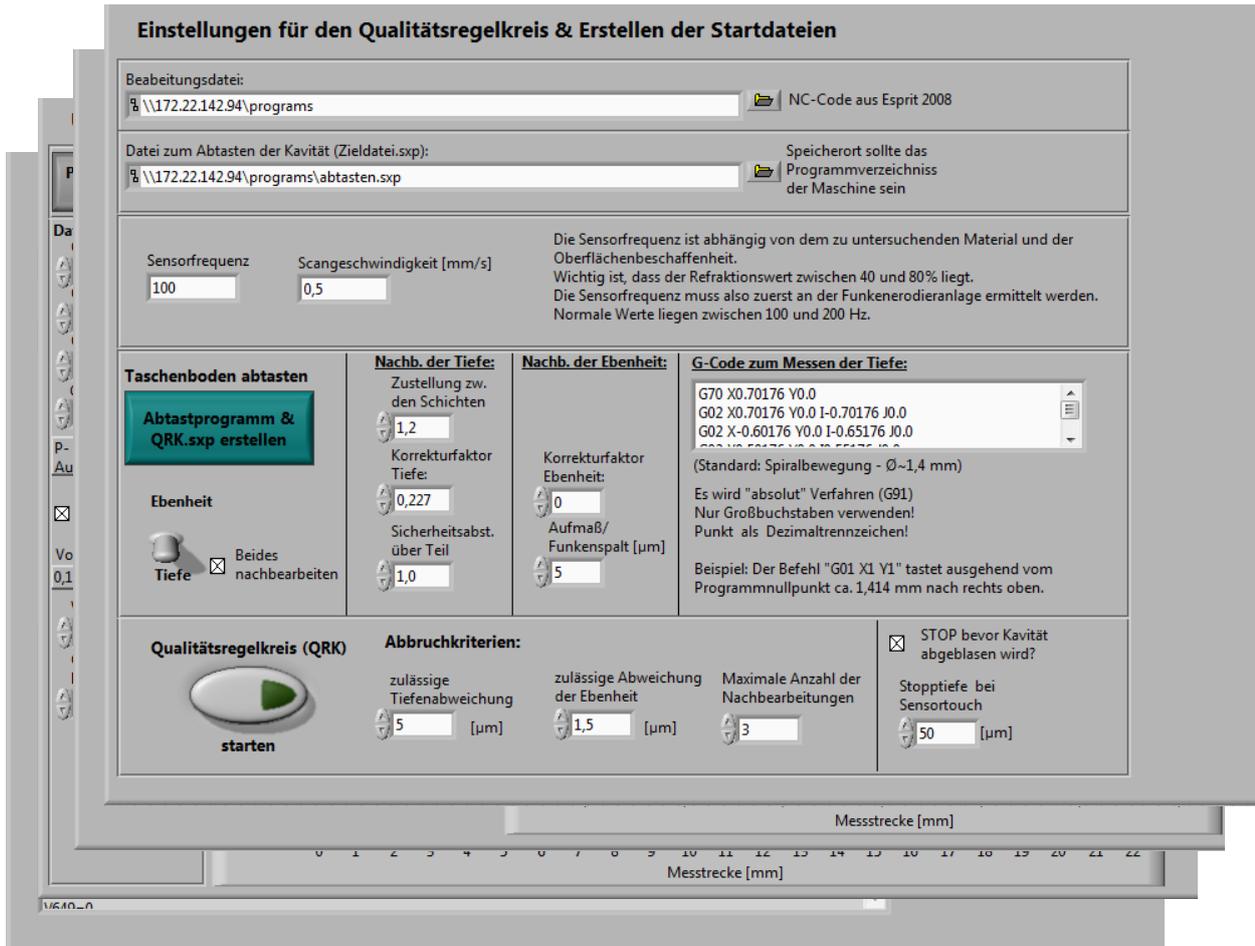


Abbildung 6.13: Modul 1 – Regelungseinstellungen

Wie in Abbildung 6.13 dargestellt, können mit der Benutzeroberfläche von Modul 1 die folgenden Grundeinstellungen vorgenommen werden:

Abtastfrequenz

Um valide Messwerte zu erhalten muss die Abtastfrequenz (f_a) auf die abzutastende Oberflächenbeschaffenheit bzw. an deren Reflexionseigenschaft angepasst werden. Eine passende Abtastfrequenz führt zu einem Rückreflexionsgrad von $\rho = 40 - 90 \%$. Liegt der Rückreflexionsgrad darunter oder darüber, so kann nicht gewährleistet werden, dass im Spektrometer des Messsystems ein definiertes Maximum bzw. eine definierte Tiefe detektiert werden kann. Die Abtastfrequenz muss also auf die jeweilige Oberflächenbeschaffenheit angepasst sein. Die hier gewählten Eingaben gelten für beide Messvarianten – Tiefe und Oberflächenabweichung – gleichermaßen.

Abtastgeschwindigkeit

Die Abtastgeschwindigkeit gibt die Relativgeschwindigkeit des Messflecks auf der Werkstückoberfläche an. Insbesondere beim Abtasten der Kavität zum Erfassen der Oberflächenabweichung kann die Abtaststrecke, je nach Fläche der

Kavität, leicht mehrere Zentimeter betragen. Bei einer geringen Abtastgeschwindigkeit dauert der Abtastvorgang vergleichsweise lange. Zudem entsteht dadurch eine Anzahl an Messpunkten, die bei einer sehr kleinen Abtastgeschwindigkeit extrem hoch werden kann. Dies führt zu einer vergleichsweise langen Auswertzeit. Außerdem ist nicht auszuschließen, dass bei einer sehr langsamen Abtastgeschwindigkeit Stick-Slip-Effekte in den Maschinenachsen die Messung negativ beeinflussen. Eine zu hohe Abtastgeschwindigkeit kann wiederum zu einem überhöhten Signalrauschen führen, da es an den Maschinenachsen zum Achsrauschen kommen kann.

Tiefe-/Oberflächenabweichungen

In Modul 1 kann außerdem festgelegt werden, ob eine Bearbeitung auf Solltiefe und/oder eine Weiterbearbeitung von fehlerhaften Oberflächenausprägungen durchgeführt werden soll.

NC-Code zur Tiefenmessung

Im Normalfall wird für die Messung der Tiefe ein linienförmiger Scan durchgeführt, der durch den Referenzpunkt und den Anfangspunkt bzw. Endpunkt der Bearbeitung geht (siehe Kapitel 6.3.1). Diese Vorgabe kann hier manuell verändert werden, indem ein NC-Programm hinterlegt und ausgewählt wird, das die Bahn für den Scan beinhaltet.

Korrekturfaktor (für der Weiterbearbeitung der Tiefe bzw. Oberfläche):

Über die Änderung des Kompensationsfaktors kann die Verschleißkompensation der Werkzeugelektrode für die Weiterbearbeitung neu eingestellt werden. Insbesondere für die Korrektur der Ebenheit kann eine Änderung des Korrekturfaktors sinnvoll sein, da hier nur sehr wenig Material pro Bearbeitungsgang abgetragen wird und deswegen der Werkzeugelektrodenverschleiß entsprechend kleiner ist. Wie in Kapitel 6.3.2 dargestellt, ist vorzugsweise mit einem Kompensationsfaktor von 0 (keine Verschleißkompensation) zu arbeiten, da der tatsächliche Verschleiß nicht vorhergesagt werden kann. Wird diese Funktion nicht benutzt, wird für jeden folgenden Bearbeitungsschritt ein aktualisierter Korrekturwert aus der jeweils vorhergehenden Bearbeitung extrahiert und dieser automatisch in den neu generierten NC-Code geschrieben.

Aufmaß/Funkenspalt

Um das Startniveau für einen Weiterbearbeitungsschritt festzulegen, wird die Größe des Funkenspalts benötigt. Dieser Wert gibt das Aufmaß über dem höchsten gemessenen Punkt der Oberfläche an, an dem die Weiterbearbeitung beginnen soll. Dadurch wird vermieden, dass die Werkzeugelektrode nicht schon von Beginn an zu tief zugestellt wird.

Abbruchkriterien

Durch die Abbruchkriterien werden die zulässige Abweichung von der Solltiefe, die maximal zulässige Größe der lokalen Oberflächenfehler und die maximale Anzahl an Bearbeitungsschritten definiert. Die maximale Anzahl an Weiterbearbeitungen ist dabei ein globales Abbruchkriterium, das für die Weiter- und Endbearbeitung der Tiefe und der Oberfläche gilt. Soll sowohl die Tiefe als auch die Ebenheit automatisch korrigiert werden, so bezieht sich dieser Wert auf die Gesamtzahl aller Weiterbearbeitungsgänge.

6.4.2 Modul 2: Datenauswertung Tiefe

Um die gefertigte Tiefe einer Kavität zu bestimmen, wird eine Auswertestrategie angewandt, die auf der Häufigkeitsverteilung der gemessenen Tiefenwerte basiert. In einem ersten Schritt werden die Daten der Tiefenmessung beschnitten, indem durch Kantenabschattung fehlerhafte Bereiche entsprechend der Solltiefe und dem Zusammenhang in Abbildung 6.9 ausgeblendet werden. Anschließend wird von jedem beschnittenen Profil die Häufigkeitsverteilung der Daten berechnet und im Anschluss die beiden häufigsten Tiefenwerte des Profils automatisch ermittelt. Für diese Spitzenwernerkennung wird die Angabe eines Schwellwertes benötigt, ab dem ein Maximum der Häufigkeit auch wirklich als solches interpretiert werden soll. Diese Maxima sind jeweils die am häufigsten auftretenden Werte des Startniveaus der Bearbeitung und der Oberfläche des Bodens der Kavität. Zur Ermittlung der Tiefe werden immer die beiden lokalen Maxima der kleinsten und der größten Tiefenwerte herangezogen. Dadurch kann auch bei Kavitäten mit Inselstrukturen, deren Höhe nicht dem Startniveau der Bearbeitung entspricht, die tatsächliche Tiefe in hinreichender Genauigkeit ermittelt werden.

Neben der Eingabemöglichkeit für den Schwellwert der Häufigkeitserkennung werden auf der Benutzeroberfläche die durchschnittliche Tiefe, die Häufigkeit der Tiefenwerte und die Profillinie der Messdaten des jeweils aktuellen Bearbeitungsschritts dargestellt.

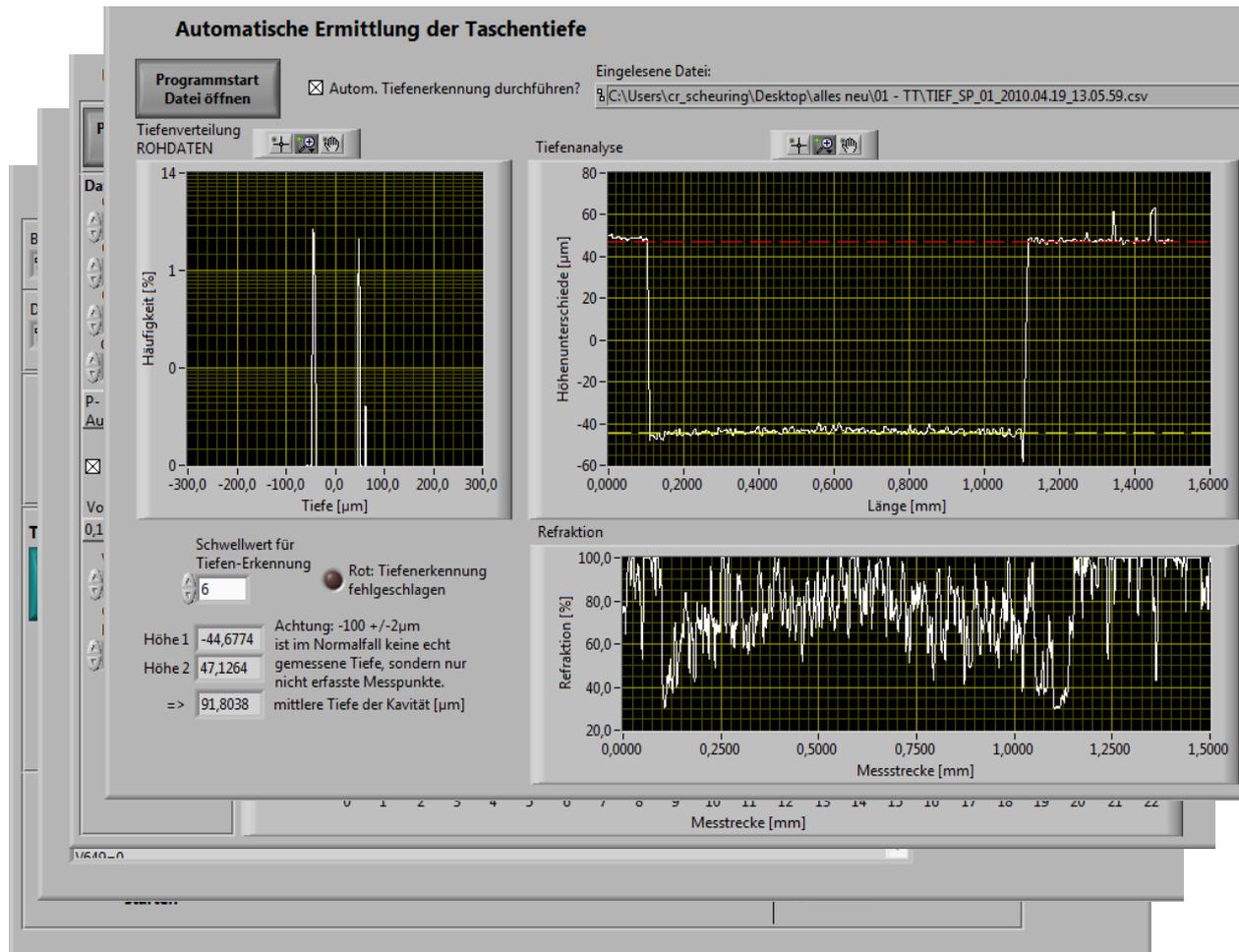


Abbildung 6.14: Modul 3 – Datenauswertung Tiefe

6.4.3 Modul 3: Datenauswertung Oberfläche

In Modul 3 (Abbildung 6.15) werden die Einstellungen für die Auswertung der bei einer Messung ermittelten Rohdaten des Sensors festgelegt. Ziel ist es, fehlerhafte Daten des Sensors und fehlerbehaftete Messstreckenabschnitte auszublenden. Zudem werden die Sensorbahn und der dazugehörige Oberflächenmessschrieb während des Prozesses visualisiert.

Daten trimmen

Konnte eine Stelle auf der Werkstückoberfläche nicht korrekt erfasst werden, liefert der Sensor trotzdem einen Tiefenwert zurück. Dieser Wert kann so stark von der tatsächlichen Tiefe abweichen, dass er die Messung der Oberflächenabweichung unbrauchbar macht. Im Modul 3 werden daher Grenzwerte zum Trimmen der Daten bei der Oberflächenmessung eingegeben, die einen Bereich um den Mittelwert aller Messdaten beschreiben, in dem sich die zulässigen Messwerte befinden. So können einzelne fehlerhafte und damit stark abweichende Daten ausgeblendet werden.

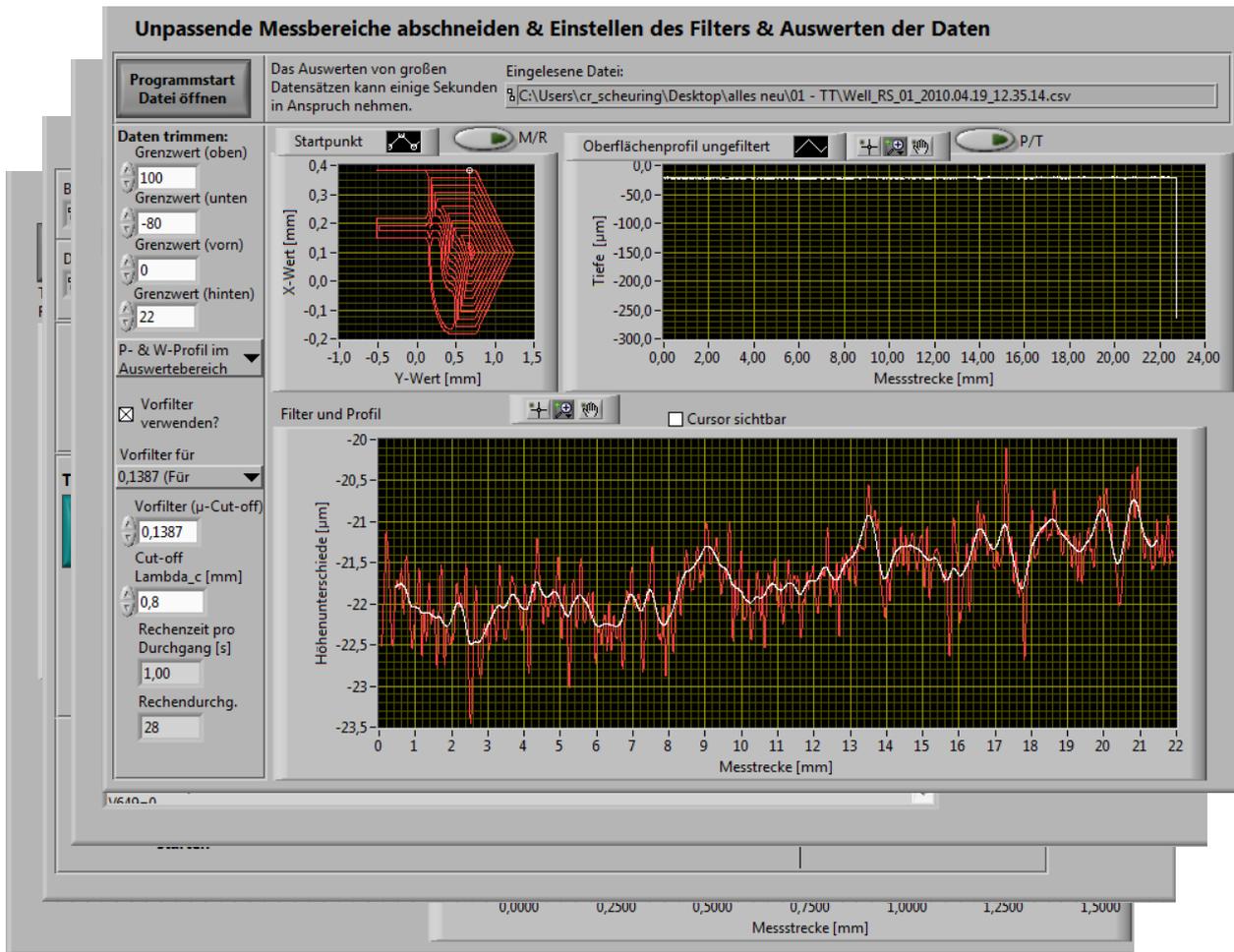


Abbildung 6.15: Modul 2 – Datenauswertung Oberfläche

Cut-Off-Werte

Über die beiden Cut-Off-Werte nach Gauß im Modul 3 wird der Grad der Profilglättung definiert. Je nach Größe des Filters wird eine Trennung des Rauheits- vom Welligkeitsprofil vorgenommen. Die Größe des Gauß-Filters muss an die Länge der zu erfassenden Messstrecke und die zu erwartende Oberflächenrauheit angepasst werden. Die Welligkeit der Oberfläche und deren Steigung stellt nach der Auswertung ein Maß für die fehlerhafte Oberflächenausprägung dar.

6.4.4 Modul 4: Weiterbearbeitungsprogramme

Das Modul 4 (Abbildung 6.16) dient der automatisierten Erstellung von Weiterbearbeitungsprogrammen. In Abhängigkeit von den Vorgaben aus Modul 1 sowie den Ergebnissen aus Modul 2 und Modul 3 wird hier ein Weiterbearbeitungsprogramm entsprechend der in den Kapiteln 6.3.1 und 6.3.2 beschriebenen Vorgehensweise erstellt.

Auf der Benutzeroberfläche erfolgt während des Prozesses zudem die Ausgabe des NC-Programms sowie die Möglichkeit der manuellen Bearbeitung des automatisch erstellten NC-Programms.

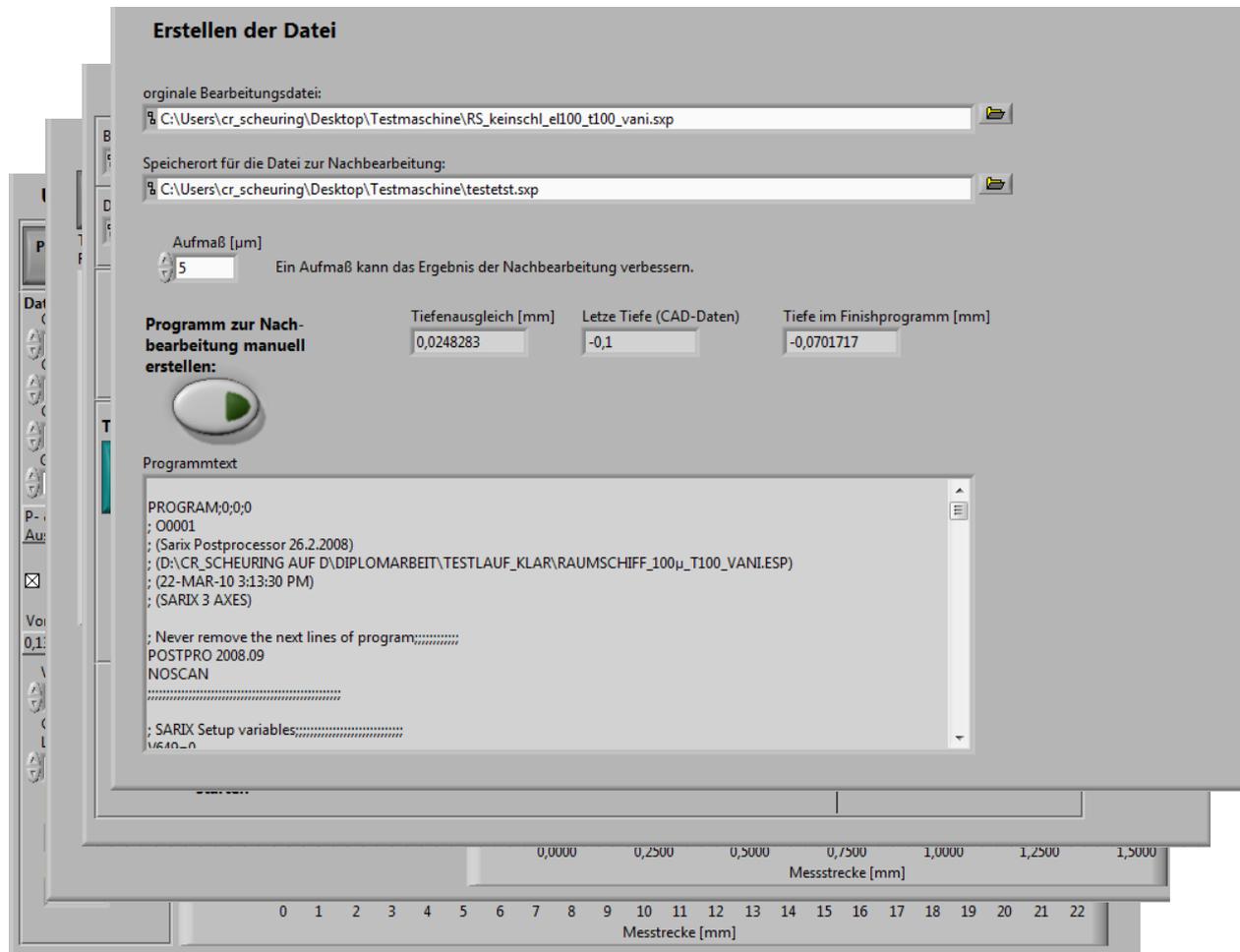


Abbildung 6.16: Modul 4 - Erstellung der Weiter- und Endbearbeitungsprogramme

6.4.5 Ablauf der Abtragsregelung

Durch die Informationen aus den Modulen der Benutzeroberfläche und einem NC-Programm für die Grundbearbeitung der Kavität sind alle Daten für die Abtragsregelung definiert.

Basierend auf der Grundbearbeitung werden in einem zweistufigen Prozess die Tiefe der Kavität und die Fehler in der Oberflächenausprägung erfasst und gegebenenfalls weiter- bzw. endbearbeitet sowie parallel die Form der Kavität überwacht. Beide Mess- und Weiterbearbeitungsroutinen laufen so lange in einem iterativen Prozess ab, bis das jeweilige in der Benutzeroberfläche vorgegebene Abbruchkriterium erreicht ist. In Abbildung 6.17 ist der prinzipielle Ablauf der Abtragsregelung und der Informationsfluss dargestellt.

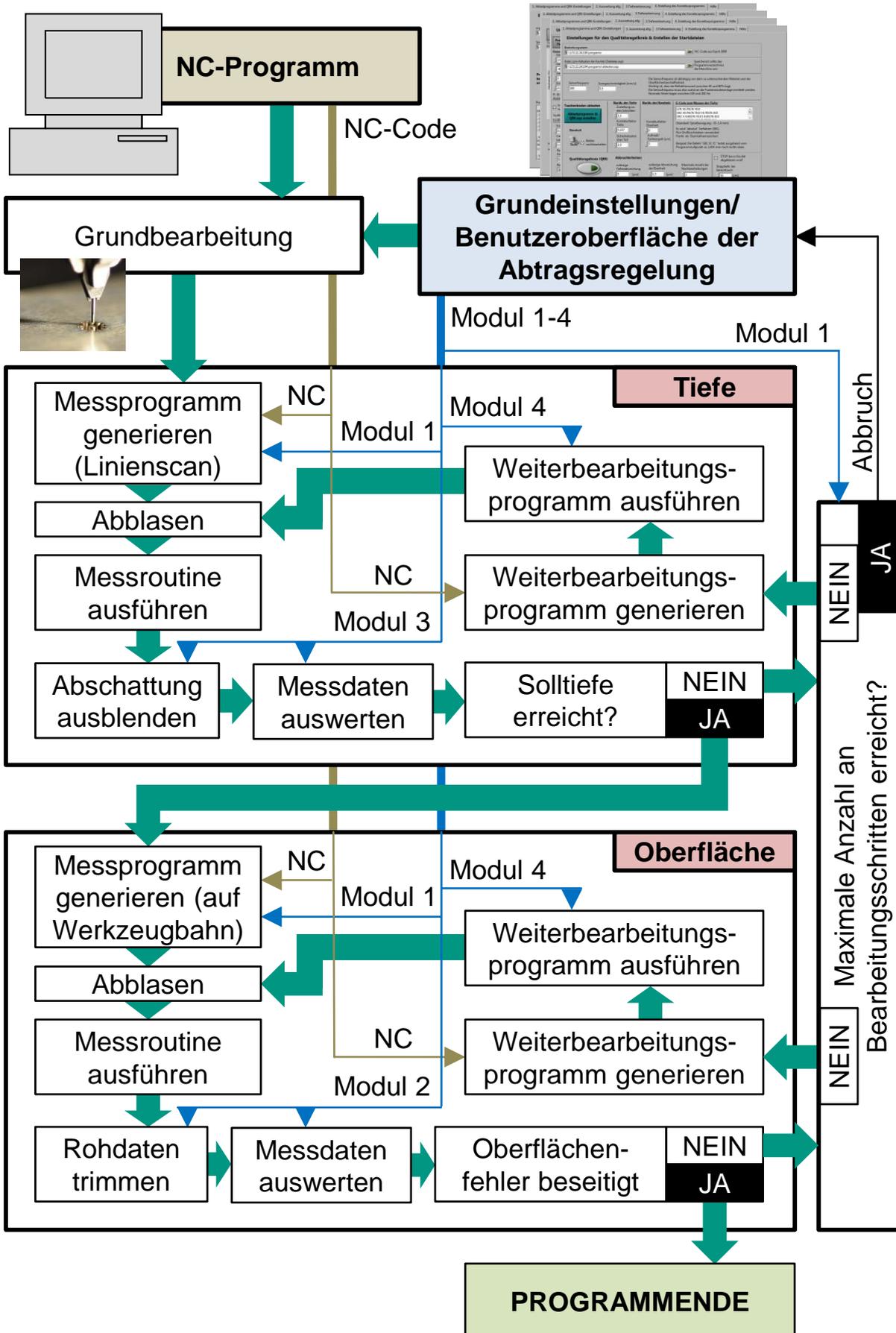


Abbildung 6.17: Ablaufdiagramm der Abtragsregelung

6.5 Validierung der Abtragsregelung

Die Funktionalität der NC-Code-basierten Abtragsregelung wurde durch deren Anwendung bei der Fertigung von Testkavitäten nachgewiesen. Dabei wurde belegt, dass sich die Qualität von gefertigten Kavitäten nicht nur nachträglich verbessern lässt, sondern auch im selben Prozess eine Qualitätssicherung dargestellt werden kann.

6.5.1 Validierung an einer 2,5D-Testgeometrie

Um die prinzipielle Funktionsweise der Abtragsregelung zu testen, wurde eine Bearbeitung der Testkavität 2 (Abbildung 6.6) mit den Bearbeitungsparametern aus Tabelle 6.1 bis zu einer Solltiefe von $T_{\text{soll}} = 100 \mu\text{m}$ durchgeführt. In Abweichung zu den vorgegebenen Parametern wurde ein zu kleiner Korrekturfaktor für die Grundbearbeitung verwendet und die Verschleißkontrolle deaktiviert, was ein Worst-Case-Szenario für die Eingangsgröße der Verschleißkompensation darstellt, da so keine Tiefenkontrolle während des Fertigungsprozesses erfolgt. Mit Hilfe der entwickelten Auswerte- und Korrektursoftware und den daraus generierten Weiterbearbeitungsprogrammen wurde die Kavität iterativ hergestellt. Hierzu wurden die in Kapitel 6.3.1 und 6.3.2 beschriebenen Strategien mit den in Tabelle 6.2 dargestellten Parametern verwendet. Um die Auswirkung der einzelnen Weiterbearbeitungsschritte zu dokumentieren, wurde zwischen jedem Bearbeitungsschritt die Prozedur unterbrochen und ein Tiefenprofil bzw. ein Profil der Oberfläche des Bodens der Kavität erstellt. So kann sowohl der Verlauf der Tiefe als auch der Verlauf der Oberflächenausprägung nach jedem Bearbeitungsschritt nachvollzogen werden.

Abtastfrequenz	100 Hz
Scangeschwindigkeit	0,5 mm/s
Zustellung zwischen den Schichten	1,2 μm
Aufmaß/Funkenspalt	5 μm
Zulässige Tiefenabweichung	2 μm
Zulässige Abweichung der Ebenheit	1 μm
Maximale Anzahl der Bearbeitungen	8
Stopptiefe bei Sensortouch	50 μm
Gaußfilter λ	0,8 mm

Tabelle 6.2: Parameter für Mess- und Auswerteprozess

In den Diagrammen in Abbildung 6.18 sind die Ergebnisse der einzelnen Bearbeitungsschritte bei der Bearbeitung auf Solltiefe dargestellt. Aufgrund der besseren Lesbarkeit sind in dieser Darstellung die durch Kantenabschattung entstandenen Messfehler geglättet. Dem ersten Messschrieb ist zu entnehmen, dass nach der Grundbearbeitung eine maximale Tiefe von $T_{\text{ist}} = 72,9 \mu\text{m}$ erreicht wurde. Diese extreme Abweichung von der Solltiefe von $T_{\text{soll}} = 100 \mu\text{m}$ ist auf die zu Beginn fehlende Verschleißkompensation zurückzuführen. Ein solcher Wert wäre für eine standardmäßige Bearbeitung wesentlich zu hoch. Durch das iterative Anpassen des Kompensationsfaktors wurde die Solltiefe in insgesamt vier Weiter- und einem Endbearbeitungsschritt angenähert. Nach der fünften Iterationsschleife wurde eine maximale Tiefe von $T_{\text{ist}} = 98,2 \mu\text{m}$ erreicht, bei der das Abbruchkriterium von einer maximal zulässigen Tiefenabweichung von $\Delta T = < 2 \mu\text{m}$ erfüllt wurde. Auffällig ist hierbei die Aufwölbung der Oberfläche in der Mitte der Kavität, die während den Bearbeitungsschritten zwar geglättet, aber nicht beseitigt wurde.

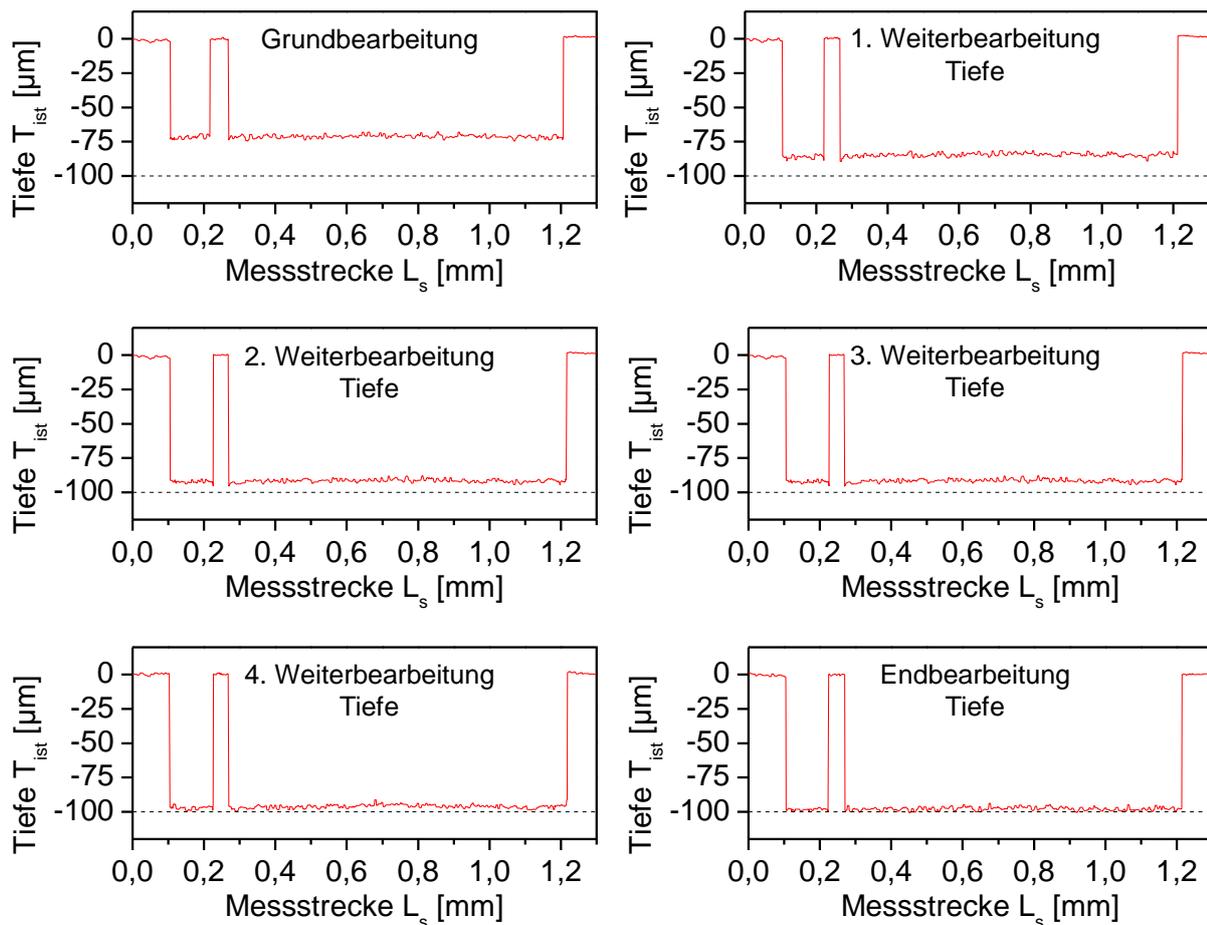


Abbildung 6.18: Tiefenprofile nach den Weiter- und Endbearbeitungsschritten

Im Anschluss an die Endbearbeitung der Tiefe wurde automatisiert die Beseitigung von Oberflächenfehlern eingeleitet. Hierzu wurde ein Messprogramm basierend auf der Werkzeugelektrodenbahn generiert – wie in Kapitel 6.3.2 beschrieben – und dieses nach jedem Weiterbearbeitungsprozess ausgeführt. In Abbildung 6.19 sind die Oberflächenprofile entlang der Werkzeugelektrodenbahn nach einem Weiter- und einem Endbearbeitungsschritt der Ebenheit dargestellt.

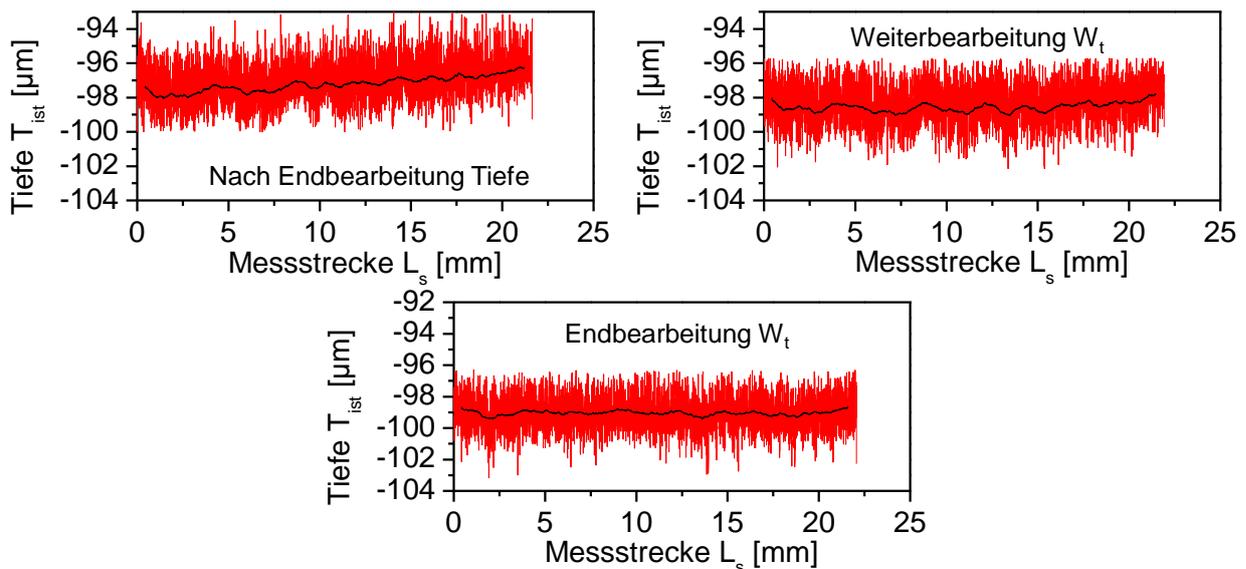


Abbildung 6.19: Oberflächenprofile entlang der Werkzeugelektrodenbahn

Dem ersten Diagramm ist zu entnehmen, dass das Phänomen der aufgewölbten Oberfläche aus der Tiefenendbearbeitung auch hier messtechnisch erfasst und damit nachgewiesen wurde. Da hier der Profilschrieb entlang der Werkzeugbahn erfolgt, äußert sich dies bei einer Bearbeitung von „außen nach innen“ mit einem Anstieg des Profils. Durch die unterschiedlichen Geometriefeatures der Testgeometrie bildete sich ebenfalls ein leichtes Wellenprofil ($W_t = 1,89 \mu\text{m}$) der Oberfläche aus. Für die Weiterbearbeitung der Kavität wurde wie in Kapitel 6.3.2 beschrieben keine Verschleißkompensation verwendet, da bei diesem Prozessschritt das abzutragende Volumen über die Erosionsstrecke stark variieren kann.

Nach dem ersten Weiterbearbeitungsschritt wurde die Aufwölbung der Oberfläche deutlich geglättet. Dabei wies die Oberfläche ein Welligkeitsprofil von $W_t = 1,48 \mu\text{m}$ auf. Nach diesem Prozessschritt wurde der Profilanstieg deutlich geglättet, wogegen die Welligkeit nicht wesentlich verbessert wurde.

Das Welligkeitsprofil wurde im folgenden Endbearbeitungsschritt entsprechend den Abbruchkriterien aus der Abtragsregelung geglättet. Hier konnte die Welligkeit bis auf einen Wert von $W_t = 0,96 \mu\text{m}$ reduziert werden. Mit diesem Ergebnis wurden alle Abbruchkriterien erfüllt und der Prozess der Abtragsregelung beendet. Die Abbildung 6.20 zeigt die gefertigte Testkavität. An deren Oberfläche sind keinerlei Fertigungsfehler oder Stufenbildung sichtbar.

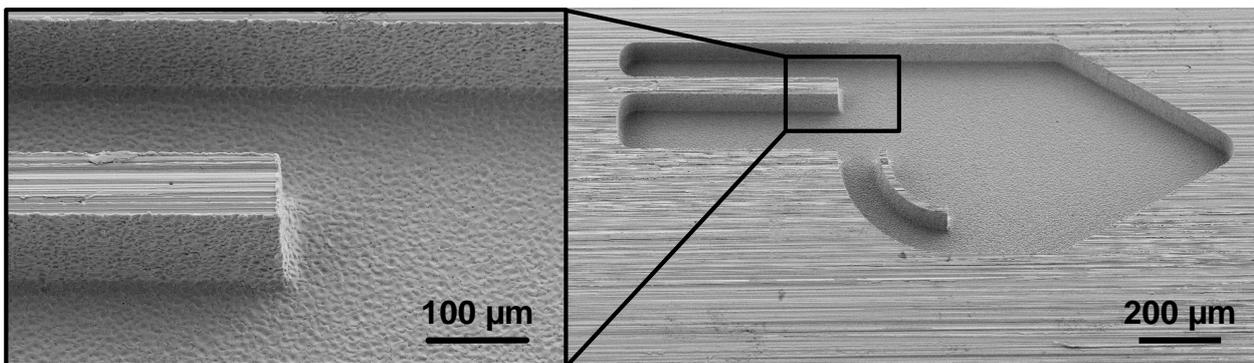


Abbildung 6.20: Gefertigte Testgeometrie 2 ($T_{ist} = 98,2 \mu\text{m}$)

6.5.2 Validierung an einer sphärischen Geometrie

Da beim Mikrobahnerosionsprozess das Material in einzelnen Ebenen abgetragen wird, kann die entwickelte Abtragsregelung auch für die Fertigung von 2,5D-Geometrien mit veränderlichen Wandwinkeln verwendet werden. Je nach Kavität muss dann die herzustellende Geometrie in mehrere übereinanderliegende Schichten zerlegt werden. Jede dieser Schichten stellt dann eine separate Einheit dar, für die eine eigene Abtragsregelung stattfindet. Dabei ist die Größe dieser einzelnen gefertigten Segmente ein maßgebliches Kriterium für die Güte der Oberfläche der 2,5D-Kavität, da bedingt durch den Werkzeugelektrodenverschleiß auch die Geometrie von schrägen Wänden negativ beeinflusst wird.

In diesem Validierungsbeispiel wurde eine halbseitige sphärische Geometrie mit einem Radius $r = 2 \text{ mm}$ in ein Bauteil erodiert. Dabei wurde die gesamte Tiefe von $T = 1 \text{ mm}$ in drei Segmenten mit den Gesamttiefen von $T_1 = 333 \mu\text{m}$, $T_2 = 666 \mu\text{m}$ und $T_3 = 1000 \mu\text{m}$ hergestellt, wie in Abbildung 6.21 dargestellt. Für die Untersuchungen wurde eine Werkzeugelektrode aus WC-6Co mit einem Durchmesser von $300 \mu\text{m}$ und die in Tabelle 6.2 aufgeführten Erosionsparameter verwendet. Die Eingangswerte der Abtragsregelung sind dem Kapitel 6.5.1 zu entnehmen.

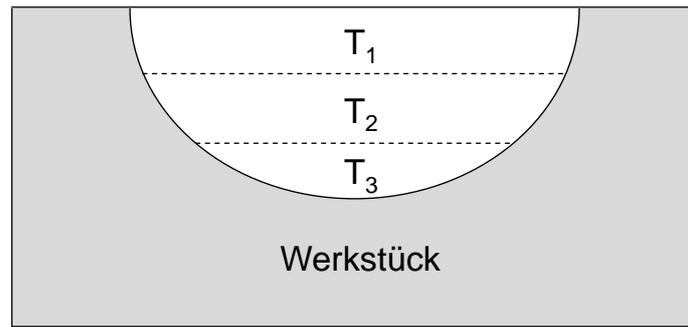


Abbildung 6.21: Sphärische Testgeometrie eingeteilt in drei Schichten

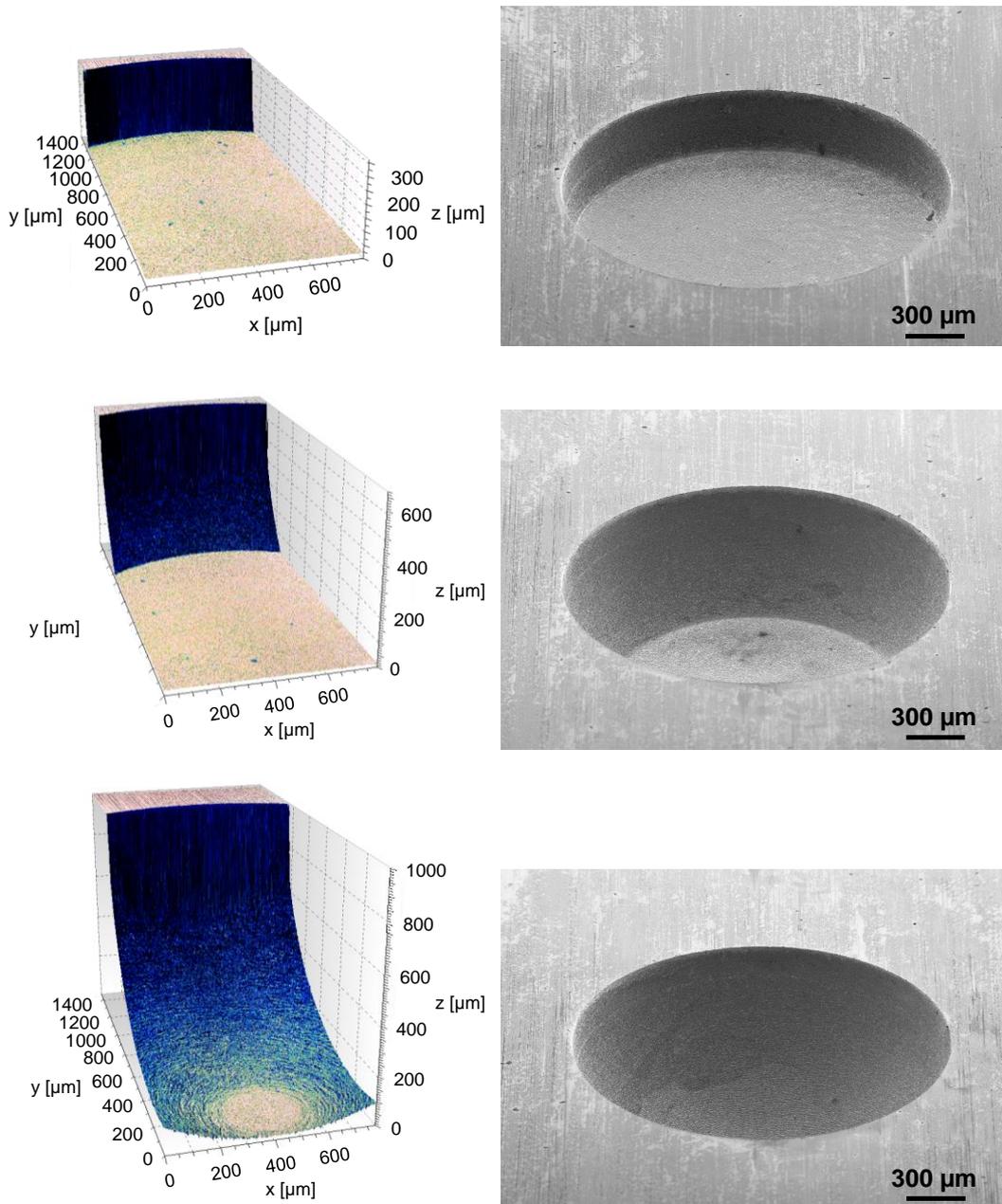


Abbildung 6.22: 3D-Messung der gefertigten Geometrie und REM-Aufnahmen in den Tiefen T_1 , T_2 und T_3

In einem ersten Versuch wurde die Tiefe T_1 erodiert und dabei mit einem Erfahrungswert für die Verschleißkompensation gearbeitet. Nach der Fertigung von T_1 wurde der durch Antasten ermittelte korrigierte Kompensationsfaktor für die Herstellung von T_2 verwendet. Dieselbe Vorgehensweise wurde dann ebenfalls für die Herstellung von T_3 angewendet. Zu Anschauungszwecken wurde jedes Tiefenniveau der Testkavität einzeln gefertigt und anschließend mittels des in Kapitel 3.3.2 vorgestellten konfokalen Sensors aufgenommen. Die Ergebnisse der optischen 3D-Messung (Ausschnitte der Geometrie) und entsprechende REM-Aufnahmen sind in Abbildung 6.22 dargestellt.

Die Messergebnisse der Validierung sind in Tabelle 6.3 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bei der Bearbeitung des ersten Tiefensegments deutlich mehr Bearbeitungsschritte notwendig waren, als es bei den anderen beiden der Fall war. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bearbeitung von T_2 auf einem zur Bearbeitungsebene ideal planen Werkstück beginnt, da diese durch die Fertigung von T_1 vorbearbeitet wurde. Zudem wurde für T_2 ein angepasster Kompensationsfaktor benutzt, der direkt aus dem vorgelagerten Prozess stammt. Dieser bildet die Verschleißbedingungen deutlich besser ab. So war für die Endbearbeitung der Tiefe von T_2 und T_3 jeweils nur ein Bearbeitungsschritt notwendig. Eine Weiter- und Endbearbeitung der Oberfläche fand bei T_3 nicht statt, da das tiefste Niveau der Geometrie eine Fläche aufweist, die der Stirnseite der Werkzeugelektrode entspricht.

Tiefensegment	$T_1 = 333 \mu\text{m}$	$T_2 = 666 \mu\text{m}$	$T_3 = 1000 \mu\text{m}$
Grundbearbeitung	325,1 μm	662,5 μm	997,1 μm
Weiter-/Endbearbeitung Tiefe	327,6 μm	664,9 μm	999,3 μm
Weiter-/Endbearbeitung Tiefe	330,2 μm	-	-
Endbearbeitung Tiefe	331,8 μm	-	-
W_t aus Endbearbeitung Tiefe	1,47 μm	1,12 μm	-
Weiter-/Endbearbeitung W_t	1,29 μm	0,88 μm	-
Endbearbeitung W_t	0,78 μm	-	-

Tabelle 6.3: Messergebnisse aus der Abtragsregelung bei der Fertigung der Tiefensegmente T_1 , T_2 und T_3 der sphärischen Testgeometrie

Die Messergebnisse beider Validierungsversuche zeigen, dass durch die entwickelte Abtragsregelung nicht nur eine gefertigte Geometrie in hoher Präzision abgebildet werden kann, sondern dass zudem die Herstellung durch die iterativen Messvorgänge prozesssicher erfolgt.

6.6 Fazit

Das gängigste Konzept der Verschleißkompensation bei der Mikrobahnerosion nutzt das Prinzip der Uniform-Wear Methode im Sinne einer Offline-Kompensation. Darüber hinaus gibt es Forschungsansätze, den Werkzeugelektrodenverschleiß in Echt-Zeit basierend von dem aktuellen Prozessverlauf bzw. den Prozessgrößen zu kompensieren. Da die exakte Vorhersage der Prozessbedingungen nicht möglich ist, erreichen derzeitige Regelungskonzepte eine Genauigkeit von 5 μm .

In diesem Kapitel wird das Konzept einer prozessübergreifenden Abtragregelung vorgestellt, das die Detektion einer verschleißbedingten Geometrieabweichung direkt an der Erodiermaschine vorsieht. Basierend auf den Messergebnissen wird dann automatisiert ein Weiter- und Endbearbeitungsvorgang der Tiefe und der Ebenheit bei derselben Aufspannung des Werkstücks durchzuführen.

Anhand von Validierungsversuchen wurde die Leistungsfähigkeit der Abtragregelung unter Beweis gestellt. Dabei wurde bei iterativen Bearbeitungsprozessen von jeweils einer 2,5D- und einer 3D-Kavität eine Genauigkeit der Tiefe von unter 2 μm erzielt. Die Ebenheit der Oberfläche der Kavitäten lag nach der Endbearbeitung im Bereich der erzielbaren Oberflächenrauheit des Verfahrens. Damit kann durch dieses Konzept die Genauigkeit beim Mikrobahnerodieren deutlich gesteigert und gleichzeitig die Qualität der gefertigten Kavität sichergestellt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Da es sich bei der Herstellung von mechanischen Mikrobauteilen meist um eine Massenproduktion handelt, bei der überwiegend urformende Prozesse zum Einsatz kommen, ist die Formeinsatzherstellung von zentraler Bedeutung. Bei der Fertigung dieser Kavitäten durch strukturierende Verfahren hat sich die Mikrobahnerosion etabliert, da mittels dieser kleinste Strukturen flexibel in Formeinsätze aus verschleißfesten Werkstoffen eingebracht werden können.

Bei der Herstellung von Formeinsätzen wird meist lediglich ein Gutteil benötigt. Idealerweise ist gefordert, ein Gutteil ohne zeitintensive arbeitsvorbereitende Maßnahmen und mehrere Fertigungsanläufe innerhalb des geforderten Toleranzbereichs zu fertigen. Die Haupteinflussfaktoren auf das Prozessergebnis bei der Bearbeitung von 2,5D-Kavitäten sind die Erosionsparameter, die kinematischen Größen sowie die Kompensation des Werkzeugelektrodenverschleißes. Ziel ist es, diese drei Einflussfaktoren möglichst effizient zu kennen bzw. zu beherrschen und in einer automatisierten Prozessabfolge zu verknüpfen.

Gemäß dieser Zielstellung wurde in einem ersten Schritt eine automatisierte Parametersuche für die Feinschlichtbearbeitung bei der Herstellung eines Formeinsatzes entwickelt, die basierend auf der Oberflächenrauheit (R_a) von Testkavitäten einen optimierten Parametersatz zurückliefert. Ausgehend von der Auswahl der zu betrachtenden Erosionsparameter (u_e , i_e , t_i , f_p) mit einem Ishikawa-Diagramm, wurden entsprechende DOE-Methoden verglichen und mittels einer Nutzwertanalyse hinsichtlich definierter Zielkriterien bewertet. Der so ausgewählte zentral zusammengesetzte Versuchsplan dient in der entwickelten Parametersuche dazu, die Erosionsparameter entsprechend ihrer Faktorstufenkombination aufzuschlüsseln und auf zu fertigende Testkavitäten anzuwenden. Das Messen der Oberflächenrauheit dieser Kavitäten erfolgt direkt an der Erodiermaschine mit einem integrierten nach dem konfokalen Prinzip arbeitenden Sensor. Die Messdaten werden im Anschluss durch eine nichtlineare Regression angenähert. Dabei werden in einem ersten Schritt durch die Eingabe der Faktorstufenkombinationen und der zugehörigen Oberflächenwerte die Koeffizienten der linearen und quadratischen Effekte des Systems berechnet, die darauffolgend durch eine Extremwertanalyse zur Berechnung der optimalen Erosionsparameter dienen. Der gesamte Prozess von der Fertigung der Testkavitäten bis hin zur Rücklieferung der Erosionsparameter

wurde mittels der optischen Programmierumgebung LabView umgesetzt und stellt damit einen automatisierten Prozess dar. Bei Validierungsversuchen anhand der Werkstoffe 30CrMo6 und WC-12Co wurde gezeigt, dass die Erosionsparameter sehr nahe an denen lagen, die basierend auf Erfahrungswissen für diese Werkstoffe geeignet sind. Beim Vergleich der gemittelten Oberflächengüte, erzeugt durch die beiden Parametersätze, wurde eine maximal gemessene Abweichung von $\Delta Ra = 0,003 \mu m$ erzielt. Der Mehrwert dieser automatisierten Parametersuche ist beim Übertrag auf neue Werkstoffe zu sehen, für die noch kein Erfahrungswissen vorliegt und die Prozessparameter mit der konventionellen Vorgehensweise aufwändig erarbeitet werden müssten.

Um den Einfluss der kinematischen Größe in Form von der Zustellung auf die Oberflächenrauheit von 2,5D-Kavitäten mit variablen Wandwinkelschrägen zu untersuchen, wurden Versuche mit variierenden Wandwinkeln zwischen $\alpha = 0^\circ$ und 90° durchgeführt. Für alle drei Bearbeitungsmodi Schruppen, Schlichten und Feinschlichten konnte anhand der Oberflächengüte nachgewiesen werden, dass sich kleine Zustellwerte für kleine Wandwinkel und größere Zustellungen für die Fertigung von großen Wandwinkeln besser eignen. Diese generelle Aussage wird durch das Verschleißverhalten der Werkzeugelektrodenkante bestätigt. Dabei stellt sich bei einem Wandwinkel von $\alpha = 45^\circ$ ein Wendepunkt in der Kantenverrundung ein. Für kleine Wandwinkel steigt hier die Verrundung mit größerer Zustellung an. Für Winkel größer $\alpha = 45^\circ$ kehrt sich dieses Phänomen entsprechend um. Hier ist also ein Wechsel von einem vermehrt stirnseitigen zu einem lateralen Funkenüberschlag und umgekehrt zu verzeichnen. Die Ergebnisse zur Geometrieabweichung der Wandschrägen zeigen, dass die Größe der Zustellung bis zu einem gewissen Grenzwert keinen Einfluss auf die geometrische Genauigkeit hat. Basierend auf den experimentellen Untersuchungen wurde für jeden Bearbeitungsmodus eine Regressionsfunktion basierend auf den optimierten Zustellwerten je Wandwinkel extrahiert. Zur Validierung dieser Funktion wurden für die Schlichtbearbeitung optimierte Zustellwerte für die Fertigung einer offenen sphärischen Kavität berechnet und diese gefertigt. Die Ergebnisse der Oberflächenmessung haben gezeigt, dass durch die Verwendung der mit der Regressionsfunktion berechneten Werte die Resultate der Untersuchungen an den schrägen Wänden sehr gut abgebildet werden können. Zudem kann durch variable Zustellwerte eine durchweg bessere Oberflächengüte erzielt werden, als es bei der Verwendung von konstanten Zustellwerten der Fall gewesen ist. Daran anschließend wurden für den Bereich der untersuchten Zustellungen optimierte

Vorschubgeschwindigkeiten erarbeitet, um die Grundlage zu schaffen, einen Prozess hinsichtlich eines optimierten Fertigungsergebnisses und der Effizienz auslegen zu können.

Zur Kompensation der elektrodenverschleißbedingten Geometrieabweichung wurde eine prozessübergreifende Abtragsregelung entwickelt und implementiert. Diese sieht vor, eine Geometrieabweichung direkt an der Erodiermaschine durch einen in die Maschine integrierten konfokalen Sensor zu erfassen und im Anschluss automatisiert einen Weiter- und Endbearbeitungsvorgang bei derselben Aufspannung des Werkstücks durchzuführen. Die gesamte Routine erfolgt in einem zweistufigen Prozess, der zunächst die Soll- mit der gemessenen Isttiefe einer Kavität vergleicht und diese basierend auf der Differenz weiterbearbeitet. In einem zweiten Prozessschritt werden dann durch einen feineren Scan der Kontur lokale Geometrieabweichungen an der Oberfläche erfasst und diese ebenfalls durch ein automatisiert abgeleitetes Programm eliminiert. Somit kann mit dieser in LabView umgesetzten Abtragsregelung eine Kavität auf Sollmaß innerhalb eines definierten Toleranzfeldes prozesssicher gefertigt werden. Zur Validierung wurde neben einer sphärischen Kavität eine planare Teststruktur gefertigt, die nach dem fünften iterativen Bearbeitungszyklus eine Tiefe von $T_{\text{ist}} = 98,2 \mu\text{m}$ von der geforderten Tiefe $T_{\text{soll}} = 100 \mu\text{m}$ aufwies und eine Oberflächenabweichung, die im Bereich der Oberflächenrauheit ($W_t = 0,96 \mu\text{m}$) lag.

7.2 Ausblick

Mit dieser Arbeit wurde eine automatisierte Prozessabfolge zur Herstellung von Kavitäten mittels Bahnerosion erarbeitet. Während dieser Entwicklung haben sich neue Arbeitsfelder ergeben, die das Potential für mögliche Weiter- und Neuentwicklungen bieten.

Bei der entwickelten Parametersuche hat sich gezeigt, dass der Einfluss der Impulsfrequenz durch die zentral zusammengesetzten Versuchspläne gekoppelt mit einer nichtlinearen Regression nur bedingt abgebildet werden kann. Um den Erosionsprozess effizienter zu gestalten, muss die maximale Impulsfrequenz f_p bei optimierter Impulsdauer t_i ermittelt werden, bei der die Oberflächenrauheit gerade noch nicht negativ beeinflusst wird. Dies könnte durch einen nachgelagerten Optimierungsprozess erfolgen, bei dem die Fertigungszeit der Testkavitäten sowie deren tatsächlich gefertigte Tiefe berücksichtigt werden.

Im Rahmen der Arbeiten wurden die Auswirkungen der kinematischen Parameter auf die Oberflächenrauheit von Kavitäten mit schrägen Wänden untersucht. Trotz

deren Optimierung besteht eine erhebliche Diskrepanz zwischen den Ra-Werten, die an schrägen und ebenen Flächen erreicht werden können. Darauf aufbauend könnte in weiterführenden Arbeiten untersucht werden, welchen Einfluss angepasste Erosionsparameter auf die Ausprägung der Oberflächengüte an schrägen Wänden haben. Parallel dazu muss geprüft werden, ob die Zusammenhänge auf unterschiedliche Werkstückmaterialien übertragen werden können. Sollte dies nicht der Fall sein, kann die entwickelte Parametersuche auf die Berücksichtigung von verschiedenen Wandwinkelschrägen erweitert werden.

Zum automatischen Messen und Beseitigen von Geometrieabweichungen wurde eine prozessübergreifende Abtragsregelung entwickelt und implementiert. Diese erfolgt in einem zweistufigen Prozess, in dem zunächst die Kavität auf Solltiefe gebracht wird und anschließend Oberflächenfehler beseitigt werden. Vor allem der zweite Prozessschritt bietet eine Möglichkeit zur Verbesserung. Da die Oberflächenabweichungen nur lokal auftreten können, besteht das Potential, die entsprechende Weiterbearbeitung auch nur lokal stattfinden zu lassen. Dadurch könnte die Prozesszeit vor allem bei großflächigen Kavitäten oder der Oberflächenstrukturierung von großen Bauteilen erheblich gesenkt werden.

Diese Optimierung würde gleichzeitig die Voraussetzung bieten, die Senk- und Bahnerosion in einem Prozess miteinander zu verbinden. So könnten über geometrisch einfache Formelektroden große Materialvolumina abgetragen, die entstandenen Kavitäten eingemessen und mittels Mikrobahnerosion eine lokale Detailstrukturierung durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [Abb-07] Abbas, N.M.; Solomon, D.G.; Bahari, M.F.: A review on current trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, 2007
- [Alm-08] Almeida, F.A.; Sacramento, J.; Oliveira, F.J.; Silva, R.F.: Micro- and nano-crystalline CVD diamond coated tools in the turning of EDM graphite, *Surface and Coatings Technology*, Volume 203, Issues 3-4, 25 November 2008, Pages 271-276
- [Bay-94] Bayramoglu, M., Duffill, A.W.: Systematic investigation of the use of cylindrical tools for the production of 3D complex shapes on CNC EDM machines, *International Journal Machine Tools and Manufacture* 34 (3), 1994, p. 327–339
- [Bay-95] Bayramoglu, M., Duffill, A.W.: Manufacturing linear and circular contours using CNC EDM and frame type tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 35 (8), 1995, p. 1125–1136.
- [Beh-03] Behrens, A.; Ginzl, J.: Neuro-Fuzzy Process Control System for Sinking EDM, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 5, Issue 1, 2003, Pages 33-39
- [Ben-07] Benes, J.: Cutting Difficult-to-Machine Materials, 01/24/2007, <http://www.americanmachinist.com/304/Issue/Article/False/44740/IssueS>, Stand 3/2012
- [Ble-01] Bleys, P., Kruth, J.-P.: Machining complex shapes by numerically controlled EDM, *International Journal of Electrical Machining* Vol. 6, 2001, pp. 61–70
- [Ble-02] Bleys, P., Kruth, J.-P., Lauwers, B., Zryd, A., Delpretti, R., Tricarico, C.: Real-time Tool Wear Compensation in Milling EDM, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 51, Issue 1, 2002, Pages 157-160
- [Ble-04] Bleys, P., Kruth, J.-P., Lauwers, B.: Sensing and compensation of tool wear in milling EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 149, Issues 1–3, 10 June 2004, pp. 139-146

- [Bun-10] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Ideen. Innovation. Wachstum Hightech-Strategie 2020 für Deutschland, Bonn, Berlin, 2010, S. 3
- [Cer-04] Ceratizit HM-Sortenbeschreibung, Sorte TSF44, Datum 20.01.2004
- [Cer-10] Ceratizit HM-Sortenbeschreibung, Sorte TSM10, Datum 03.03.2010
- [Cha-02] Chang, Y.-F.: VSS controller design for gap control of EDM, Japan Society of Mechanical Engineering, International Journal, Series C 45 (3), 2002, pp. 712-721
- [Cha-04a] Chang, Y.-F.; Hong, R.-C.: Parametric curve machining of a CNC milling EDM, Inter-national Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 45, Issues 7-8, June 2004, pp. 941-948
- [Cha-04b] Chang, Y.-F., Chiu, Z.-H.: Electrode wear-compensation of electric discharge scanning process using a robust gap-control, Mechatronics, Volume 14, Issue 10, December 2004, pp. 1121-1139
- [Cuh-09] Cuhls, K., Ganz, W., Warnke, P.: FORESIGHT-PROZESS im Auftrag des BMBF, Etablierte Zukunftsfelder und ihre Zukunftsthemen, Karlsruhe/Stuttgart, 2009, S. 109
- [Dic-09] Dickerhof, M., Parusel, A., Bittner, K., Anson, S., Kautt, M., Gengenbach, U., Kaufmann, U., Voges, U.: GLOBE MST – Metastudie zum Stand der Mikrosystemtechnik auf der Basis inhaltsanalytischer Methoden, Mikrosystemtechnik Kongress 2009, 12. – 14. Oktober 2009 in Berlin, VDE VERLAG GMBH, 978-3-8007-3183-1, P. 12.2
- [DIN-98] Deutsche Norm DIN EN ISO 4288: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, April 1998
- [Din-04] Ding, S, Jiang, R.: Tool path generation for 4-axis contour EDM rough machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 44, Issue 14, November 2004, p. 1493-1502

- [Eld-04] Elders, J., Giasolli, R., Walsh, S.: International MEMS, Microsystems, Top Down Nano – Roadmap, Micro and Nanotechnology Commercialization Education Foundation (MANCEF), 2004, ISBN 0-9727333-0-2, p. 28
- [Emz-12] Elektronenmikroskopisches Zentrum der Friedrich-Schiller Universität in Jena, http://www.emz.uk-j.de/Feldemissions_REM.html, besucht: 06/2012
- [Evi-12] EVISA (European Virtual Institute for Speciation Analysis) <http://www.speciation.net/Database/Instruments/Carl-Zeiss-AG/EV-O-50-Series-;i663>, besucht: 06/2012
- [Fle-04] Fleischer, J., Schmidt, J., Knoll, M., Haupt, S., Müller, C., Förster, R., Gehringer, A.: Mikrobearbeitung durch Abtragen, Nichtkonventionelle Mikrofertigungsverfahren – ECM, EDM und LBM zur Herstellung von Mikrobauteilen, wt-online 94 (2004) H.11/12, S.589-595
- [Fuj-09] Fujiki, M., Ni, J., Shih, A. J.: Investigation of the effects of electrode orientation and fluid flow rate in near-dry EDM milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 49, Issue 10, August 2009, pp. 749-758
- [Fuj-10] Fujiki, M., Kim, G.-Y., Ni, J., Shih, A. J.: Gap control for near-dry EDM milling with lead angle, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 51, Issue 1, January 2011, pp. 77-83
- [Gil-05] Gillner, A., Dohrn, A.: Abschlussbericht Mikrotool, Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Aachen 2005, S. 8-23
- [Gub-08] Guber, A. E., Saile, V., Weibezahn, K.-F.: Mikrostrukturtechnik und Biomaterialien in: Medizintechnik – Life Science Engineering, 4. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2008, ISBN 978-3-540-74924-0, S. 753 – 768
- [Gui-97] Guitrau, E. B.: The EDM Handbook, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 1997
- [Hau-08] Haupt, S.: Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation, Forschungsbericht Band 147, wbk, Universität Karlsruhe (TH), 2008

-
- [Hau-09] Haupt, S.: Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation. 1. Auflage, Shaker Verlag, Karlsruhe 2009, ISBN 978-3-8322-7995-0
- [HED-11] HEDMA 111 – Sicherheitsdatenkarte (Fa. Letra AG)
Ausstellungsdatum: 31.03.2011
- [Heß-08] Heß, W.: Ein Blick in die Zukunft - acht Megatrends, die Wirtschaft und Gesellschaft verändern, Allianz Dresdner Economic Research, Working Paper 103, 20.05.2008, S. 22
- [Ho-03] Ho, K.H., Newman, S.T.: State of the art electrical discharge machining (EDM), International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 2003, p. 1287–1300
- [Hof-11] Hofmann, M.: Entwicklung und Validierung eines Bewertungsmodells für Projekte der statistischen Versuchsplanung. Dissertation, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, TU Berlin, 2011
- [Hös-11] Hösel, T., Müller, C., Reinecke, H.: Spark erosive structuring of electrically nonconductive zirconia with an assisting electrode, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 4, Issue 4, 2011, pp. 357-361
- [Jah-09] Jahan, M.P.; Wong, Y.S.; Rahman, M.: A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrode materials, Journal of Materials Processing Technology, Volume 2009, Issue 8, 21 April 2009, Pages 3956-3967
- [Jah-11] Jahan, M.P., Rahman, M., Wong, Y.S.: A review on the conventional and micro-electrodischarge machining of tungsten carbide Review Article, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 51, Issue 12, 2011, p. 837-858
- [Jam-01] Jameson, E.C.: Description and development of electrical discharge machining (EDM), Electrical Discharge Machining, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 2001, p. 12
- [Jos-11] Joshi, S., Govindan, P., Malshe, A., Rajurkar, K.: Experimental characterization of dry EDM performed in a pulsating magnetic field, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 60, Issue 1, 2011, p. 239-242

- [Jun-08] Jung, J.W., Jeong, Y.H., Min, B.-K., Lee, S.J.: Model-based pulse frequency control for micro-EDM milling using real-time discharge pulse monitoring, Transactions of ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Volume 130, Issue 3, 031106, 2008, <http://dx.doi.org/10.1115/1.2917305>
- [Kan-04] Kaneko, T.; Onodera, T. : Improvement in machining performance of die-sinking EDM by using self-adjusting fuzzy control, Journal of Materials Processing Technology, Volume 149, Issues 1-3, 10 June 2004, Pages 204-211
- [Kha-07] Khanra, A.K., Sarkar, B.R., Bhattacharya, B., Pathak, L.C., Godkhindi, M.M.: Performance of ZrB₂-Cu composite as an EDM electrode, Journal of Materials Processing Technology, Volume 183, Issue 1, 5 March 2007, Pages 122-126
- [Kie-11] Kienzler, A.: Auswirkungen mechanischer Oberflächenbehandlungen auf die Randschichteigenschaften mikrostrukturierter Formeinsätze, Dissertation, Schriftenreihe "Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik", 2011, ISBN 978-3-8322-9799-2
- [Kle-11] Kleppmann, W.: Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren, Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG; Auflage: 7., 2011, ISBN-10 3446427740
- [Klo-07] Klocke, F., König, W.: Fertigungsverfahren 3 – Abtragen, Generieren, Lasermaterialbearbeitung, 4. Auflage, Springer-Verlag, 2007, ISBN 3-540- 23492-6
- [Kuc-10] Kucukturk, C., Cogun, C.: A New Method for Machining of Electrically Nonconductive Workpieces Using Electric Discharge Machining Technique, Machining Science and Technology, Volume 14, Issue 2, pp. 189-207
- [Kun-97] Kunieda, M., Yoshida, M., Taniguchi, N.: Electrical discharge machining in gas, Annals of the CIRP 46(1), 1997 pp. 143-146.
- [Kun-01] Kunieda, M., Furudate, C., High precision finish cutting by dry WEDM, Annals of the CIRP 50(1), 2001, pp. 121-124.
- [Kun-03] Kunieda, M., Miyoshi, Y., Takaya, T., Nakajima, N., ZhanBo, Y., Yoshida, M.: High Speed 3D Milling by Dry EDM, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 52, Issue 1, 2003, pp. 147-150

- [Kun-05] Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K. P., Schumacher, B. M.: Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 54, Issue 2, 2005, p. 64-87
- [Lau-04] Lauwers, B., Kruth, J. P., Liu, W., Eeraerts, W., Schacht, B., Bleys, P.: Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials, Journal of Materials Processing Technology, Volume 149, Issues 1–3, 2004, pp. 347-352
- [Laz-44] Lazarenko, B.R., Lazarenko, N.I.: Elektrische Erosion von Metallen, Cosenergoidat, Moskau, 1944
- [Laz-47] Lazarenko, B.R.: Die Elektrofunkensbearbeitung von Metallen, Vestnik: Maschinostroia, 1974
- [Lau-07] Lauwers, B., Kruth, J.-P., Brans, K.: Development of Technology and Strategies for the Machining of Ceramic Components by Sinking and Milling EDM, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 56, Issue 1, 2007, Pages 225-228
- [Lin-05] Lin, J. L.; Lin, C. L.: The use of grey-fuzzy logic for the optimization of the manufacturing process, Journal of Materials Processing Technology, Volume 160, Issue 1, 1 March 2005, Pages 9-14
- [Liu-09] Liu K.; Reynaerts D.; Lauwers B.: Influence of the pulse shape on the EDM performance of Si₃N₄–TiN ceramic composite; CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 58, 2009, pages 217–220
- [Liu-10] Liu, K., Lauwers, B., Reynaerts, D.: Process capabilities of Micro-EDM and its applications, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 47, 2010, p. 11–19, DOI 10.1007/s00170-009-2056-1
- [Lla-01] Llanes, L., Idanez, E., Martinez, E., Casas, B., Esteve, J.: Influence of electrical discharge machining on the sliding contact response of cemented carbides, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 19, 2001, p. 35–40
- [Mas-00] Masuzawa, T.: State of the art of micromachining, CIRP Annals of Manufacturing Technology 49/2, 2000, p. 473–488.

- [Mas-01] Masuzawa T.: „Micro-EDM“, Proc. 13th International Symposium for Electro Machining (ISEM XIII), Bilbao, 2001, S. 3 - 19
- [Men-05] Menz, W., Mohr, J., Paul, O.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure, 3. Auflage, WILEY-VHC Verlag, Weinheim 2005, ISBN 978-3-527-3053-6-0
- [Mic-05] Michelt, B., Schulze, J.: Die Spektralfarben des Nanometers, Mikroproduktion, 2/2005, S.39 ff.
- [Mic-10] Micro-Epsilon: Konfokal-chromatische Wegsensoren, Fa. Mikro-Epsilon, <http://www.micro-epsilon.de/download/products/dat--optoNCDT-2401--de.pdf>, besucht: 03/2012
- [Mic-00] Michel, F., Ehrfeld, W., Koch, O., Gruber, H.-P.: EDM for micro fabrication - technology and applications, in: Proceedings International Seminar on Precision Engineering and Micro Technology, Aachen (Germany), 2000
- [Miz-96] Mizugaki, Y.: Contouring electrical discharge machining with on-machine measuring and dressing of a cylindrical graphite electrode, Proceedings of the IEEE IECON 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation 3, 1996, p. 1514–1517
- [Moh-96] Mohri, N., Fukuzawa, Y., Tani, T., Saito, N., Furutani, K.: Assisting Electrode Method for Machining Insulating Ceramics, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 45, Issue 1, 1996, pp. 201-204
- [Nan-09] Nanofocus: konfokales Messsystem µSurf; <http://www.nanofocus.de>, besucht 06/2009
- [Nar-05] Narasimhan, J., Yu, Z, Rajurkar, K. P.: Tool Wear Compensation and Path Generation in Micro and Macro EDM, Journal of Manufacturing Processes, Volume 7, Issue 1, 2005, pp. 75-82
- [Ngu-12] Nguyen, M. D., Rahman, M., Wong, Y. S.: Enhanced surface integrity and dimensional accuracy by simultaneous micro-ED/EC milling, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 61, Issue 1, 2012, pp. 191-194
- [Opm-12] OPM: Bedienerhandbuch C1 Weißlichtsensor (Fa. OPM), http://www.opm-messtechnik.de/download/c1_dt.pdf, besucht: 04/2012

- [Pil-07] Piltz, S.: Grundlagen und Prozessstrategien der Mikrofunken-erosion für die Bearbeitung von Rotationsbauteilen, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2007
- [Pop-11] Popov, K., Petkov, P.: Layer based micro-machining - New approach for tool-path generation, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 4, Issue 4, 2011, pp. 370-375
- [Raj-00] Rajurkar, K. P. Yu, Z. Y.: 3D Micro-EDM Using CAD/CAM, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 49, Issue 1, 2000, pp. 127-130
- [Ras-06] Raschke, J.: Höhere Prozesssicherheit und Abtragleistung beim Erodieren, www.maschinenmarkt.vogel.de, besucht: 09/2006
- [Rei-09] Reinecke, H., Müller, C.: Micromachining, Comprehensive Microsystems, Volume 1, 2008, pp. 379-402
- [Roy-95] Roy, R.: A primer on the Taguchi Method, Society of Manufacturing Engineers, Library of Congress Catalog Card Number 89-14736, ISBN 0-87263-468-X
- [Sar-10] Sarix SX 100 HPM – Datenblatt, 06/2012: http://sarix.com/index.php?page=sx_100_tech_specs
- [Sch-04] Schumacher, B.M.: After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed, Journal of Materials Processing Technology 149, 2004, p. 376–381
- [Sch-08] Schulze, V.; Ruhs, C.: Mit Mikrobahnerosion zum perfekten Formeinsatz; Mikroproduktion 05/2008; S. 34-37
- [Sch-09] Schulze, H.-P.: Effekte der Elektroenergieumwandlung - Funkenerosion/Electrical Discharge Machining, Universität Magdeburg, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit (IGET), Vorlesungsskript, 2009
- [Sie-10] Siebertz, K., van Bebber, D, Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung - Design of Experiment. Dissertation (DoE), Springer Verlag, Aachen, 2010
- [TEK-06] Tektronix TDS 2024 – Datenblatt, <http://www.tek.com>, 2006
- [Tho-07] Thomaidis, D.: Pulveradditivierte Dielektrika in der Mikrosenkerosion, Berichte der Produktionstechnik, Band 14/2007, Shaker Verlag, 2007

-
- [Ton-08] Tong, H., Li, Y., Wang, Y., Yu, D.: Servo scanning 3D micro-EDM based on macro/micro-dual-feed spindle, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, Issues 7–8, 2008, pp. 858-869
- [Too-12] Toolox44 – Technische Informationen, Fa. SSAB, http://www.ssab.com/Global/Toolox/Datasheets/de/044_Datasheet_D_Toolox_44_DE.pdf, besucht: 03/2012
- [Tri-00] Tricarico, C., Forel, B., Orhant, E.: Measuring device and method for determining the length of an electrode, U.S. Patent 6072143. Charmilles Technologies S.A., 2000
- [Tsa-04] Tsai, Y.-Y., Masuzawa, T.: An index to evaluate the wear resistance of the electrode in micro-EDM, *Journal of Material Processing Technology* 149, 2004, p. 304-309
- [Tze-05] Tzeng, Y., Chen, F.: Investigation into some surface characteristics of electrical discharge machined SKD-11 using powder-suspension dielectric oil, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 170, Issues 1–2, 14 December 2005, p. 385-391
- [Uhl-05] Uhlmann, E., Piltz, S., Doll, U.: Machining of micro/miniature dies and moulds by electrical discharge machining - Recent development, *Journal of Materials Processing Technology* 167, 2005, p. 488–493
- [Uhl-10] Uhlmann, E., Röhner, M., Langmack, M.: Chapter 3 - Micro-EDM, *Micromanufacturing Engineering and Technology*, 2010, p. 39-58
- [Wan-04] Wang, T., Kunieda, M.: Dry WEDM for finish cut, *Key Engineering Materials* 259-260, 2004, pp. 562-566.
- [Xu-09] Xu, M.G., Zhang, J.H., Li, Y., Zhang, Q.H., Ren, S.F.: Material removal mechanisms of cemented carbides machined by ultrasonic vibration assisted EDM in gas medium, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 209, Issue 4, 19 February 2009, p. 1742-1746
- [Yan-10] Yan, M.-T., Lin, S.-S.: Process planning and electrode wear compensation for 3D micro-EDM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 53, Numbers 1-4, p. 209-219, DOI: 10.1007/s00170-010-2827-8

- [Yas-04] Yasuo, Y., Katsuhiko, S.: An evaluation of difficulty in machining difficult-to-cut materials by using difficult-to-cut rating, Journal of the Japan Society for Precision Engineering 70, 2004, p. 407-411
- [Yu-03] Yu, Z.Y., Kozak, J., Rajurkar, K.P.: Modelling and Simulation of Micro EDM Process, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 52, Issue 1, 2003, Pages 143-146
- [Yu-04] Yu, Z. B., Takahashi, J., Kunieda, M.: Dry electrical discharge machining of cemented carbide, Journal of Materials Processing Technology 149, 2004, pp. 353-357.
- [Yu-05] Yu, Z. B., Takahashi, J., Nakajima, N., Sano, S., Kunieda, M.: Feasibility of 3-D surface machining by dry EDM, International Journal of Electrical Machining 10, 2005, pp. 15-20.
- [Yua-09] Yuangang, W., Fuling, Z., Jin, W.: Wear-resist Electrodes for Micro-EDM, Chinese Journal of Aeronautics, Volume 22, Issue 3, June 2009, p. 339-342
- [Zei-09] Zeiss: Aufrechte Mikroskope für die Materialanalyse, <http://www.zeiss.de>, besucht: 06/2009