

**Gepulste elektrochemische Bearbeitung von
Kupferelektroden und deren Einsatz zur
funkenerosiven Strukturierung von Hartmetall**

Dissertation

zur Erlangung des Grades des
Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultäten
der Universität des Saarlandes

von

Dipl.-Ing. Philipp Steuer

Saarbrücken 2015

Tag des Kolloquiums:	06.06.2016
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
	Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel
Vorsitzender:	Prof. Dr. mont. Christian Motz
Akad. Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Joachim Schmitt

Zusammenfassung

Die Strukturierung von Hartmetall ist eine fertigungstechnische Herausforderung, der oft mit Funkenerosion begegnet wird. Ein potentiell geeignetes Elektrodenmaterial für das in dieser Arbeit betrachtete funkenerosive Senken ist Elektrolytkupfer. Der auftretende Verschleiß und die damit einhergehende Ungenauigkeit bedingt den regelmäßigen Austausch der vorbereiteten Elektroden, was je nach Struktur zeit- und kostenintensiv ist. Die elektrochemische Bearbeitung arbeitet dagegen verschleißfrei nach dem Prinzip der anodischen Metallauflösung, sodass die Werkzeugelektrode nur einmalig zu fertigen ist. Eine Ausbildung passiver Schichten oder eine unterschiedliche Löslichkeit bei mehrphasigen Werkstoffen, wie beispielsweise Hartmetall, kann jedoch eine erfolgreiche Bearbeitung verhindern. In der Arbeit werden diese Eigenschaften konstruktiv zum Aufbau einer Prozesskette genutzt, die elektrochemisch strukturierte Elektroden im funkenerosiven Prozess zur Strukturierung von Hartmetall einsetzt. Dazu werden die Prozesse an industriellen Serienanlagen hinsichtlich des Einflusses der Bearbeitungsparameter untersucht. Zudem werden die Zusammenhänge zwischen den Prozessen untersucht, etwa Wärmeeinfluss bei der Funkenerosion, Einfluss der durch die elektrochemische Auflösung entstehenden Oberflächenrauheit und Abbildungsgüte der Prozesse. Mit der Prozesskombination ergeben sich Potentiale zur Weiterentwicklung von Werkzeugen mit verbesserten Eigenschaften und spezifischen Anwendungsfeldern.

Abstract

From the point of view of production engineering the structuring of hard metal is a challenge which is usually handled by electrical discharge machining. A suitable electrode material for the die sinking used in this work is electrolytic copper. The electrode wear leads to geometry losses which necessitates the regular exchange of the electrodes. In contrast, electrochemical machining, using anodic metal dissolution, works wear-free, thus the tool electrode has to be manufactured only once. The formation of passive layers and the potentially different solubility of components when using multiphase materials like hard metal can inhibit a successful machining. These process characteristics are combined in this work to form a process chain which uses electrochemically structured copper electrodes in electrical discharge machining for structuring hard metal. For doing so, the processes are investigated towards the influence of the machining parameters using industrial-size machines. In addition, the connections between the processes, like the heat influence during electrical discharge machining, the influence of the tool roughness produced by the electrochemical machining and the reproducibility throughout the process chain are investigated. Using this process chain potentials for the improvement of tools for specific applications arise.

Vorwort

Die Grundlagen für die vorliegende Arbeit entstanden während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) von April 2012 bis August 2015 in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fertigungstechnik (LFT) der Universität des Saarlandes.

Herrn Professor Dr.-Ing. Dirk Bähre, dem Inhaber des LFT, danke ich für die Möglichkeit zur Promotion und seine stete Unterstützung. Zudem bedanke ich mich, dass er mir die Präsentation und Diskussion meiner Ergebnisse auf internationalen Konferenzen ermöglicht hat. Bei Herrn Professor Dr. rer. nat. Helmut Seidel bedanke ich mich für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens und sein Interesse an dieser Arbeit.

Ein ganz herzlicher Dank geht an meine Bürokollegen Herrn Dipl.-Ing. Andreas Rebschläger und Herrn Dipl.-Ing. M.Eng. Olivier Weber für die schöne und lehrreiche Zusammenarbeit am ZeMA. Ohne die fruchtbaren Diskussionen und wertvollen Hinweise wäre diese Arbeit wohl nie entstanden. Herrn Rebschläger danke ich nochmals gesondert für das Gegenlesen dieser Arbeit.

Des Weiteren danke ich Herrn Bernd Schmitt und Herrn Stefan Wilhelm, die mir stets für eine informative Unterhaltung zur Verfügung standen, aber auch für ihre Hilfsbereitschaft bei der Probenpräparation und Durchführung von Messungen. Herrn Schmitt danke ich nochmals gesondert für das Gegenlesen dieser Arbeit. Ein Dank gebührt ebenfalls den Kollegen vom Lehrstuhl, von denen ich viel gelernt habe.

Ein weiterer Dank geht an meine wissenschaftlichen Hilfskräfte sowie Bachelor- und Diplomarbeiten für die gewissenhafte Durchführung von Versuchen und Messungen.

Frau Dipl.-Übers. Anne Weber danke ich für die redaktionelle Durchsicht der vorliegenden Arbeit, ihre Geduld und beständige Ermunterung.

Nicht zuletzt bedanke ich mich für die finanzielle Unterstützung der Europäischen Union im Rahmen der EFRE-Förderung zu den Programmen „INTEGRATiF – ProQ^{Quadrat}“ sowie „Interreg IV-A – Initiative PRECISE“. Auch möchte ich den aktuellen Geschäftsführern des ZeMA, Herrn Professor Dr.-Ing. Rainer Müller und Herrn Jochen Flackus, meinen Dank für die Bereitstellung der Infrastruktur und des Arbeitsplatzes über die Projektlaufzeit hinaus aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich während dieser Zeit stets unterstützt haben. Letztendlich haben sie den Grundstein zur Entstehung dieser Arbeit gelegt. Meine Mutter († 2014) wäre sehr stolz.

*"Science is like sex: sometimes something useful comes out,
but that is not the reason we are doing it."*

Richard P. Feynman

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	2
2 Grundlagen	5
2.1 Werkstoffe.....	5
2.1.1 Kupfer und Wolframkupfer.....	5
2.1.2 Hartmetall	8
2.1.3 Stahl	12
2.2 Verfahren	13
2.2.1 Elektrochemische Bearbeitung (PECM)	14
2.2.2 Funkenerosive Bearbeitung (EDM)	27
3 Stand der Technik	39
3.1 Elektrochemische Bearbeitung von Kupfer	39
3.2 Elektrochemische Bearbeitung von Hartmetall	43
3.3 Funkenerosive Bearbeitung von Hartmetall	44
4 Untersuchungen zu Werkstoffverhalten und Prozesseinflüssen.....	47
4.1 Gepulste elektrochemische Bearbeitung von Kupfer	47
4.1.1 Versuchsaufbau und Versuchsplan	48
4.1.2 Kathodenbewegung während der Impulse und Einfluss der Phase.....	52
4.1.3 Einfluss des Elektrolytdrucks	56
4.1.4 Vorschub und Stromdichte	58
4.1.5 Spaltweite und Stromdichte	64
4.1.6 Spezifischer Materialabtrag und Stromdichte	68
4.1.7 Oberfläche und Stromdichte	72
4.1.8 Polarisationsspannung	77
4.1.9 Fazit und Festlegen einer Bearbeitungsstrategie	79
4.2 Elektrochemische Bearbeitung von Wolframkupfer und Hartmetall	81
4.2.1 Wolframkupfer	82
4.2.2 Hartmetall	83
4.3 Funkenerosive Bearbeitung von Hartmetall	86
4.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsplan	88
4.3.2 Elektrodenverschleiß, Materialabtragsrate und Oberflächenrauheit	90
4.3.3 Spaltweite	96
4.3.4 Oberfläche und Randzone.....	98
4.3.5 Einfluss der initialen Werkzeugrauheit.....	103
4.3.6 Fazit und Festlegen einer Bearbeitungsstrategie	105

5 Aufbau der PECM-EDM-Prozesskette.....	107
5.1 Geometrieübertragung von Grundformen	107
5.2 Geometrieübertragung feiner Strukturen	111
5.3 Geometrieübertragung von Pyramidenstrukturen	112
5.4 Bewertung.....	113
6 Zusammenfassung und Ausblick	115
6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	115
6.2 Ausblick	119
Literaturverzeichnis	120
Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole.....	134
Anhang A: Durchflussbetrachtungen des PECM-Versuchsaufbaus	137
Anhang B: Ergebnisse der Frontalspaltversuche	139
Anhang C: Auswertung der EDM-Materialabtragsversuche VG627	142
Anhang D: Anlagentechnik.....	146
Anhang E: Rauheitskennwerte.....	149

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Prinzip der PECM-EDM-Prozesskette	3
Abbildung 1.2: Untersuchungskonzept	4
Abbildung 2.1: Einsatzbereiche für Kupfer [11].....	5
Abbildung 2.2: Anwendungsbereiche für Hartmetalle in Abhängigkeit von Korngröße und Kobaltgehalt [28]	8
Abbildung 2.3: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [50]	13
Abbildung 2.4: Elektrochemisches Senken und Formentgraten nach DIN 8590 [49]	14
Abbildung 2.5: Ablauf des PECM, ähnlich [58]	15
Abbildung 2.6: Prinzip der Vorgänge bei der elektrochemischen Bearbeitung	17
Abbildung 2.7: Schematischer Stromdichte-Spannungsverlauf	19
Abbildung 2.8: Unterschied zwischen passivierenden und nicht-passivierenden Elektrolyten, nach [54]	20
Abbildung 2.9: Spaltentwicklung in einer elektrolytischen Zelle	22
Abbildung 2.10: Schematischer Vergleich der Seitenspaltentwicklung.....	23
Abbildung 2.11: Schema kathodischer Zwischenpulse bei rechteckigen Pulsformen [101]	25
Abbildung 2.12: Funkenerosives Senken und funkenerosives Schneiden nach DIN 8590 [49]	27
Abbildung 2.13: Funktionsweise der Funkenerosion	28
Abbildung 2.14: Phasen der Funkenentladung bei der Funkenerosion, nach [62, 116]	29
Abbildung 2.15: Theoretische Spaltweite zur Funkenentstehung bei verschiedenen Dielektrikumgüten.....	33
Abbildung 2.16: Einfluss der Polarität bei der Funkenerosion	35
Abbildung 3.1: Potentialdifferenz vs. Stromdichte bei nitratbasierten Elektrolyten [160]	41
Abbildung 3.2: Pourbaix-Diagramm für Kupfer [166]	42
Abbildung 3.3: Ergebnis der elektrochemischen Bearbeitung von WCu in NaNO ₃ bei pH 7,2	42
Abbildung 4.1: Einfluss- und Wirkgrößen des PECM-Prozesses.....	47
Abbildung 4.2: Versuchsaufbau der PECM-Frontalspaltversuche	49
Abbildung 4.3: Einfluss der Phase auf die mechanische Spaltweitenänderung.....	53
Abbildung 4.4: Einfluss der Phase und der Frequenz auf die mechanische Spaltweitenänderung.....	54
Abbildung 4.5: Einfluss der Phase auf die Stromdichte	54
Abbildung 4.6: Einfluss der Phase auf die Spaltweite.....	55

Abbildung 4.7: Einfluss der Phase auf den spezifischen Materialabtrag	55
Abbildung 4.8: Einfluss der Phase auf die Oberflächenrauheit.....	56
Abbildung 4.9: Konturdiagramme zum Druckeinfluss	57
Abbildung 4.10: Einfluss von Impulszeit und Bearbeitungsfrequenz auf die Stromdichte [198]	59
Abbildung 4.11: Änderung der praktischen zur theoretischen Stromdichte	60
Abbildung 4.12: Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf die Stromdichte	63
Abbildung 4.13: Konturdiagramme zur Stromdichte	63
Abbildung 4.14: Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf die Spaltweite	66
Abbildung 4.15: Konturdiagramme zur Spaltweite.....	67
Abbildung 4.16: Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf den spezifischen Materialabtrag.....	70
Abbildung 4.17: Konturdiagramme zum spezifischen Materialabtrag.....	71
Abbildung 4.18: Oberflächenbeschaffenheit in Abhängigkeit von der Stromdichte bei pH 7,2; $U_{\text{gap}} = 10 \text{ V}$; $t_{\text{on}} = 2 \text{ ms}$	74
Abbildung 4.19: Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf die Oberflächenrauheit	75
Abbildung 4.20: Konturdiagramme zur Oberflächenrauheit.....	76
Abbildung 4.21: Polarisationsspannung in Abhängigkeit von der Stromdichte	77
Abbildung 4.22: Einfluss der Materialpaarung auf die Polarisationsspannung	78
Abbildung 4.23: Parameterauswahl für die Strukturierung	80
Abbildung 4.24: Einfluss- und Wirkgrößen des EDM-Prozesses	86
Abbildung 4.25: Versuchsaufbau der EDM-Frontalspaltversuche	88
Abbildung 4.26: Central-Composite-Design nach [196].....	90
Abbildung 4.27: Haupteffekte- und Konturdiagramme zum Elektrodenverschleiß bei VGH2.....	93
Abbildung 4.28: Haupteffekte- und Konturdiagramme zur Materialabtragsrate bei VGH2.....	94
Abbildung 4.29: Haupteffekte- und Konturdiagramme zur Oberflächenrauheit bei VGH2.....	95
Abbildung 4.30: Versuchsaufbau der EDM-Spaltweitenversuche.....	96
Abbildung 4.31: Weite des Frontalspalts (S_F) und des Seitenspalts (S_S) bei der Hartmetallbearbeitung	97
Abbildung 4.32: Rasterelektronenmikroskopische Übersichtsaufnahme einer funkenerodierten Hartmetallprobe VGH2	100
Abbildung 4.33: Randzone von funkenerosiv bearbeitetem Hartmetall VG627	102
Abbildung 4.34: White layer auf Stahl 1.7131	102

Abbildung 4.35: Schliffbild einer Kupferelektrode nach dem EDM-Prozess	103
Abbildung 4.36: Dicke der schwarzen Schicht einer Kupferelektrode nach dem EDM-Prozess	103
Abbildung 4.37: Einfluss der Werkzeugrauheit auf das EDM-Ergebnis	104
Abbildung 4.38: Optimierte Parameter für die Strukturierung von VGH2.....	106
Abbildung 4.39: Optimierte Parameter für die Oberflächenglättung von VGH2	106
Abbildung 5.1: PECM-EDM-Prozesskette	107
Abbildung 5.2: Kathoden zur Übertragung der Grundformen	108
Abbildung 5.3: Mittels Prozesskette übertragene Pyramidenstruktur	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Eigenschaften der verwendeten Kupfersorten	7
Tabelle 2.2: Klassifizierung von WC-Co-Hartmetallen nach der Korngröße (nach einem Vorschlag des Arbeitskreises Hartmetall im Fachverband Pulvermetallurgie, 1999) [21] sowie die Einsatzbereiche	11
Tabelle 2.3: Eigenschaften der verwendeten Hartmetallsorten	12
Tabelle 2.4: Eigenschaften der verwendeten Stahlsorten	12
Tabelle 2.5: Einfluss der EDM-Bearbeitungsparameter auf die Oberfläche	32
Tabelle 2.6: Empfohlene Werkstoffkombinationen für die Funkenerosion [107]	37
Tabelle 3.1: Ausschnitt der Standardpotentiale von Kupferverbindungen [151]	39
Tabelle 3.2: Stand der Technik zur funkenerosiven (Hartmetall-)Bearbeitung.....	45
Tabelle 4.1: Regressionen zur Stromkorrektur der ausgegebenen Stromhöhen	48
Tabelle 4.2: Parameterstufen der elektrochemischen Wirkungsgradversuche	50
Tabelle 4.3: Signifikanz der Phase auf die Ausgangsparameter	56
Tabelle 4.4: Druckeinfluss auf die Oberflächenrauheit	57
Tabelle 4.5: Signifikanz des Drucks auf die Ausgangsparameter	58
Tabelle 4.6: Stromdichte unter dem Einfluss von Vorschub, Impulszeit und pH-Wert.....	61
Tabelle 4.7: Spaltweite unter dem Einfluss von Vorschub, Impulszeit und pH-Wert.....	65
Tabelle 4.8: Spezifischer Materialabtrag unter dem Einfluss von Vorschub, Impulszeit und pH-Wert	69
Tabelle 4.9: Oberflächenrauheit unter dem Einfluss von Vorschub, Impulszeit und pH-Wert	73
Tabelle 4.10: Durchschnittliche Kupfer-Oberflächenrauheit bei pH 7,2 und pH 10,3	76
Tabelle 4.11: Signifikanz der Eingangsparameter auf die Ausgangsparameter	79
Tabelle 4.12: Anteile der Elemente in Massen- und Atomprozenten für WCu nach PECM	83
Tabelle 4.13: REM- und EDX-Aufnahmen für WCu nach PECM.....	83
Tabelle 4.14: Anteile der Elemente in Massen- und Atomprozenten der Hartmetalle nach PECM	84
Tabelle 4.15: REM- und EDX-Aufnahmen der Hartmetalle nach PECM	84
Tabelle 4.16: EDM-Einstellparameter nach dem Central-Composite-Design	90
Tabelle 4.17: Ergebnisse der funkenerosiven Bearbeitung der Hartmetalle	91
Tabelle 4.18: Anteile der Elemente in Massen- und Atomprozenten der Hartmetalle nach EDM	99
Tabelle 4.19: REM- und EDX-Aufnahmen der Hartmetalle nach EDM.....	99

Tabelle 4.20: Anteile der Elemente in Massen- und Atomprozenten der Kupferelektroden nach EDM.....	100
Tabelle 4.21: REM- und EDX-Aufnahmen der Kupferelektroden nach EDM.....	101
Tabelle 4.22: EDM-Parameter zum Einfluss der Werkzeugrauheit.....	104
Tabelle 5.1: Parameter für die elektrochemische Strukturübertragung.....	109
Tabelle 5.2: Parameter für die funkenerosive Strukturübertragung	109
Tabelle 5.3: Anwendung der PECM-EDM-Prozesskette für die Grundformen.....	110
Tabelle 5.4: Übertragungsergebnisse der Grundformen	110
Tabelle 5.5: Übertragungsergebnisse der Einzelprozesse und über die Prozesskette.....	110
Tabelle 5.6: Anwendung der PECM-EDM-Prozesskette für feine Strukturen	112
Tabelle 5.7: Übertragungsergebnisse der feinen Strukturen	112
Tabelle 5.8: Übertragungsergebnisse der Pyramidenstruktur.....	113

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Im Automobilbereich, im Aviationsektor, im Präzisionswerkzeug- und Formenbau sowie in weiteren Bereichen steigt die Nachfrage nach der Bearbeitung zunehmend härterer Werkstoffe wie Superlegierungen, Titanlegierungen oder Hartmetall [1, 2, 3, 4, 5] ebenso wie der Bedarf zur Herstellung immer kleinerer und feiner Strukturen [6, 7].

Die Bearbeitung dieser Werkstoffklassen erfordert Verfahren mit außergewöhnlichen Merkmalen. Beispiele dafür sind das elektrochemische Abtragen (engl. electrochemical machining – ECM) und das funkenerosive Abtragen (engl. electrical discharge machining – EDM). ECM und EDM sind Verfahren mit einzigartigen Charakteristiken und manchmal die einzige Möglichkeit zur Fertigung von 3D-Strukturen im Makro-, Mikro- und Nano-Maßstab in schwer zerspanbaren Werkstoffen [1]. Die elektrochemische Bearbeitung wurde seit den 1950er Jahren, zeitgleich mit der Funkenerosion, vorwiegend für die Bearbeitung von schwer zu bearbeitenden Metallen und Legierungen mit dem Ziel der Erhöhung der Qualität und Bearbeitungsflexibilität bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten entwickelt [8, 9]. Beide Verfahren tragen Werkstoff mithilfe des Stromflusses über eine chemische bzw. thermische Reaktion ab und übertragen so das Abbild einer auf das Werkzeug aufgebrachten Struktur. Sie zeichnen sich durch eine berührungslose Wirkweise aus und arbeiten unabhängig von der Härte des zu bearbeitenden Materials.

Vorteil und zugleich Nachteil beider Verfahren ist genau jene berührungslose Bearbeitung. Diese bringt Vorteile bzgl. der Werkstoffauswahl der Werkzeuge, da sie aus leicht zu bearbeitenden Materialien hergestellt werden können. Nachteile entstehen aufgrund der zwangsläufig benötigten Spaltweiten zwischen Werkzeug und Werkstück, die die genaue Dimension des entstehenden Werkstücks vor allem für ECM nur schwer abschätzbar machen [10]. Während EDM einen kontinuierlichen Aufstieg erlebte, konnte sich ECM aufgrund der verwendeten, teilweise gesundheitsgefährdenden Elektrolyte, wie beispielsweise starker Säuren, und Problemen bei der präzisen Strukturübertragung nicht durchsetzen. Mit Verwendung neutraler Elektrolyte und einer elektrisch sowie mechanisch gepulsten Arbeitsweise (engl. pulse electrochemical machining – PECM) konnten enorme Fortschritte bei der Bearbeitungsgenauigkeit erzielt werden, was die Technologie wieder für die Industrie interessant machte. Allerdings sind der technologische Vorsprung und die größere Verbreitung von EDM bis heute ausgeprägt.

EDM ist heutzutage neben den hauptsächlich zur Oberflächenoptimierung eingesetzten Verfahren Schleifen, Honen etc. das am weitesten verbreitete Verfahren zur Bearbeitung von Hartmetall und zur Herstellung von Raumformen, wobei die Elektroden einem nicht unerheblichen Verschleiß unterliegen. Dagegen

arbeitet PECM verschleißfrei, ist jedoch zur zufriedenstellenden Bearbeitung von Hartmetall aufgrund unterschiedlicher Bestandteile in diesem Werkstoff bisher nicht in der Lage. Auf Grundlage dieser verfahrensspezifischen Vor- und Nachteile wird die Idee einer PECM-EDM-Prozesskette entwickelt, die es erlaubt konventionell nur schwer bearbeitbare Materialien mittels Funkenerosion zu strukturieren, wobei die benötigten Werkzeugelektroden mittels PECM hergestellt werden. Dabei werden beide Verfahren auf die reine Senkbearbeitung beschränkt. Orbitalbewegungen, also das seitliche Auslenken der Werkzeuge, wie sie in der Funkenerosion verbreitet sind, werden nicht verwendet.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die Strukturierung der Hartmetall-Werkstücke erfolgt mittels Senkerosion. Üblicherweise geschieht dies in mehreren Schritten, vergleichbar mit konventionellen Bearbeitungsmethoden. Nach einem ersten groben Herstellen der gewünschten Kontur folgt ein Schlichten bzw. Polieren der Oberfläche, um eine geringe Oberflächenrauheit zu erzielen. Die Anzahl der benötigten Bearbeitungsschritte hängt von der Menge des abzutragenden Materials und dem Verschleiß der Elektroden ab. Je nach zulässiger Toleranz muss aufgrund des Elektrodenverschleißes jedoch für jede Endbearbeitung eine neue Elektrode zum Einsatz kommen. Um den Fertigungsaufwand in Zukunft geringer zu halten, werden die in diesem Vorhaben eingesetzten EDM-Elektroden mittels PECM strukturiert, siehe Abbildung 1.1. Als Elektrodenmaterial wird Kupfer ausgewählt, da es zum einen günstiger ist als das bei der Hartmetallbearbeitung meist präferierte Wolframkupfer und sich wie noch gezeigt wird mit dem weit verbreiteten Natriumnitrat-Elektrolyten elektrochemisch bearbeiten lässt. Dieses Vorgehen soll eine immer wieder identische und vergleichsweise einfache Herstellung und Nachbearbeitung der benötigten Elektroden erlauben, die nahezu beliebig komplizierte abbildbare oberflächennahe Strukturen enthalten können.

Diese Herangehensweise bietet den Vorteil, dass das Werkzeug für den PECM-Prozess aufgrund des quasi nicht vorhandenen Verschleißes nur einmal hergestellt werden muss und immer wieder eingesetzt werden kann. Der Elektrodenverschleiß im EDM-Prozess kann somit durch eine Serienproduktion der Werkzeuge kompensiert werden. Eine große Herausforderung in der Praxis besteht in der erstmaligen Auslegung und Herstellung der Kathode für den PECM-Prozess. Da sowohl EDM als auch PECM abbildende Verfahren sind, bestimmt die initial in die Kette eingeführte Geometrie maßgeblich das Endergebnis. Die Problematik der Reinigung zwischen den Prozessen soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter diskutiert werden, ist jedoch grundsätzlich von Bedeutung, da die Prozessmedien gegensätzliche Eigenschaften aufweisen und nicht in den anderen Prozess verschleppt werden dürfen: isolierend bzw. unendlicher Widerstand gegenüber spezifischer Widerstand.

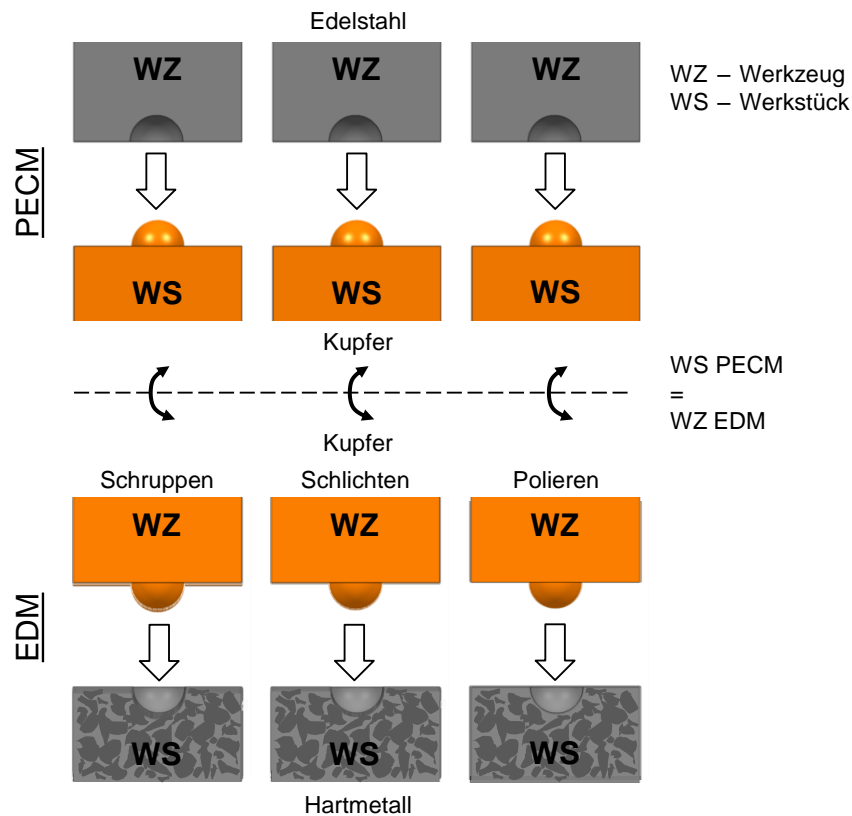


Abbildung 1.1: Prinzip der PECM-EDM-Prozesskette

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Klärung der grundlegenden Zusammenhänge der Parameter innerhalb der Verfahren bei der Bearbeitung der jeweiligen Werkstoffe. Das Hauptaugenmerk liegt dabei aufgrund des Erkenntnisrückstands auf den Parametern bei der elektrochemischen Bearbeitung von Kupfer. Bei der gesichteten Literatur fällt auf, dass vor allem im elektrochemischen Bereich durch Grundlagenversuche bisher fast ausschließlich Erkenntnisse bzgl. der Reaktionsabläufe gewonnen wurden. Eine Betrachtung auf industriell eingesetzten Serienmaschinen fehlt jedoch weitgehend. Um diesem Desiderat Abhilfe zu schaffen, verfolgt diese Arbeit einen eher anwendungsorientierten Ansatz.

Nach Erläuterung der Grundlagen folgt das Vorgehen der vorliegenden Arbeit dem Ablauf der Prozesskette. Ausgehend von einer umfangreichen Untersuchung zur Bearbeitung von Kupfer bei der gepulsten elektrochemischen Bearbeitung werden der Einfluss und die Signifikanz der Parameter auf das Prozessergebnis analysiert. Dabei wird auf die Kathodenbewegung während der Bearbeitung und die damit verbundene Spaltänderung innerhalb der Impulszeit eingegangen. Ebenfalls wird der Einfluss des Elektrolytdrucks im angewendeten Versuchsaufbau dargestellt. Danach folgen ausführliche Untersuchungen zum Einfluss der Parameter Vorschub, Spannung, Impulszeit und pH-Wert des Elektrolyten. Bewertet werden dazu die Stromdichte, die Spaltweite zwischen Werkzeug und Werkstück, der spezifische Materialabtrag und die entstehende Oberflächenrauheit. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden empirische Modelle vorgestellt und vorteilhafte Bearbeitungsparameter definiert.

Die Untersuchung zur funkenerosiven Bearbeitung von Hartmetall mit Kupferelektroden erfolgt mittels der statistischen Versuchsplanung unter Berücksichtigung der bekannten relevanten Bearbeitungsparameter. Dazu werden repräsentativ zwei kommerziell erhältliche Hartmetalle untersucht, die Ansprüchen aus dem Bereich erhöhter Zähigkeit, beispielsweise für Ziehringe, und aus dem Bereich hoher Härte, beispielsweise für Wendeschneidplatten, genügen. Untersucht werden die für die Entladeenergie und damit für das Ergebnis entscheidenden Parameter Strom, Spannung und Impulszeit. Bewertet werden der Materialabtrag, der Elektrodenverschleiß und die entstehende Oberflächenrauheit. Aufbauend auf den so gewonnenen Erkenntnissen werden Modelle zur Berechnung vorgestellt und vorteilhafte Bearbeitungsparameter definiert. Mit Bezug auf die sukzessive Verwendung beider Prozessschritte werden als Wechselwirkungen der Wärmeeinfluss von EDM auf die Elektroden sowie der Einfluss der Elektrodenrauheit nach PECM auf das Prozessergebnis betrachtet. Im Anschluss wird die Anwendbarkeit der Prozesskombination am Beispiel unterschiedlicher Strukturen gezeigt, die Güte der Reproduktion anhand verschiedener Merkmale wird beurteilt und Schwierigkeiten werden diskutiert. Zum Abschluss erfolgt eine Zusammenfassung. Abbildung 1.2 zeigt das Untersuchungskonzept schematisch.

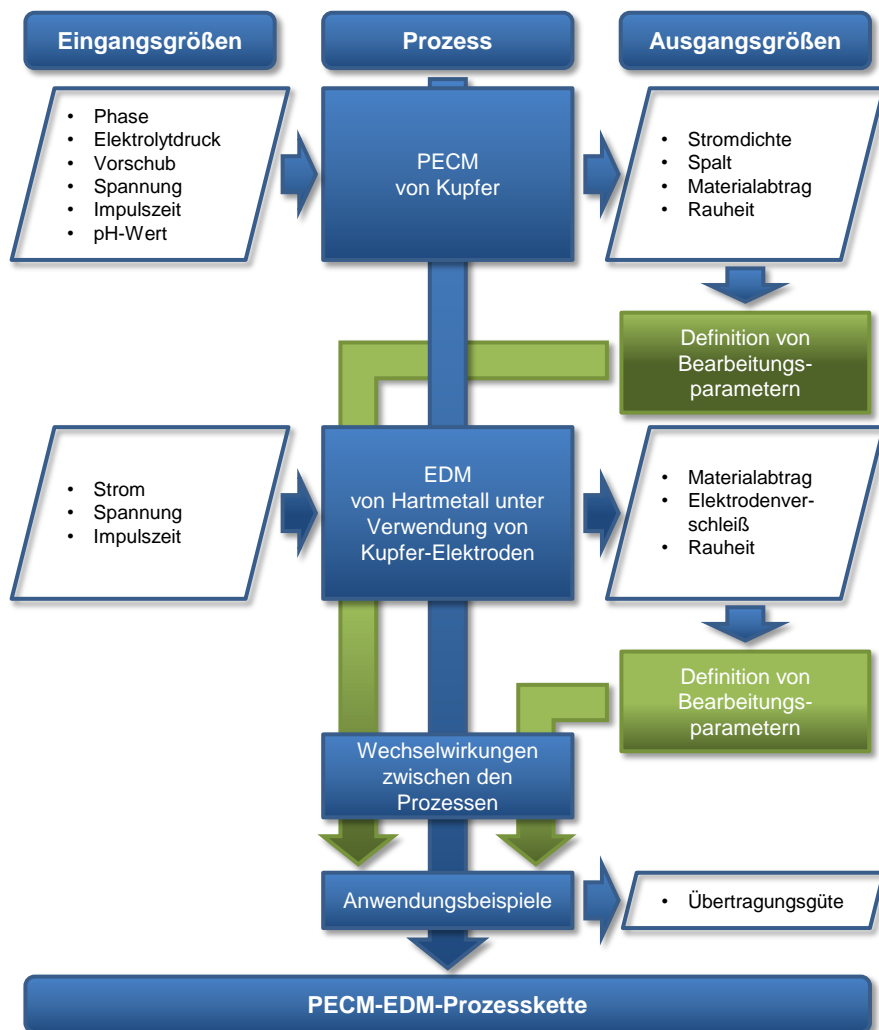


Abbildung 1.2: Untersuchungskonzept

2 Grundlagen

2.1 Werkstoffe

2.1.1 Kupfer und Wolframkupfer

Kupfer wird in vielfältiger Weise eingesetzt, wobei der größte Anteil auf die Elektroindustrie bzw. Elektrotechnik entfällt, siehe Abbildung 2.1. Durch entsprechendes Zulegieren von Elementen wie beispielsweise Wolfram zur Steigerung der Festigkeit, Zirkonium für elektrische Schalter oder Beryllium für funkenfreie Werkzeuge kann es vielfältig auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

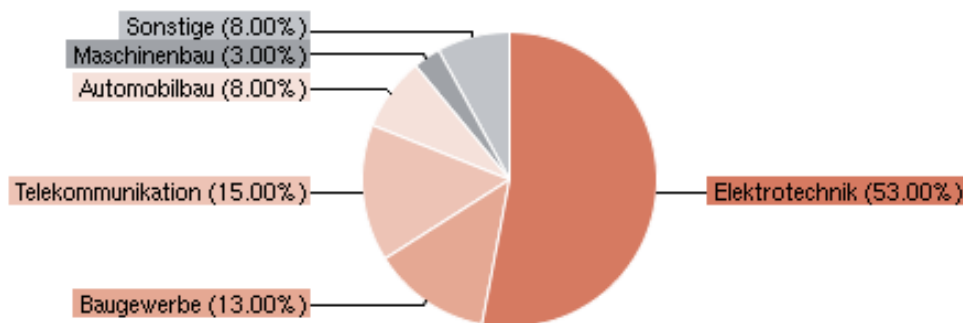


Abbildung 2.1: Einsatzbereiche für Kupfer [11]

Kupfer ist ein Nichteisenmetall, das heißt der Anteil an Reineisen ist kleiner als 50 %. Zur Raffination von Kupfer wird meist die Elektrolyse verwendet. Dazu wird ein vorraffiniertes Kupfer als Anodenplatte in eine wässrige Lösung aus Cu-Sulfat und Schwefelsäure eingehängt, welche als Elektrolyt dient. Bei einer Gleichspannung von 0,2 bis 0,35 Volt wird das Rohkupfer anodisch aufgelöst und das reine hochwertige Elektrolytkupfer an der Kathode abgeschieden. Die anderen Elemente gehen im Bad in Lösung oder sinken als Anodenschlamm zu Boden. Das entstehende Kathoden- oder Elektrolytkupfer enthält 99,99 % Cu, besitzt höchste elektrische Leitfähigkeit und Bruchdehnung [12, 13, 14]. Die entstandenen Kupferplatten können anschließend zu Halbzeugen umgeschmolzen werden.

Je nach Bestandteilen von Legierungselementen lassen sich verschiedene Klassen von Kupfer unterscheiden, die der Vollständigkeit halber kurz erläutert werden:

Werkstoff-Bezeichnung: Cu-ETP

Werkstoff-Nr.: CW004A

Cu-ETP ist ein durch elektrolytische Raffination hergestelltes, sauerstoffhaltiges (zähgepoltes) Kupfer, das eine sehr hohe Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität

aufweist. Halbzeug aus Cu-ETP wird meistens über gegossene Formate, wie z. B. Walzbarren und Gussdrähte, mittels Umformung gefertigt; das ausgezeichnete Formänderungsvermögen (Umformbarkeit) kommt hier sehr der Fertigung entgegen. Aufgrund des Sauerstoffgehaltes können keine Anforderungen an die Hartlöt- und Schweißbarkeit gestellt werden („Wasserstoffkrankheit“, vgl. Erläuterung am Ende des Kapitels). Cu-ETP kommt zum Einsatz, wenn eine hohe elektrische Leitfähigkeit verlangt wird, z. B. in den Bereichen Elektrotechnik und Elektronik [15]. Der Vorteil des geringen Sauerstoffgehaltes besteht darin, dass Restverunreinigungen aus dem Mischkristall entfernt und als Oxide ausgeschieden werden. Dies resultiert in einer erhöhten Leitfähigkeit, da eine Streuung der Elektronenwellen an Unregelmäßigkeiten vermieden wird [13].

Werkstoff-Bezeichnung: Cu-OFE

Werkstoff-Nr.: CW009A

Cu-OFE ist ein hochreines, nicht desoxidiertes und sauerstofffreies Kupfer, das keine im Vakuum verdampfenden Elemente beinhaltet und eine hohe Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme aufweist. Diese Kupfersorte besitzt neben einer sehr guten Warm- und Kaltumformbarkeit auch eine gute Korrosionsbeständigkeit, insbesondere gegen Atmosphäre (gut haftende Oxidschicht) bzw. Wasser, und ist praktisch unempfindlich gegen Spannungsrisskorrosion. Sie ist beständig gegenüber einer Wärmebehandlung in reduzierender Atmosphäre und lässt sich gut schweißen und sehr gut hart- und wechlöten. Cu-OFE wird hauptsächlich in der Elektrotechnik, Elektronik und Vakuumtechnik in diversen Halbzeugformen eingesetzt [15].

Werkstoff-Bezeichnung: Cu-HCP

Werkstoff-Nr.: CW021A

Cu-HCP ist ein hochreines und desoxidiertes Kupfer mit einem niedrigen Restphosphorgehalt, das eine hohe Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme aufweist. Diese Kupfersorte besitzt neben einer sehr guten Warm- und Kaltumformbarkeit eine gute Korrosionsbeständigkeit, insbesondere gegen Atmosphäre (auch Industrielatmosphäre) und Wasser. Sie hat eine gute Schweiß- und Hartlötbarkeit sowie Wasserstoffbeständigkeit. Cu-HCP wird hauptsächlich für Bauteile der Elektrotechnik und Elektronik (Kabelband, geschweißte Kabel) sowie als Plattierwerkstoff verwendet [15].

Werkstoff-Bezeichnung: Cu-DHP

Werkstoff-Nr.: CW024A

Cu-DHP ist ein desoxidiertes Kupfer mit begrenztem, hohem Restphosphorgehalt, das eine sehr gute Schweiß- und Hartlötbarkeit sowie Wasserstoffbeständigkeit aufweist. Es besitzt ein ausgezeichnetes Formänderungsvermögen (Umformbarkeit) und wird überall dort eingesetzt, wo an die elektrische Leitfähigkeit keine hohen Anforderungen gestellt werden. Hauptanwendungsgebiete sind Rohrleitungen (insbesondere in der Gas- und Wasserinstallation, in der Heizungs- und Klimatechnik sowie im Anlagenbau), Dach- und Wandbekleidungen (Bauwesen) und der Apparatebau [15].

In der Funkenerosion (siehe Kapitel 2.2.2) hat sich Cu-ETP, im Folgenden vereinfacht als Kupfer bzw. ECu bezeichnet, aufgrund seiner hohen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit als Elektrodenwerkstoff etabliert. Für die Bearbeitung von harten Werkstoffen wie Hartmetall hat sich Wolframkupfer (WCu) durchgesetzt. Durch den hohen Schmelzpunkt des Wolframs (Angaben von 3540 K bis 3695 K [16, 17, 18]) ist es wesentlich verschleißbeständiger als Kupfer, nachteilig ist die niedrigere elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie der deutlich höhere Preis.

WCu wird durch Pressen und Sintern von Wolfram-Pulver hergestellt. Durch dieses Vorgehen entsteht ein poröser Rohling. Anschließendes Tauchen in flüssiges Kupfer verschließt die Poren, dies wird Infiltration genannt. Eine weitere Möglichkeit ist die Flüssigphasensinterung. Je nach Korngröße des W-Pulvers sowie der Press- und Sinterparameter kann ein unterschiedlicher Gehalt von Wolfram bzw. Kupfer eingestellt werden [19]. Der Anteil an Wolfram liegt für die Funkenerosion in der Regel bei 75–80 % [20], da der Abbrand von WCu gemessen als Stoffverlust [mg/Ws] in diesem Bereich ein Minimum durchläuft [21]. Die Erhöhung der Festigkeit über eine stabile Strukturmatrix (585–689 MPa bei WCu [20] gegenüber 250–350 MPa bei Cu-ETP [15]) führt zu einer besseren Formbeständigkeit als bei Cu-ETP, weshalb sich WCu gut mechanisch bearbeiten lässt. Der Kupferanteil innerhalb der Legierung sorgt für eine gute elektrische Leitfähigkeit und die widerstandsfähige Strukturmatrix führt zu einer guten Beständigkeit gegenüber Abbrand bzw. Verschleiß.

Im Folgenden wird in dieser Arbeit mit Elektrolytkupfer (Cu-ETP) und Wolframkupfer (WCu) gearbeitet:

Tabelle 2.1: Eigenschaften der verwendeten Kupfersorten

	Einheit	Cu-ETP [15]	WCu 75/25 [19, 20]
Elektr. Leitfähigkeit @ 20°C	[MS/m]	57	23,78–27,84
Therm. Leitfähigkeit @ 20°C	[W/m·K]	394	190
Schmelzpunkt	[°C]	1083	Cu-Phase ab 1083
Dichte @ 20°C	[g/cm³]	8,93	14,30
Cu-Gehalt	[Gew-%]	≥ 99,9	25
Bi-Gehalt	[Gew-%]	≤ 0,0005	
O-Gehalt	[Gew-%]	≤ 0,04	
Pb-Gehalt	[Gew-%]	≤ 0,005	
W-Gehalt	[Gew-%]		75

Abschließend sei erwähnt, dass Kupfer empfindlich gegenüber Wasserstoff reagiert. Infolge seines geringen Atomvolumens ist die Diffusionskonstante des Wasserstoffs im Kupfer sehr hoch, sodass Wasserstoff verhältnismäßig rasch in erwärmtes Kupfer eindringen kann [22]. Im Kupfer in ungelöster Form enthaltenes Cu₂O reagiert dann zu $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$. Die Wassermoleküle können nicht wegdiffundieren und bauen einen hohen Druck auf, der das Gefüge regelrecht aufsprengt [13]. Dieses Verhalten ist auch unter dem Begriff „Wasserstoffkrankheit“ bekannt.

2.1.2 Hartmetall

Unter Hartmetall werden pulvermetallurgisch hergestellte Werkstoffe verstanden, die aus metallischen Hartstoffen (Carbiden) bestehen, welche in eine zähe Bindematrix eingelagert sind. Das erste Hartmetall wurde im Jahre 1923 als Mischung aus Wolframcarbid und Kobalt von der OSRAM-Studiengesellschaft in Berlin entwickelt und von Karl Schröter unter der Nummer DRP 420.689 für die *Patent-Treuhand-Gesellschaft für elektrische Glühlampen mbH* patentiert. Nach Verkauf des Patents 1926 an die Firma Krupp in Essen wurde das Material unter dem Begriff „Krupp-WIDIA“ (**Wie Diamant**) produziert [23, 24]. Hartmetalle sind aus der spanenden Fertigungstechnik aufgrund ihrer Verschleißbeständigkeit heute nicht mehr wegzudenken und werden praktisch für alle anspruchsvollen Zerspanungsaufgaben verwendet. Der Einsatzbereich erweitert sich seit der Erfindung und Nutzung als Werkstoff in der Werkzeugindustrie z. B. für Wendeschneidplatten [25] stetig und umfasst heutzutage auch weite Teile der erzeugenden und verarbeitenden Industrie, unter anderem Automobilbau, Luftfahrt, Öl- und Gasbohrungen, Bergbau usw. [26, 27]. Abbildung 2.2 zeigt einige Anwendungsbeispiele für Hartmetalle. Die außergewöhnliche Härte der Hartstoffe ist Ausdruck starker Bindungskräfte zwischen den Gitterbausteinen, weshalb für diese Stoffgruppe in der Regel auch hohe Schmelztemperaturen, kleine thermische Ausdehnungskoeffizienten und hohe Elastizitätsmoduln kennzeichnend sind [21].

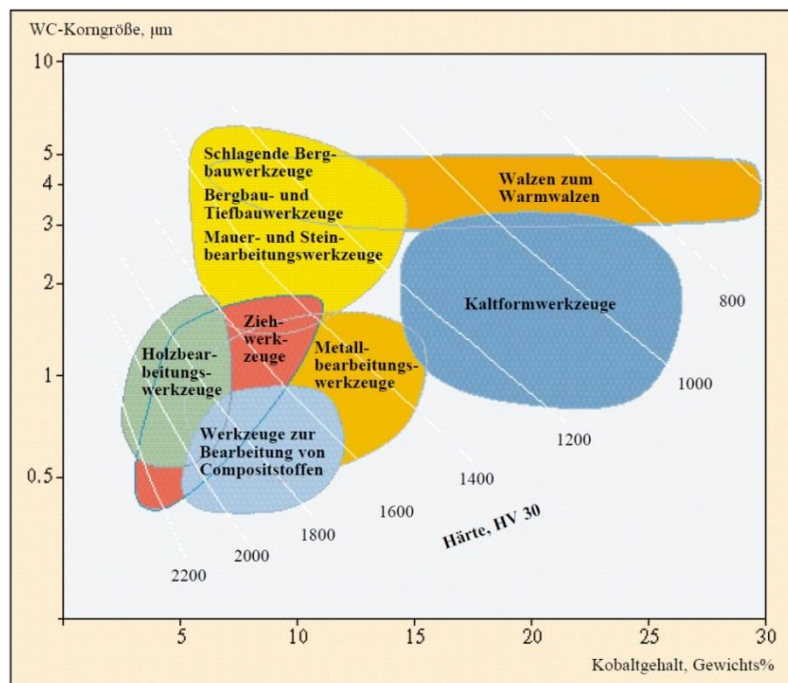


Abbildung 2.2: Anwendungsbereiche für Hartmetalle in Abhängigkeit von Korngröße und Kobaltgehalt [28]

Im einfachsten Fall dient Wolframcarbid (WC) als Hartphase, welche für die Härte und die Verschleißbeständigkeit zuständig ist, und Kobalt (Co) als Bindematrix, welche für die Festigkeit und die Zähigkeit maßgeblich ist [29]. Daneben können zur Anpassung bestimmter Eigenschaften auch weitere Ausgangsstoffe wie Tantalcarbid (TaC),

Titancarbid (TiC) und Nickel (Ni) hinzugegeben werden [30]. Diese werden gemäß den gewünschten Anteilen gemischt und weiterverarbeitet. Diese Herstellung erlaubt eine nahezu beliebige Mischung der Bestandteile, was zu unterschiedlichen Eigenschaften bzgl. Härte, Zähigkeit oder Schlagfestigkeit führt. Als Hauptbindemittel wird in der Regel Kobalt eingesetzt. Soll jedoch insbesondere eine Korrosionsbeständigkeit erzeugt werden, dienen Nickel und Nickel/Chrom als Binder [31].

Wolframcarbid ist eine nicht-toxische Keramik und besteht aus den chemischen Elementen Wolfram und Kohlenstoff. Es handelt sich um Einlagerungsmischkristalle. Dabei lagern sich durch Aufkohlen Kohlenstoffatome zwischen die Gitterplätze des Wolframs ein. Die Reaktion verläuft über W_2C zu WC. Eine andere Möglichkeit ist die Reduktion von Wolframoxiden mit Kohlenstoff unter Zuhilfenahme von Wasserstoff als Reduktionsmittel [32]. Wolframcarbid weist eine hexagonale und teilweise kubische Struktur auf, welche der Hauptgrund für die Stabilität der Carbide während der Bearbeitung trotz der dabei auftretenden hohen Temperaturen ist [33]. In Kombination mit der relativ geringen thermischen Ausdehnung im Bereich von $5,0\text{--}7,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ in Abhängigkeit vom jeweiligen WC-Co-Verhältnis [34] erklärt dies die Fähigkeit von Hartmetall, beim Einsatz als Schneidstoff in der Zerspanung höhere Abtragsraten im Vergleich zu Schnellarbeitsstahl leisten zu können.

Die Herstellung von Hartmetall erfolgt durch pulvermetallurgische Verfahren. Die Pulvermetallurgie umfasst primär Verfahren, bei denen aus Metallpulvern durch Verbindung ihrer Teilchen mittels Adhäsion, Diffusion (Sintern) und plastischer Verformung Formteile oder Halbzeuge hergestellt werden [35]. Das Vorgehen wird im Folgenden kurz in Anlehnung an [30] erläutert:

1. Einwaage

Je nach Anteil und Partikelgröße der Ausgangsrohstoffe können verschiedene Endigenschaften der Endprodukte wie z. B. Härte oder Zähigkeit eingestellt werden. Die Bestandteile der benötigten Rohstoffe werden entsprechend den gewünschten Mengenverhältnissen eingewogen. Um ein zu starkes Kornwachstum zu verhindern und eine feine Mikrostruktur zu gewährleisten, können Elemente wie Tantal, Niob, Chrom, Vanadium, Titan oder Hafnium im Anteil von 0,2–3,0 % hinzugegeben werden [33].

2. Mischen/Mahlen im Attritor

Das Mischen/Mahlen im Attritor erfolgt unter Zugabe einer Misch-/Mahflüssigkeit und dauert mehrere Stunden. Dabei werden Agglomerate der eingewogenen Rohstoffe zerstört und eine homogene Durchmischung aller Komponenten wird erreicht.

3. Granulation über Sprühtrocknen

Bei der Granulation erfolgt ein Zusammenlagern der feinen Partikel der verschiedenen Rohstoffsarten zu größeren Körnern. Dazu wird der Mischung aus gemahlene Rohstoffen und Misch-/Mahflüssigkeit Paraffin als Granulations-Hilfsmittel zugegeben. Nach einem erneuten Homogenisieren wird die entstandene sogenannte Speise im Prozessschritt des Sprühtrocknens über eine Düse in kleine

Tröpfchen zerstäubt. Die Tröpfchen steigen in einem Sprühturm auf, kommen mit einem entgegengerichteten Heißgasstrom in Berührung, der Anteil von Misch-/Mahlfüssigkeit an den Tröpfchen verdampft und die Rohstoffteilchen lagern sich unter der stabilisierenden Wirkung des Paraffins zu runden Granulatkörnern zusammen. Jedes Granulat Korn enthält im Idealfall Anteile der verschiedenen Rohstoffsorten und des Paraffins im Verhältnis ihrer Zugabe. Wichtigste Eigenschaften des Granulats sind eine gute Rieselfähigkeit und Verpressbarkeit.

4. Pressen/Formgebung

Das paraffinhaltige Granulat wird zu Formkörpern nahe der gewünschten Geometrie des Endproduktes verpresst. Hat der Formkörper eine genügend hohe Festigkeit, kann die Form konventionell bearbeitet werden. Die Festigkeit des Presslings kann dazu über eine Temperaturbehandlung, das sogenannte Vorsintern bei niedriger Temperatur (600–800 °C), leicht erhöht werden. Diese Alternative zur Bearbeitung des fertig gesinterten Hartmetalls wird als Grünbearbeitung bezeichnet. Mittels mehrachsiger Fräsbearbeitung lassen sich so beispielsweise sehr komplexe Geometrien erzeugen [36]. Eine Herausforderung bei der Grünbearbeitung ist die schwer kalkulierbare Schwindung bzw. Schrumpfung des Materials während des anschließenden Sintervorgangs. Es treten lineare Längenänderungen im Bereich von 15–20 % auf, welche aufgrund von Dichtegradienten im Grünling jedoch in ungleichmäßiger Schrumpfung resultieren können [29, 35, 37]. Ein klares Verständnis der Schrumpfung beim Sintern ist daher Voraussetzung für die Durchführung und Optimierung der Grünbearbeitung [38]. Ein Problem besteht darin, die nicht immer einheitliche Schwindung bei der Bearbeitung als Aufmaß zu berücksichtigen. Zudem ist durch die noch geringe Festigkeit des Grünlings die Gefahr der Beschädigung von Kanten gegeben.

5. Sintern

Unter Sintern versteht man eine Temperaturbehandlung, bei der das Produkt unter Auftreten einer flüssigen Phase verdichtet wird. Die maximale Sintertemperatur (1300–1550 °C) liegt im Allgemeinen in der Nähe oder knapp oberhalb des Schmelzpunktes der niedrigstschmelzenden Phase. Im Gegensatz zur schmelzmetallurgischen Verarbeitung, wie sie z. B. bei der Stahlerzeugung angewendet wird, gehen also nicht alle Bestandteile in den flüssigen Zustand über. Die flüssige Phase (hauptsächlich Kobalt) füllt kleine Zwischenräume aus und die noch festen Teilchen nähern sich einander an, sodass die Dichte des Körpers ansteigt und eine Volumenschwindung stattfindet. Es laufen komplexe metallurgische Auflösungs- und Ausscheidungsvorgänge ab, die zur Bildung von Mischkristallen führen [39]. Nach dem Abkühlen liegt ein Gefüge bzw. eine Mikrostruktur vor, in der die harten Wolframcarbid-Teilchen in einer im Vergleich dazu relativ weichen Kobaltmatrix eingebettet sind. Das Produkt hat seine endgültige Dichte und Härte erreicht. Dabei können die Carbide Härten erreichen, die im Bereich von Diamant liegen [40].

Die Härte als Maß für den Widerstand gegen Eindringen und Abnutzung ist in einem Hartmetall hauptsächlich durch das Carbid gegeben, während die Zähigkeit als

Fähigkeit, Energie durch Deformation aufzunehmen, ohne Risse aufzuweisen, hauptsächlich durch das Bindemetall gegeben ist [41]. Je höher der Kobaltgehalt ist, desto geringer ist die Härte. Bei gleichbleibendem Anteil an Bindemetall führen feinere Carbide zu höherer Härte und gröbere zu geringerer Härte. Daher kann Hartmetall nach der Größe der Carbidkörner klassifiziert werden, siehe Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Klassifizierung von WC-Co-Hartmetallen nach der Korngröße (nach einem Vorschlag des Arbeitskreises Hartmetall im Fachverband Pulvermetallurgie, 1999) [21] sowie die Einsatzbereiche

WC-Korngröße [µm]	Dt. Bezeichnung	Engl. Bezeichnung	Hauptsächlicher Einsatzbereich [28]
< 0,2	Nano	Nano	(keine genannt)
0,2–0,5	Ultrafein	Ultrafine	Ziehwerkzeuge, Compositstoffbearbeitung
0,5–0,8	Feinst	Submicron	Ziehwerkzeuge, Compositstoffbearbeitung, Metallbearbeitung
0,8–1,3	Fein	Fine	Holzbearbeitung, Metallbearbeitung
1,3–2,5	Mittel	Medium	Mauer- und Steinbearbeitung, Metallbearbeitung, Kaltformwerkzeuge
2,5–6,0	Grob	Coarse	Bergbau, Tiefbau, Walzen und Warmwalzen
> 6,0	Extragrob	Extracoarse	Bergbau

6. Endbearbeitung

Besitzt das Produkt nach dem Sintern noch nicht die gewünschte Geometrie oder die geforderten Toleranzen, erfolgt eine Endbearbeitung. Die Möglichkeit der endformnahen Herstellung erlaubt die Minimierung des Nachbearbeitungsaufwands. Dies bedeutet jedoch, dass für jede herzustellende Form eine entsprechende Pressform existieren muss. Da die Pressfähigkeit von der Zusammensetzung und damit von der Hartmetallsorte abhängt, sind Presswerkzeuge nicht sortenübergreifend verwendbar und der Prozess ist somit relativ unflexibel [36].

Die Bearbeitung von fertig gesintertem Hartmetall stellt eine Herausforderung dar, da ein Werkzeug grundsätzlich härter sein muss als der zu bearbeitende Werkstoff, eine ausreichende Zähigkeit besitzen und diese Eigenschaften auch bei den auftretenden Prozesstemperaturen beibehalten muss [42]. Schleifen wird besonders bei schwierigen Arbeitsbedingungen angewendet, wenn wegen der Härte des Werkstoffs andere Bearbeitungsverfahren wie Drehen und Fräsen versagen [43]. Die Bearbeitung der Hartmetalloberfläche erfolgt hauptsächlich durch Schleifen, Honen, Läppen oder Polieren. Diesen Verfahren sind jedoch prozessbedingt Grenzen gesetzt in Bezug auf komplexe Geometrien. Eine weitere Möglichkeit ist die Laserbearbeitung, mit der eine Strukturierung der Oberfläche durchführbar ist, wobei jedoch Einschränkungen in der Formgebungsfreiheit bestehen [36]. Nachteilig ist zudem die lange Bearbeitungszeit im Vergleich zur Funkenerosion [44]. Die Funkenerosion ist momentan daher wohl das am weitesten verbreitete Verfahren zur Bearbeitung und Strukturierung von Hartmetall zur Erreichung komplexer Geometrien. Nachteilig bei diesem Verfahren ist der Verschleiß der Werkzeugelektroden, der es notwendig macht regelmäßig neue Elektroden zu verwenden.

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Hartmetalle der Firma *Saar-Hartmetall und Werkzeuge GmbH* verwendet, die für verschiedene Aufgaben konzipiert sind. Es werden eine zähere Sorte (VG627) und eine härtere Sorte (VGH2) gewählt, um das

unterschiedliche Materialverhalten bei der Funkenerosion darzustellen. In Tabelle 2.3 sind die Herstellerangaben der Sorten aufgeführt.

Tabelle 2.3: Eigenschaften der verwendeten Hartmetallsorten

	Einheit	VG627	VGH2
Dichte @ 20°C	[g/cm ³]	12,70	14,48
Härte	[HV30]	730	1600
WC-Gehalt	[Gew. %]	70,0	89,7
Co-Gehalt	[Gew. %]	30,0	9,5
elektr. Leitfähigkeit @ 20°C	[10 ⁻³ ·S/m]	5–6	4,33
therm. Ausdehnungskoeffizient @ 20°C	[10 ⁻⁶ ·1/K]	6,90	5,96
therm. Leitfähigkeit @ 20°C	[W/(m·K)]	95,0	90,0
Korngröße	[µm]	> 5	0,5–0,9
Klasse		grob	feinst/fein
Einsatzgebiet		Walz- und Ziehringe	Werkzeuge

2.1.3 Stahl

Als Stähle werden nach der Norm Eisenlegierungen bezeichnet, die weniger als 2 % Kohlenstoff enthalten und für eine Warmumformung geeignet sind [13]. Durch das Zulegieren verschiedener Elemente lassen sich Werkstoffeigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit und Zerspanbarkeit in vielfältiger Weise beeinflussen. Stähle, die zur Wärmebehandlung vorgesehen sind und eine besondere Reinheit besitzen, werden nach DIN EN 10020 als Edelstähle bezeichnet [12, 13].

1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) ist ein austenitischer Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl mit Titanstabilisierung. Da er eine gute Korrosionsbeständigkeit zeigt, findet er vor allem im Bereich des chemischen Apparatebaus Anwendung [45] und wird in dieser Arbeit als Kathodenwerkstoff bei der elektrochemischen Bearbeitung verwendet. Die weit verbreiteten Edelstähle 1.4301 (X5CrNi18-10) als nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Stahl und 1.7131 (16MnCr5) als zur Härtung vorgesehener Mangan-Chrom-Stahl werden für Demonstrationsversuche bei der funkenerosiven Bearbeitung verwendet. In Tabelle 2.4 sind einige Eigenschaften und die Zusammensetzungen aufgezeigt.

Tabelle 2.4: Eigenschaften der verwendeten Stahlsorten

	Einheit	1.4571 [46]	1.4301 [47]	1.7131 [48]
Dichte @ 20°C	[g/cm ³]	7,98	7,90	7,76
elektr. Leitfähigkeit @ 20°C	[MS/m]	1,33	1,37	8,33
therm. Leitfähigkeit @ 20°C	[W/m·K]	15	15	44
C-Gehalt	[Gew. %]	≤ 0,08	≤ 0,07	0,14–0,19
Cr-Gehalt	[Gew. %]	16,50–18,50	17,5–19,50	0,80–1,10
Mn-Gehalt	[Gew. %]	≤ 2,00	--	1,00–1,30
Ni-Gehalt	[Gew. %]	10,50–13,50	8,00–10,50	
Mo-Gehalt	[Gew. %]	2,00–2,50	--	
Ti-Gehalt	[Gew. %]	≥ 5·C (max. 0,70)	--	
Si-Gehalt	[Gew. %]			≤ 0,40
S-Gehalt	[Gew. %]			0,035

2.2 Verfahren

Die in dieser Arbeit verwendeten Verfahren *Pulse ElectroChemical Machining* (PECM) und *Electrical Discharge Machining* (EDM) zählen nach der Einteilung der Fertigungsverfahren in DIN 8580 zu den abtragenden Verfahren, siehe Abbildung 2.3. Diese Verfahren zeichnen sich durch das Abtrennen von Stoffteilchen von einem festen Körper auf nichtmechanischem Wege aus, wobei sich das Abtragen sowohl auf das Entfernen von Werkstoff-Schichten als auch auf das Abtrennen von Werkstückteilen bezieht [49]. Beide Verfahren bilden das Abbild einer Werkzeugelektrode auf ein Werkstück ab, sodass die gewünschte Form im Vorfeld unter Beachtung der auftretenden Spaltweiten als Negativ auf die Werkzeugelektrode aufgebracht werden muss. Großer Vorteil beider Verfahren ist, dass mit gewissen Einschränkungen auf diese Weise auch kompliziert zu erzeugende Geometrien, etwa kubische Einsenkungen, herstellbar sind. Aufgrund der Prozesscharakteristik hat zudem die Werkstückhärte keinen Einfluss auf den Prozess.

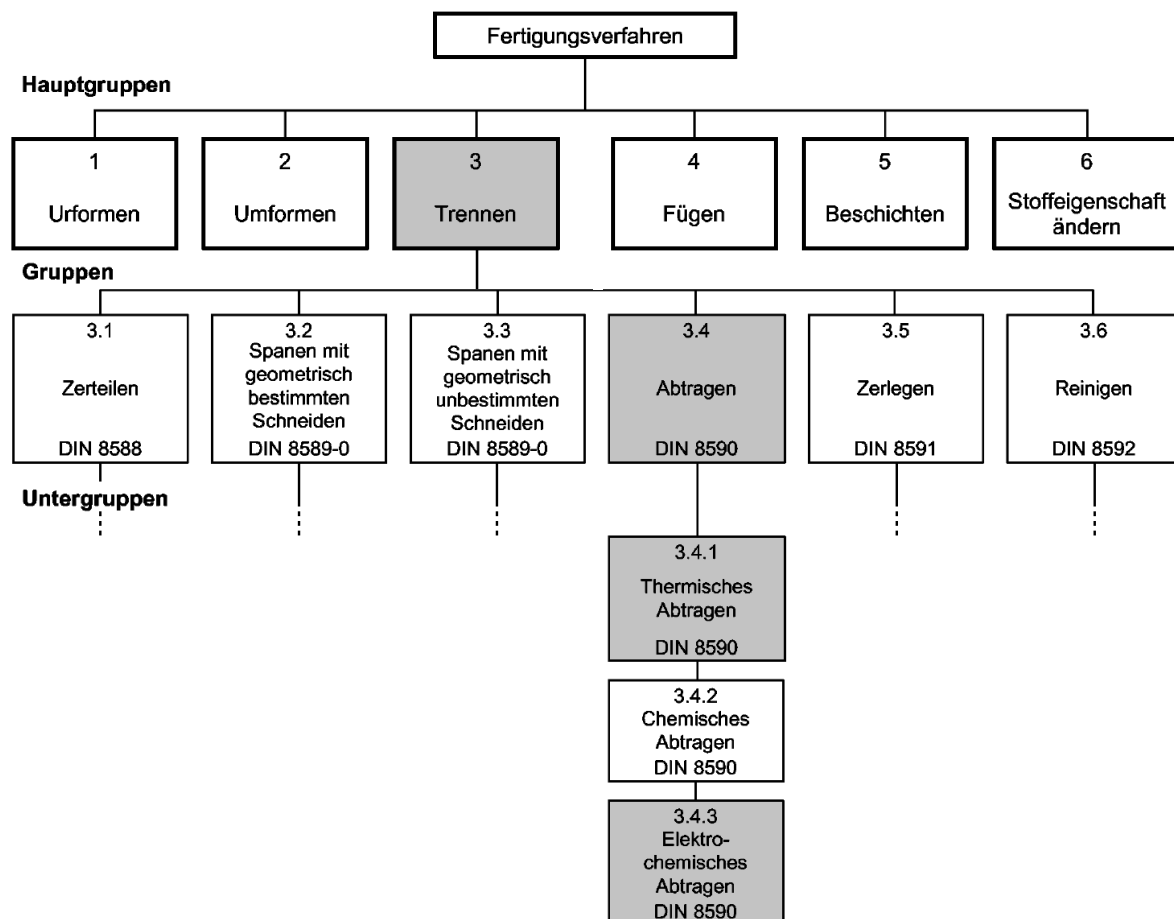


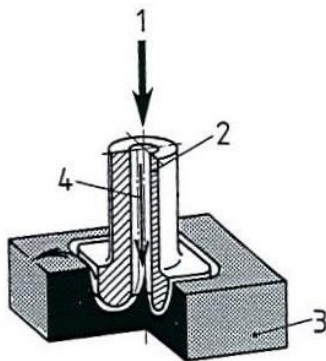
Abbildung 2.3: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [50]

2.2.1 Elektrochemische Bearbeitung (PECM)

Die elektrochemische Bearbeitung ist ein abbildendes elektrochemisches Abtragen unter Verwendung einer äußeren Stromquelle bei hoher Wirkstromdichte, hervorgerufen durch kleinen Abstand der formgebenden Werkzeugelektrode vom Werkstück und hohe Strömungsgeschwindigkeit der Elektrolytlösung [49]. Dabei wird das der Elektrolyse zugrunde liegende Prinzip der Auflösung einer als Anode geschalteten Elektrode verwendet. Der Prozess arbeitet unabhängig von den mechanischen Eigenschaften des zu bearbeitenden Materials, dagegen spielen die chemischen Bestandteile und das Bindungsverhalten eine wichtige Rolle. Grundsätzlich lässt sich die elektrochemische Bearbeitung mit externer Stromquelle – gelegentlich auch als Elysieren bezeichnet – in zwei Bereiche aufteilen, nämlich das elektrochemische Senken zur Erzeugung von Einsenkungen und Strukturen auf Bauteilen sowie das elektrochemische Formentgraten zum Entfernen von Graten und zum Verrunden von Kanten, siehe Abbildung 2.4. Daneben findet sich das elektrochemische Ätzen, welches auf der Wirkung von Lokalelementen beruht. Die Richtlinie VDI3401 [51] führt darüber hinaus EC-Konturbearbeitung, EC-Drehen, EC-Schleifen und weitere Bereiche an.

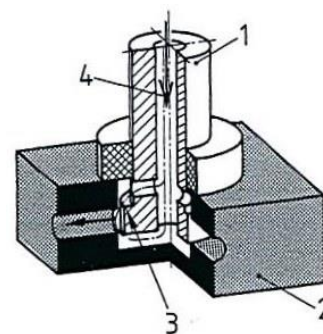
An dieser Stelle muss zwischen dem klassischen elektrochemischen Bearbeiten mit konstantem Strom sowie Vorschub (ECM) und dem seit ca. 15 Jahren entwickelten gepulsten elektrochemischen Bearbeiten mit gepulstem Strom und einem schwingungsüberlagerten Vorschub (PECM) unterschieden werden. Die prinzipiellen Auflösungsvorgänge können für PECM weiterhin mithilfe der Grundlagen beschrieben werden, jedoch führt die Vibration der Werkzeugelektrode in erster Linie zu anderen Spaltweiten und Strömungsvorgängen. Im Folgenden wird in dieser Arbeit unter dem Begriff der elektrochemischen Bearbeitung bzw. Elysieren nur noch das Verfahren gepulstes elektrochemisches Senken verstanden. Die nachfolgende Verfahrensbeschreibung beschränkt sich entsprechend auf dieses Verfahren.

Elektrochemisches Senken



1. Vorschub
2. Werkzeugelektrode (Kathode)
3. Werkstück (Anode)
4. Strömung der Elektrolyt-Lösung

Elektrochemisches Formentgraten



1. Werkzeugelektrode (Kathode)
2. Werkstück (Anode)
3. Grat
4. Strömung der Elektrolyt-Lösung

Abbildung 2.4: Elektrochemisches Senken und Formentgraten nach DIN 8590 [49]

Das Verfahren

Die Idee zur Verwendung von gepulstem Strom wurde bereits 1980 von Datta und Landolt beschrieben [52]. Ihr Ziel war es, die bei der Verwendung von konstantem Strom entstehenden Temperaturen durch Pulsen geringer zu halten, um mit geringerem Elektrolytfluss arbeiten zu können. Damit ergab sich die Möglichkeit eine bessere Präzision bei jedoch entsprechend längerer Bearbeitungszeit zu erreichen.

Das PECM als Weiterentwicklung verwendet zusätzlich eine Oszillationsbewegung der Elektrode während des Vorschubs, wodurch der Prozess elektrisch und mechanisch gepulst wird. Dies bewirkt ein Vergrößern und Verkleinern des Arbeitspals. Der elektrische Puls und damit die Bearbeitung wird nur rund um den unteren Totpunkt der Oszillation ausgelöst, siehe Abbildung 2.5. Der Elektrolytaustausch erfolgt aufgrund hydrodynamischer Bedingungen hauptsächlich im geöffneten Spalt. Die Frequenz der Oszillation ist einstellbar und wird bei der verwendeten Anlage über eine Exzentrerscheibe erzeugt, die Amplitude beträgt dabei $\Delta s = 186,5 \mu\text{m}$. Andere Konstruktionen arbeiten beispielsweise elektromagnetisch [53]. Ein typischer Wert für die Vibration beträgt $f = 50 \text{ Hz}$. Das Verfahren findet verbreitete Anwendung beim Polieren von Metalloberflächen, beim Entgraten und beim Senkbearbeiten von Metallteilen z. B. im Automobilbau, der Medizintechnik, der Luft- und Raumfahrt, der Münzprägetechnik, im Werkzeugbau sowie bei der Herstellung von Konsumgütern [4, 54, 55, 56, 57]. Vorteil ist, dass es nahezu verschleißfrei arbeitet, da das Werkstück anodisch aufgelöst wird. Dies bedeutet, dass mit einer einmalig anzufertigenden Werkzeugelektrode sehr viele Werkstücke strukturiert werden können. Zudem wird das Werkstück nicht über Kräfte oder thermisch beansprucht.

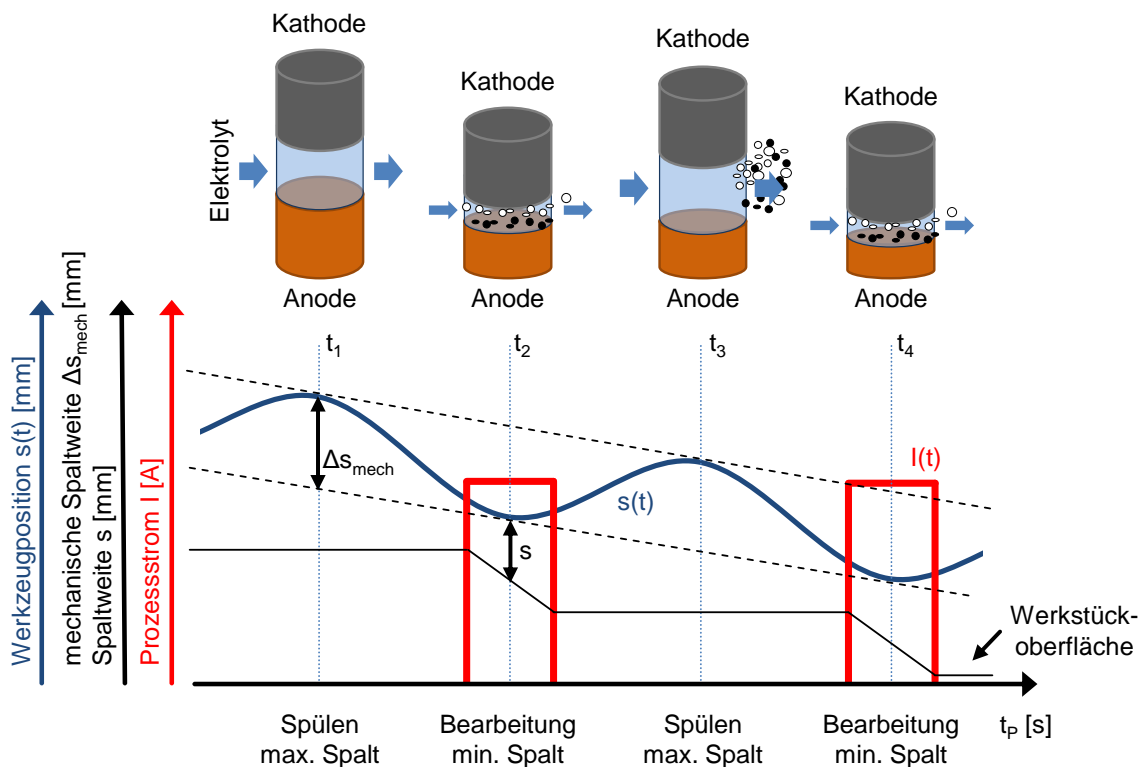


Abbildung 2.5: Ablauf des PECM, ähnlich [58]

Die Verbindung von Oszillation (Vibration) der Werkzeugelektrode und dem Auslösen des Bearbeitungspulses im unteren Totpunkt erlaubt sehr kleine Spaltweiten (bis zu 10 μm). Diese kleineren Spaltweiten führen zu einer präziseren Formgebung im Vergleich zum herkömmlichen elektrochemischen Abtragen [59, 60, 61]. Die Amplitude der Vibration hat dabei einen großen Einfluss auf die Präzision des Prozesses [53]. Zwischen Werkstück und Werkzeug bildet sich prozessbedingt ein Arbeitsspalt aus, durch den die Elektrolytlösung mit hoher Geschwindigkeit strömt und dabei die im Arbeitsspalt entstehenden Abtragsprodukte sowie die durch den Stromfluss entstehende Joulesche Wärme abführt [62]. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass bei PECM im Vergleich zu ECM mit geringerem Elektrolytdruck gearbeitet wird, was die Absicherung gegenüber Leckagen vereinfacht: PECM ≤ 10 bar [63] gegenüber ECM > 20 bar [64].

Das der Auflösung zugrunde liegende Wirkprinzip ist die Elektrolyse [62, 65, 66]. Werden zwei Elektroden unter Anlegen einer Gleichspannung, die größer sein muss als der auftretende Spannungsabfall, bestimmt durch die Position der Elemente in der elektrochemischen Spannungsreihe, in ein leitfähiges Medium, den Elektrolyten, getaucht, fließt ein Strom. Diese über das Normalpotential hinaus benötigte Spannung heißt Überspannung. In der Folge wird in Form einer Redox-Reaktion das anodisch gepolte Material unter Abgabe von Elektronen oxidiert und das kathodisch gepolte Material unter Aufnahme von Elektronen reduziert. Der Ladungstransport innerhalb der Elektroden erfolgt über Elektronen, wohingegen er innerhalb der Elektrolytlösung über Ionenaustausch erfolgt [65]. Die Elektrolytströmung und die je nach Elektrolytart mögliche Bildung von nicht-löslichen Hydroxiden im elektrochemischen Prozess sorgen dafür, dass sich der abgelöste Werkstoff nicht an der Kathode absetzt sondern ausfällt. Diese Hydroxidschlämme müssen mit Filtern oder Zentrifugen aus dem Elektrolyten abgeschieden werden, bevor dieser erneut dem Bearbeitungsspalt zugeführt wird [62, 64, 67].

Abbildung 2.6 verdeutlicht links die chemischen Vorgänge am Beispiel der Bearbeitung im Frontalspalt bei Verwendung von Natriumnitrat als Elektrolyt und rechts den Abfall der Prozessspannung U_{gap} über die Elektroden und den Elektrolyten, wobei die Spannungsabfälle innerhalb der Elektroden als vernachlässigbar klein angesehen werden können. Der Materialabtrag ist abhängig von der Stärke des elektrischen Stroms, der über den Leitwert des Elektrolyten mit der Spaltweite und der bearbeiteten Fläche in Zusammenhang steht. Die Auflösung des Materials erfolgt bevorzugt dort, wo die Stromdichte am höchsten ist. Daneben können auch abtragsunwirksame Reaktionen wie die stromdichteabhängige Sauerstoffentwicklung an der Anode ablaufen. Diese bestimmen das Passivitätsverhalten des Materials [62]. Die entstehenden Protonen können zudem lokal den pH-Wert des Elektrolyten und damit das Prozessergebnis ändern.

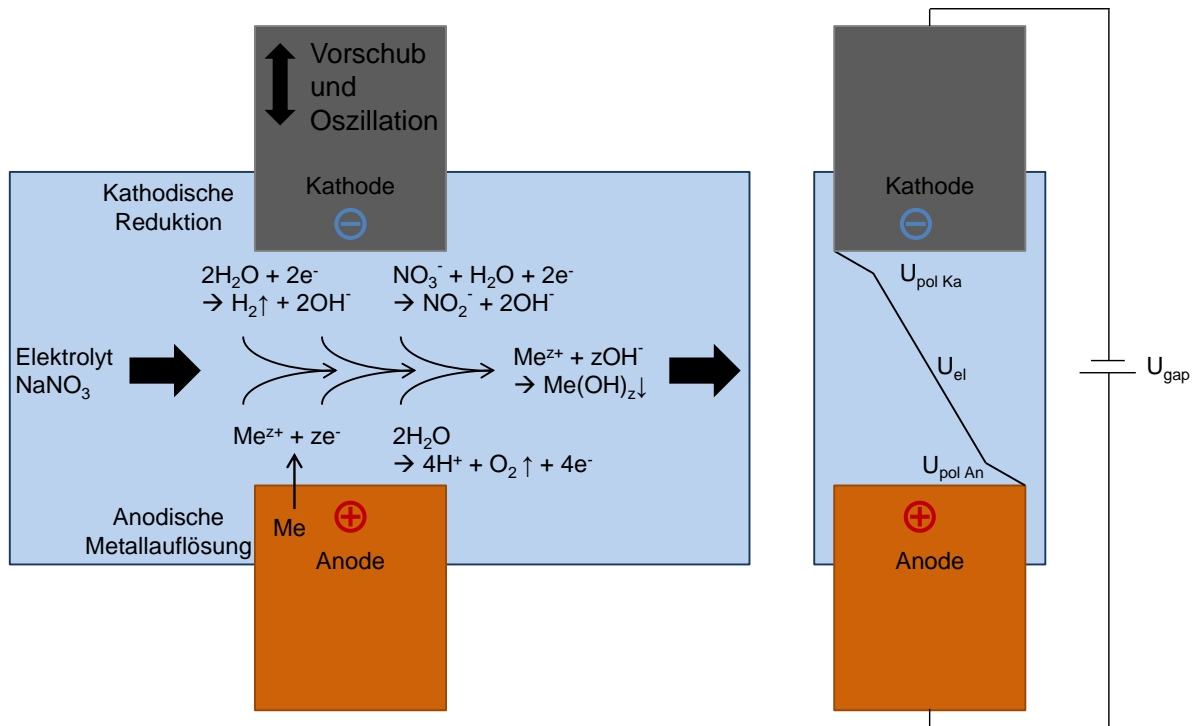


Abbildung 2.6: Prinzip der Vorgänge bei der elektrochemischen Bearbeitung

Quantitative Beschreibung der Vorgänge

Die quantitativen Zusammenhänge zwischen Stromfluss und Stoffabscheidung bzw. Massenabtrag werden als Faraday'sche Gesetze bezeichnet [14] und folgen diesen Zusammenhängen:

$$m_{\text{theo}} = \frac{M}{z \cdot F} \cdot I \cdot t_B$$

m_{theo} : theoretischer Massenabtrag [g]
 M : molare Masse [g/mol]
 z : Wertigkeitsänderung
 F : Faraday'sche Konstante ($F = 96485,3365$ [As/mol])
 I : Prozessstrom [A]
 t_B : Bearbeitungszeit [s]

(1)

Unter Beachtung von Pulslänge und Frequenz der gepulsten Bearbeitung ergibt sich:

$$t_B = t_P \cdot \frac{t_{\text{on}}}{1000} \cdot f$$

t_P : Prozesszeit [s]
 t_{on} : Impulszeit [ms]
 f : Vibratorfrequenz [Hz]

(2)

Durch Einsetzen der Werkstoffdichte ergibt sich das abgetragene Materialvolumen:

$$V_{\text{theo}} = \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot I \cdot t_B$$

V_{theo} : theoretischer Volumenabtrag [g]
 ρ : Werkstoffdichte [g/mm³]

(3)

Bei Bearbeitung einer Legierung mit n Elementen ($i = 1..n$) ergibt sich entsprechend:

$$V_{\text{theo}} = \left(\frac{1}{100 \cdot \rho_{\text{leg}} \cdot F} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{p_i \cdot M_i}{z_i} \right) \cdot I \cdot t_B$$

ρ_{leg} : Dichte der Legierung [g/mm³]
 p_i : Massenprozentanteil [%]
 M_i : Molmasse des Elementes [g/mol]
 z_i : Wertigkeitsänderung des Elementes

(4)

Der Klammerausdruck wird als spezifisches Abtragsvolumen V_{sp} bezeichnet. Die Wertigkeitsänderung z kann jedoch eine Abhängigkeit von der Stromdichte

aufweisen, das heißt Elemente können mit verschiedenen Wertigkeiten in Lösung gehen, weshalb dieser Faktor während der Bearbeitung nicht unbedingt konstant bleibt.

Die Berücksichtigung der abtragsunwirksamen Reaktionen erfolgt über den sogenannten Wirkungsgrad bzw. die Stromausbeute η . Diese ist stromdichteabhängig und ergibt sich durch den Quotienten aus dem experimentell ermittelten und dem theoretischen Volumenabtrag bzw. Massenabtrag:

$$\eta = \frac{V_{\text{prak}}}{V_{\text{theo}}} = \frac{m_{\text{prak}}}{m_{\text{theo}}} \quad \begin{array}{l} V_{\text{prak}}: \text{praktischer Volumenabtrag [mm}^3\text{]} \\ m_{\text{prak}}: \text{praktischer Massenabtrag [g]} \end{array} \quad (5)$$

Der praktische Massenabtrag kann in Experimenten mittels einer Präzisionswaage ermittelt oder (etwas aufwändiger) über die gemessene geometrische Änderung mit der Dichte des Materials berechnet werden.

Die angelegte Spannung U_{gap} fällt jeweils zum Teil an der Kathode ($U_{\text{pol Ka}}$), dem Elektrolyten (U_{el}) und der Anode ($U_{\text{pol An}}$) ab, siehe Abbildung 2.6. Die sich durch Ausrichtung der Ladungsträger an der Phasengrenze zwischen Metall und Elektrolyt ausbildende elektrische Doppelschicht bedingt ein Potentialgefälle, das beim Durchtritt der Metallionen aus dem Metall in die Elektrolytlösung überwunden werden muss [68]. Dieser Spannungsabfall wird Polarisationsspannung oder Überspannung genannt und kann je nach Spaltweite beträchtliche Werte im Vergleich zur angelegten Spannung annehmen. Er ist abhängig von der Stromdichte und dem zu bearbeitenden Werkstoff [54] und lässt sich mithilfe des zweiten Kirchhoff'schen Gesetzes berechnen:

$$U_{\text{gap}} = U_{\text{pol Ka}} + U_{\text{el}} + U_{\text{pol An}} \quad \begin{array}{l} U_{\text{gap}}: \text{Prozessspannung [V]} \\ U_{\text{pol Ka}}: \text{Spannungsabfall an der Kathode [V]} \end{array} \quad (6)$$

$$U_{\text{gap}} = U_{\text{el}} + U_{\text{pol}} \quad \begin{array}{l} U_{\text{pol An}}: \text{Spannungsabfall an der Anode [V]} \\ U_{\text{el}}: \text{Spannungsabfall über den Elektrolyten [V]} \\ U_{\text{pol}}: \text{Polarisationsspannung [V]} (U_{\text{pol}} = U_{\text{pol Ka}} + U_{\text{pol An}}) \end{array} \quad (7)$$

Die Polarisationsspannung setzt sich also aus einem kathodischen und einem anodischen Teil zusammen. Nach der Definition der elektrischen Spannung

$$U_{\text{el}} = \int_a^b \vec{E} \, ds = E \cdot s \quad \begin{array}{l} E: \text{elektrische Feldstärke [V/mm]} \\ s: \text{Spaltweite [mm]} \end{array} \quad (8)$$

und dem Ohm'schen Gesetz in lokaler Schreibweise und unter Vernachlässigung der Tensoren ergibt sich die Stromdichte zu:

$$J = \sigma \cdot E \quad \begin{array}{l} J: \text{Stromdichte [A/mm}^2\text{]} \\ \sigma: \text{Leitfähigkeit [S/mm]} \end{array} \quad (9)$$

$$(7) + (8) + (9) \rightarrow (10):$$

$$J = \frac{(U_{\text{gap}} - U_{\text{pol}}) \cdot \sigma}{s} \quad (10)$$

Nach (10) sollte mit steigendem Potential daher auch die Stromdichte steigen. Dies ist in Realität nicht durchgängig der Fall, da sich potentialabhängig Deckschichten

auf der Elektrodenoberfläche ausbilden können, welche die anodische Metallauflösung mehr oder weniger stark behindern [69, 70]. Die Ausbildung solcher Deckschichten, auch Passivschichten genannt, wird von der Art des Elektrolyten und den vorliegenden Elektrolysebedingungen sowie vom Anodenwerkstoff selbst beeinflusst [62]. Dieser Zusammenhang kann messtechnisch über die Aufnahme einer Stromdichte-Potential-Kennlinie erfasst werden. Abbildung 2.7 zeigt einen schematischen Vergleich von rein aktivem und passivierendem Verhalten mit den verschiedenen Bereichen in Anlehnung an [62, 68, 71], die nur den passivierenden Teil darstellen, sowie [72], der auch rein aktives Verhalten berücksichtigt.

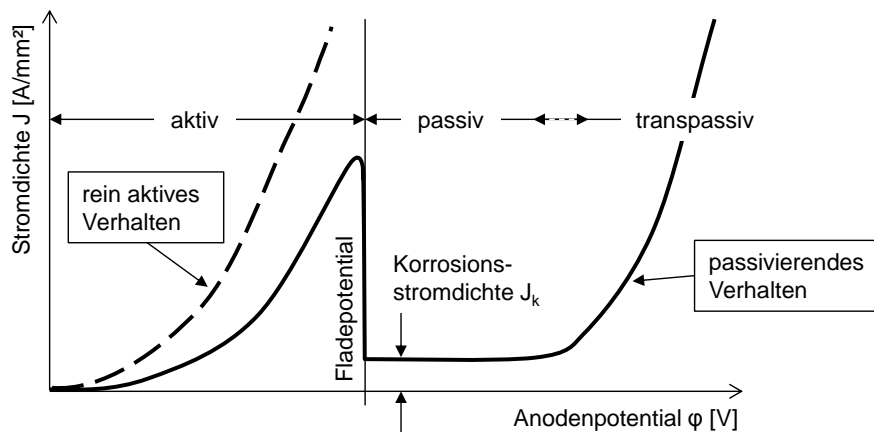


Abbildung 2.7: Schematischer Stromdichte-Spannungsverlauf

Aktiver Bereich:

Bei kleiner Überspannung steigt die Stromdichte mit zunehmendem Anodenpotential bis zum Erreichen einer Potentialschwelle an. Nach ihrem Entdecker wird diese Potentialschwelle Fladepotential genannt. An dieser Schwelle bildet sich eine Oxidschicht, sodass der Stromfluss gehemmt wird und die Stromdichte auf den Wert der Korrosionsstromdichte abfällt [62, 71]. Ein Grund dafür ist, dass sich mehr Metall löst als über Diffusionsvorgänge abtransportiert wird, dadurch überschreitet die Konzentration der Produkte das Löslichkeitsprodukt und es bildet sich eine passive Schicht [73].

Passiver Bereich:

Dieser wird vornehmlich durch die Struktur, die Porosität und die Leitfähigkeit der Deckschicht für die Ladungsträger sowie die chemische Löslichkeit der Oxide beeinflusst [62]. Er ist vom Potential praktisch unabhängig, da diese Auflösung ein chemischer Vorgang ist [71].

Transpassiver Bereich:

Im Anschluss daran steigt die Stromdichte wieder an und die Auflösung findet trotz einer Deckschicht auf der Oberfläche statt. Im transpassiven Bereich wird die Bildung von gasförmigem Sauerstoff energetisch durch Entladung von OH-Ionen möglich, wenn eine elektronenleitende Deckschicht vorhanden ist. Die Passivschicht wird

örtlich aufgelöst, gekennzeichnet durch einen Lochfraßmechanismus an der Deckschicht [71].

Elektrolyte

Die Wahl des Elektrolyten beeinflusst maßgeblich das Prozessresultat im Hinblick auf die generelle Bearbeitbarkeit, die Bearbeitungsgeschwindigkeit und die Abbildegengenauigkeit. Die Polarisationsspannung wird ebenfalls durch den Elektrolyten beeinflusst [55]. In der Literatur wird häufig eine Einteilung der Elektrolyte in passivierende und nicht-passivierende Elektrolyte vorgenommen.

Gängig sind wässrige Systeme wie Lösungen von Na_2SO_4 , NaCl , NaNO_3 und NaClO_3 . Industriell relevant sind aus toxikologischen, umwelttechnischen und wirtschaftlichen Aspekten aber hauptsächlich konzentrierte wässrige Lösungen von NaNO_3 und NaCl [54, 74]. Teilweise werden Komplexbildner wie Zitronensäure zugegeben, um die Abtragsprodukte in Lösung zu halten [71], andere Zugaben sind auch Rostschutzmittel. Die Unterscheidung in passivierende und nicht-passivierende Elektrolyte ist aber nur für Eisen und Nickel gültig, da andere Metalle wie Kupfer, Aluminium und Titan qualitativ dasselbe Polarisationsverhalten in beiden Elektrolyttypen zeigen [71].

Bei der Verwendung von Natriumchloridlösungen kommt es zu einer Anlagerung der Chlorionen auf der Metalloberfläche, sodass die Metallionen direkt mit den Chlorionen reagieren können. Damit lassen sich die meisten Stähle mit geringerer Stromdichte und nahezu 100%iger Stromausbeute bearbeiten. Dagegen erfolgt die Metallauflösung bei Verwendung von Natriumnitratlösungen bei geringeren Stromausbeuten, da ladungsverbrauchende Nebenreaktionen stattfinden. Jedoch lassen sich damit höhere Fertigungsgenauigkeiten bei Raumformen erzielen [66, 67]. Die auf der Werkstückoberfläche entstehende Schicht ist im Fall von NaCl lockerer mit dem Grundmaterial verbunden als bei Verwendung von NaNO_3 [55]. Abbildung 2.8 verdeutlicht beide Verhalten nochmals schematisch. Dass dieses passivierende Verhalten bei Verwendung von NaNO_3 auf Kupfer nicht zutrifft, wird in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt.

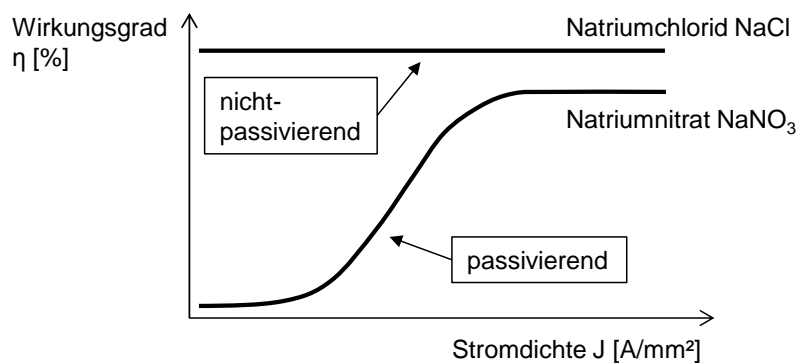


Abbildung 2.8: Unterschied zwischen passivierenden und nicht-passivierenden Elektrolyten, nach [54]

Um konstante Bearbeitungsbedingungen zu schaffen, muss die Elektrolytversorgung in der Lage sein, die wichtigsten Elektrolytparameter zu messen und konstant zu halten, was sowohl die Elektrolyttemperatur als auch den pH-Wert sowie das Filtern und Entgiften (Cr_6 und Nitrit) betrifft [64]. Die automatische Regelung dieser Faktoren in industriell verwendeten Maschinen lässt einen einfachen Austausch des Elektrolyten daher in der Regel nicht zu, da sich beispielsweise eine Temperaturänderung oder die Zugabe von Salz sowie von Säure bzw. Base in verschiedenen Elektrolyten unterschiedlich auswirken kann. Bei Austausch des Elektrolyten muss demnach die Aufbereitung entsprechend angepasst werden.

Spaltentwicklung

Die elektrochemische Senkbearbeitung ist ein selbstregulierender Prozess, das heißt er schwingt sich auf eine parameterspezifische Gleichgewichtsspaltweite ein, bei der sich im Frontalspalt pro Zeiteinheit genauso viel Material auflöst, wie die Maschine die Kathode vorschiebt. Der Materialvorschub ist dann gleich der Vorschubgeschwindigkeit der Maschine. Wird der zum Prozessstart zu wählende Anfangsspalt zu klein gegenüber diesem Gleichgewichtsspalt gewählt, fließt ein höherer Strom, der zu einem vermehrten Abtrag führt und den Spalt mit der Zeit aufweitet. Der Vorschub der Maschine ist also kleiner als der Vorschub der Materialauflösung. Umgekehrt führt ein zu groß gewählter Anfangsspalt zu einem geringeren Strom, sodass der Vorschub der Maschine größer ist als der der Materialauflösung und der Spalt sich solange verkleinert, bis der Gleichgewichtsspalt erreicht ist. Übersteigt der Maschinenvorschub den möglichen Materialvorschub erfolgt ein Kurzschluss, der Werkzeug und Werkstück beschädigen kann.

Das aufgelöste Materialvolumen kann somit über den Materialvorschub definiert werden:

$$V_{\text{prak}} = v_a \cdot A \cdot t_B \quad \begin{array}{l} v_a: \text{Materialauflösegeschwindigkeit [mm/min]} \\ A: \text{Elektrodenfläche [mm}^2\text{]} \end{array} \quad (11)$$

Gleichsetzen mit Gleichung (3) für den Fall der Bearbeitung im Gleichgewichtsspalt ($v_a = v_f$) führt zu:

$$v_f = \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot J \quad v_f: \text{Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]} \quad (12)$$

Aus den Gleichungen (10) und (12) geht hervor, dass für jede Parameterkombination eine bestimmte Spaltweite entsteht, die auch über die Materialeigenschaften bestimmt wird.

Anders liegt der Sachverhalt für den Seitenspalt. Dieser entwickelt sich über die Zeit. Dabei ergibt sich im Fall einer nicht isolierten Kathode und senkrechter Bearbeitung ein charakteristischer wurzelförmiger Verlauf. Der wachsende Seitenspalt führt zu einem Absinken der Stromdichte und im Fall von NaNO_3 , vgl. Abbildung 2.8, zu einem sinkenden Wirkungsgrad. Es wird also immer weniger Material aufgelöst, bis der Prozess nach Unterschreiten der für den Materialabtrag mindestens

erforderlichen Stromdichte zum Erliegen kommt. Damit wird klar, warum der Einsatz passivierender Elektrolyte zu einer besseren Abbildegenauigkeit führt. Die Entwicklung des Seitenspalts für nicht isolierte Elektroden entspricht der kontinuierlichen Materialauflösung in einer elektrolytischen Zelle, siehe Abbildung 2.9, und kann in Anlehnung an [65] und unter Berücksichtigung der Polarisationsspannung sowie der gepulsten Bearbeitung über folgende Berechnung abgeschätzt werden, wobei die Dicke des aufgelösten Volumenelements der Spaltaufweitung entspricht.

Einsetzen von Gleichung (10) in Gleichung (3) unter Ersetzen der Stromdichte zu $J = I/A$ und inkrementeller Betrachtung eines Volumenelements führt auf:

$$dV = A \cdot ds = V_{sp} \cdot \frac{(U_{gap} - U_{pol}) \cdot \sigma \cdot A}{s} \cdot dt \quad \begin{array}{l} dV: \text{Volumenelement [mm}^3\text{]} \\ ds: \text{Spaltelement [mm]} \\ dt: \text{Zeitelement [s]} \end{array} \quad (13)$$

Integrieren und Auflösen nach der Spaltweite s zeigt die parabolische Spaltaufweitung, wobei zu beachten ist, dass das spezifische Abtragsvolumen und die Polarisationsspannung selbst wiederum von der Stromdichte und damit vom Spalt abhängen können:

$$\int_{s_n}^s s \, ds = V_{sp} \cdot (U_{gap} - U_{pol}) \cdot \sigma \cdot \int_0^{t_B} 1 \, dt \quad S_0: \text{Anfangsspaltweite [mm]} \quad (14)$$

$$s = \sqrt{2 \cdot V_{sp} \cdot (U_{gap} - U_{pol}) \cdot \sigma \cdot t_B + s_0^2} \quad (15)$$

Dieser Zusammenhang konnte in [75] bestätigt werden. Um die Bildung des Seitenspalts bei der Fertigung tieferer Einsenkungen zu minimieren, wird mit Hinterschnitten oder Isolierungen gearbeitet. Auf diese Weise wird die Spaltweite künstlich erhöht, um den Wirkungsgrad zu senken, bzw. wird die Bearbeitungsfläche des Werkzeugs möglichst klein gehalten, siehe Abbildung 2.10. Die Verrundung im Eintrittsbereich resultiert aus der initialen Streustrahlung, sobald die Stromstärke durch das Annähern der Kathode ausreicht, um Material abzutragen. Die Spaltweiten zwischen den Elektroden sind also sowohl von den Bearbeitungsparametern als auch von der Form der Werkzeugelektrode bzw. der zu fertigenden Kontur abhängig [76].

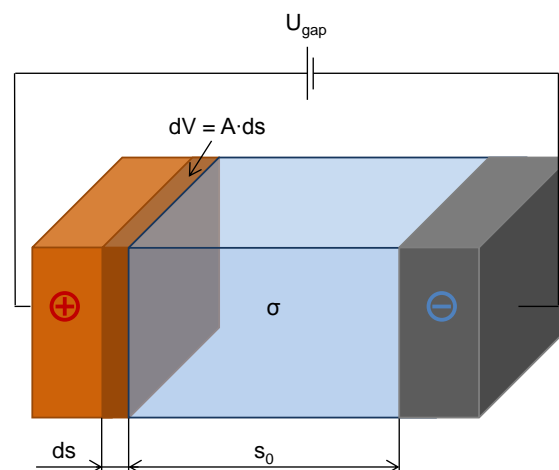


Abbildung 2.9: Spaltentwicklung in einer elektrolytischen Zelle

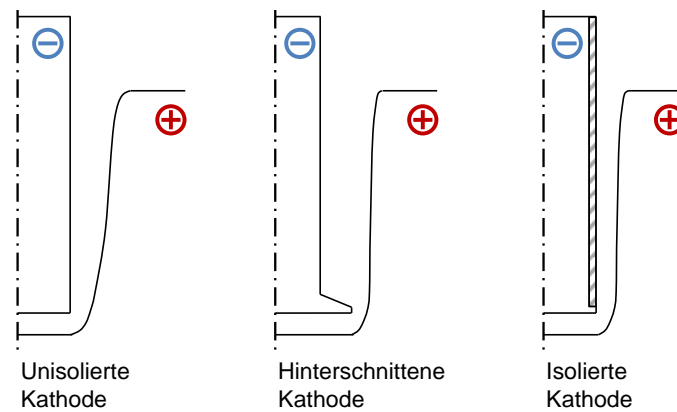


Abbildung 2.10: Schematischer Vergleich der Seitenspaltentwicklung

Oberfläche

Die entstehende Oberflächenrauheit hängt für viele Materialien vom Wirkungsgrad und damit bei passivierendem Verhalten umgekehrt proportional von der Stromdichte ab. Demnach führt eine niedrige Stromdichte zu raueren Oberflächen und eine hohe Stromdichte zu glatteren Oberflächen. Aus diesem Grund sind die Oberflächen der Seitenwände meist rauer als die über die frontale Bearbeitung entstehende.

Zum Reaktionsmechanismus und zur Ausbildung der Oberfläche existieren verschiedene Modelle.

Elektrostatistisches Modell

Die Potentialdifferenz und damit die unterschiedlichen elektrischen Feldstärken an Kanten und Graten führen bevorzugt zu deren Auflösung [77]. Diese Theorie kann nicht durchgängig angenommen werden, da die Strömungsgeschwindigkeit des Elektrolyten ebenfalls die Abtragsrate beeinflusst [78].

Bildung einer kompakten Salzschrift

Nachdem bei niedrigen Stromdichten die Sauerstoffbildung aufgrund einer Oxidschicht überwiegt, sammeln sich bei steigender Stromdichte aufgrund des begrenzten Stofftransports Kationen an der Oberfläche, wodurch es zum Ausfällen einer Salzschrift kommt, die als Ursache für die Entstehung einer glänzenden Oberfläche angenommen wird [79, 80, 81].

Bildung einer Duplexschicht aus kompakter und poröser Salzschrift

Aufbauend auf dem Modell der kompakten Salzschrift erfolgte die Erweiterung um eine poröse Deckschicht, um die Messergebnisse von Impedanzspektren erklären zu können [82], wobei dieses Modell in der Literatur nicht weiter verfolgt wird [83].

Viskoser, übersättigter Film mit limitierter Wasserdiffusion

An der Grenze von Elektrode und Elektrolyt bildet sich eine viskose, übersättigte Schicht, wobei eine kompakte oder poröse Schicht ausgeschlossen wird [84]. Der Transport der gebildeten Metallionen durch diese wasserarme Schicht ist hierbei der

geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Der unterschiedlich schnelle Abtransport der Produkte bewirkt eine Einebnung der Oberfläche [84, 85].

Zweischichtmodell

Dieses Modell geht von einer zusätzlichen Schicht aus: Ein aus Eisennitrat bestehender, hochviskoser Film, „Polierschicht“ genannt, entwickelt sich auf dem auch bei hohen Stromdichten vorhandenen Oxid [86, 87]. Die Ausbildung des Polierfilms, der die Auflösengeschwindigkeit lokal beeinflusst, sodass Rauheiten nach und nach geglättet werden, ist dabei abhängig von der Impulszeit [88].

Fazit zu den Modellen

Die Ausbildung der Oberfläche in Bezug auf Rauheit und Glanz hängt von der Materialzusammensetzung und Homogenität sowie den Elektrolytbedingungen ab. Der Vorgang basiert auf denselben Mechanismen wie das elektrochemische Polieren und zeigt Abhängigkeiten von der Strömungsgeschwindigkeit des Elektrolyten [78, 79]. Daher kann die Potentialdifferenz nicht allein für die Einebnung der Oberfläche verantwortlich sein. Das Ausfällen einer Salzschiebt ist möglich, aber aufgrund der langsamen Kristallisationsrate nicht wahrscheinlich. Die Bildung einer viskosen, nitratreichen Schicht, die den Übergang von der Oxidschicht zum Elektrolyten darstellt, scheint wahrscheinlicher [86].

Spülung der Bearbeitungsstelle

Die Spülung hat einen großen Einfluss auf die Oberflächenqualität und die Maßhaltigkeit der gefertigten Bauteile sowie auf die Stabilität des Prozesses. Eine Erhöhung des Drucks führt zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit und damit zu einer besseren Entfernung der Abtragsprodukte. Der frischere Elektrolyt bewirkt eine Erhöhung der Leitfähigkeit, gleichzeitig nimmt die Temperatur der Elektrolytlösung ab, da eine größere Wärmemenge abtransportiert werden kann [71]. Aufgrund der Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur sinkt diese wiederum mit sinkender Temperatur. Der zu überwindende elektrische Widerstand hingegen führt zu einer Erwärmung des Elektrolyten in der Bearbeitungszone. Jedoch treten während der Bearbeitung keine für den Werkstoff signifikanten Temperaturen auf. Da der Elektrolyt wasserbasiert ist, fängt er prinzipiell bei 100 °C an zu kochen. Die Druckverhältnisse im Spülspalt können diese Temperatur theoretisch etwas erhöhen. Jedoch führen die bereits vorher auftretenden Dampfblasen zu unsauberem Prozessergebnissen und sind daher zu vermeiden.

Bei der Bearbeitung kann zwischen der Spülung in einer Spülkammer und einer Freistrahlsplüfung unterschieden werden. Durch die Spülung in einer Spülkammer wird ein definierter elektrolytdurchflossener Raum gebildet, bei dem gleichförmige und reproduzierbare Spülbedingungen gewährleistet werden können. Eine Spülung durch Zuführung des Elektrolyten über eine Düse an die Wirkstelle ist möglich, führt jedoch oft zu schlechter kontrollierbaren Prozessbedingungen. Ein Gegenstand aktueller Forschung ist die Verwendung eines gelenkten, sehr lokal eingesetzten

Elektrolytstrahl zur präzisen punktuellen Auflösung. Dieses Verfahren wird Jet-ECM genannt und kann zur Oberflächenstrukturierung verwendet werden, wobei dort mit weitaus höheren Leitfähigkeiten und Spannungen gearbeitet wird als beim PECM, vgl. [89, 90, 91, 92, 93, 94].

Es ist bekannt, dass sich Materialien nicht homogen auflösen, sondern bestimmte Vorzugsrichtungen aufweisen. Nach [95] wird Stahl im transpassiven Zustand bevorzugt entlang der Korngrenzen angegriffen. Daher kann der Vorbearbeitungs-zustand des Werkstücks, beispielsweise die Walzrichtung oder Ausscheidungen an Korngrenzen aufgrund einer Wärmebehandlung einen Einfluss auf die sich ausbildende Oberfläche im elektrochemischen Prozess haben [68, 96, 97]. In [98, 99, 100] wurde am Beispiel von Gusseisen gezeigt, dass auch die Form der Grafitkörner das Abtragsverhalten entscheidend beeinflusst.

Reinigung der Kathode

Während der Bearbeitung kann die Kathode durch Ablagerungen verschmutzen. Diese oft schwarze Schicht lässt sich mechanisch durch Reiben meist nur unzureichend entfernen. Eine Reinigung mit verdünnter 5%iger Salzsäure (HCl) entfernt die Ablagerungen hingegen recht gut. Allerdings werden mit dieser Methode Chloridionen in das Elektrolytssystem eingebracht. Diese können bei nitratbasierten Systemen, wenn sie in ausreichender Menge eingebracht worden sind, das Prozessergebnis negativ beeinflussen.

Eine weitere Möglichkeit zur Reinigung der Werkzeugelektrode ist die Bearbeitung mit kathodischen Zwischenpulsen nach dem eigentlichen Bearbeitungspuls bei Verwendung niedriger Spannungen im Bereich 2–3 V und kurzen Impulszeiten, siehe Abbildung 2.11. Da das Werkzeug dann anodisch gepolt ist, werden angelagerte Verunreinigungen abgelöst. Zhou et al. vermuten eine Änderung des lokalen pH-Wertes und die Elimination des auf dem Werkzeug gebildeten Metallhydroxid-Films [101]. Dies kann zu einem genaueren Arbeitsergebnis und besseren Oberflächen führen [102]. Allerdings kann die Werkzeugelektrode je nach Material aufgrund von Abtrag bei diesem Vorgehen Schaden erleiden, was den Vorteil der verschleißfreien Bearbeitung zunichtemacht.

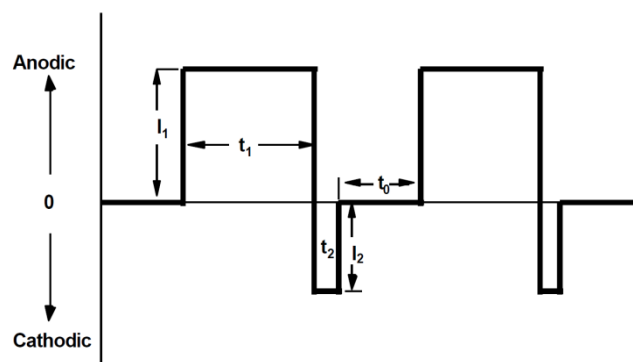


Abbildung 2.11: Schema kathodischer Zwischenpulse bei rechteckigen Pulsformen [101]

Zusammenfassung

Parameter, die den elektrochemischen Prozess beeinflussen:

- Prozessspannung U_{gap} : hauptverantwortlich für die Spaltweite und damit für die Abbildegengenauigkeit
- Stromdichte J : beeinflusst den Wirkungsgrad des Prozesses und führt zum Materialabtrag
- Vorschub v_f : bestimmt die Stromdichte J durch Beeinflussung des Spalts
- Impulszeit t_{on} und Bearbeitungsfrequenz f : bestimmen die effektive Arbeitszeit und damit den Spalt sowie die Stromdichte
- Elektrolyt: bestimmt passivierendes oder nicht-passivierendes Materialverhalten
- Leitfähigkeit σ : beeinflusst Spaltweite und Stromdichte

Der PECM-Prozess ist hoch interaktiv, die Parameter beeinflussen sich gegenseitig und sind stark vom Elektrolyten und der Materialpaarung der Elektroden abhängig. Die Zusammenhänge lassen sich mittels Faraday'schem und Ohm'schem Gesetz beschreiben.

2.2.2 Funkenerosive Bearbeitung (EDM)

Die funkenerosive Bearbeitung oder Funkenerosion wird, genauso wie das in Abschnitt 2.2.1 beschriebene Verfahren des elektrochemischen Abtrags, als unkonventionelles Verfahren bezeichnet, da der Materialabtrag hier nicht auf mechanischem Kontakt von Schneiden, wie beim Drehen, Bohren, Fräsen oder Schleifen, beruht, sondern auf thermischen bzw. chemischen Vorgängen.

Während der Funkenerosion erfolgt ein thermisches Abtragen, bei dem die an der Wirkstelle erforderliche Wärme durch elektrische Funkenentladung auf das Werkstück übertragen wird [49]. Dabei arbeitet der Prozess unabhängig von den mechanischen Eigenschaften des zu bearbeitenden Materials [62, 103]. Grundsätzlich lässt sich die Funkenerosion in zwei Varianten unterscheiden, das funkenerosive Senken zur Erzeugung von Einsenkungen und Strukturen auf Bauteilen sowie das funkenerosive Schneiden mit ablaufender Drahtelektrode zum Abtrennen von Teilen oder ganzer Bauteile aus einem größeren Bauteilverbund, siehe Abbildung 2.12. Die Richtlinie VDI3400 führt darüber hinaus das funkenerosive Schleifen als weiteres Verfahren auf, welches eine Bewegung mit nachgeführter Elektrode umfasst, wobei das Werkstück und/oder die Werkzeugelektrode eine drehende Hauptbewegung um die eigene Achse ausführt [104]. Im Folgenden wird in dieser Arbeit unter dem Begriff Funkenerosion bzw. Senkerosion nur noch das Verfahren funkenerosives Senken nach DIN 8590 verstanden. Die nachfolgende Verfahrensbeschreibung beschränkt sich daher auf dieses Verfahren.

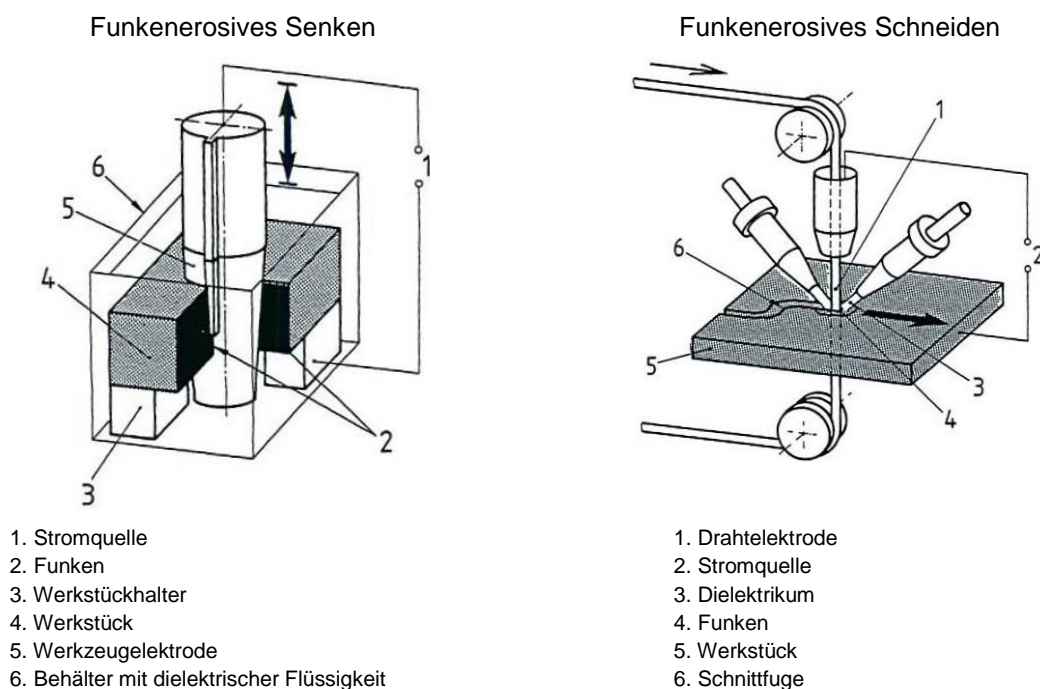


Abbildung 2.12: Funkenerosives Senken und funkenerosives Schneiden nach DIN 8590 [49]

Das Verfahren

Die Funkenerosion basiert auf dem physikalischen Phänomen eines Materialabtrags als Folge elektrischer Entladungen zwischen zwei elektrisch leitenden Werkstoffen [62, 103], wobei die genauen physikalischen Phänomene zur Zündung der Funken immer noch nicht geklärt sind [62, 105, 106]. Es wird eine Mindestleitfähigkeit der Materialien von $\sigma \approx 10^{-3}$ S/mm benötigt bzw. vorausgesetzt [107]. Die Bearbeitung der Werkstücke erfolgt mit einer Werkzeugelektrode (im Weiteren auch als „Elektrode“ bezeichnet) in einem dielektrischen entweder öl- oder wasserbasierten Medium. Dabei werden die Elektrode und das Werkstück so in Arbeitsposition gebracht, dass ein Arbeitsspalt zwischen ihnen verbleibt. Nach der Positionierung auf den Arbeitsabstand im Bereich weniger Mikrometer und Anlegen der Prozessspannung von 60–250 V erfolgt nach Überschreiten der Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums eine Reihe von Funkenentladungen. Der Materialabtrag erfolgt also durch räumlich und zeitlich voneinander getrennte elektrische nichtstationäre Entladungen zwischen Werkstück und Elektrode [103, 107]. Abbildung 2.13 zeigt schematisch die Bearbeitung von Stahl. Das Verfahren wird hauptsächlich bei schwer bearbeitbaren Werkstoffen im Formen- und Werkzeugbau, zur Fertigung von Teilen in der Flugzeugindustrie und Medizintechnik sowie im Bereich der Mikrobearbeitung verwendet [10, 62, 108, 109, 110, 111]. Der Prozess arbeitet nach der „Negativ-Positiv-Abbildung“: Eine als Negativ auf die Werkzeugelektrode aufgebrachte Struktur wird spiegelbildlich unter einem gewissen Bearbeitungsspalt auf das Werkstück übertragen.

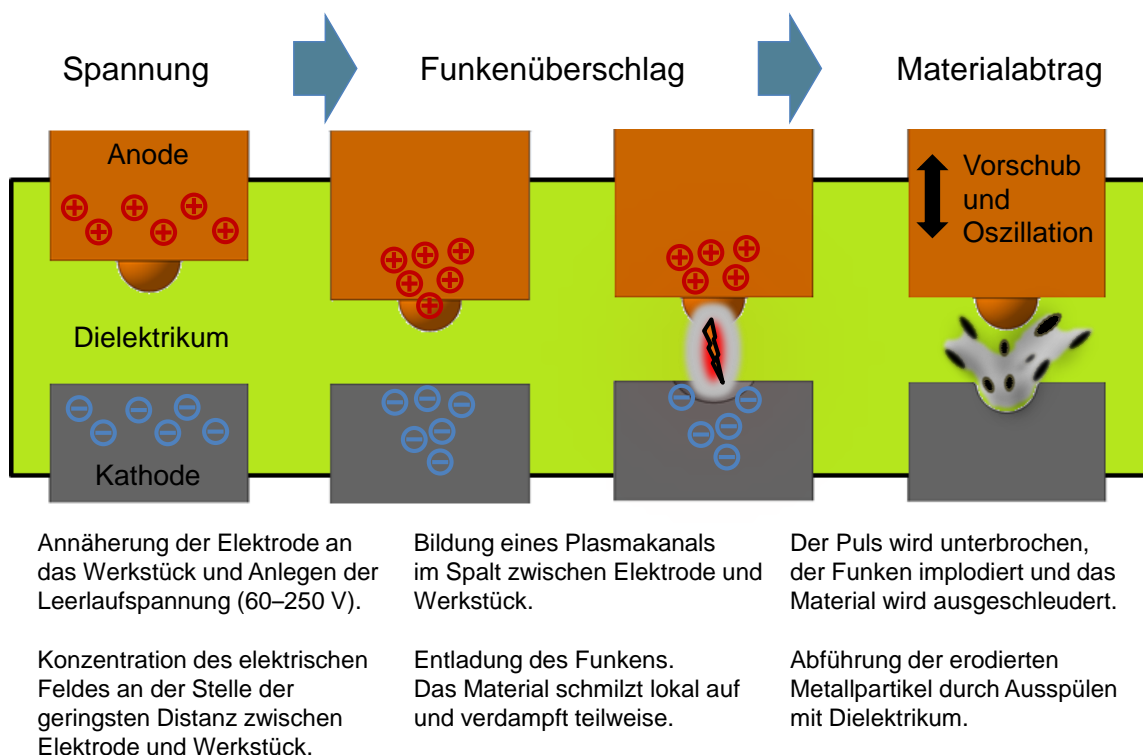


Abbildung 2.13: Funktionsweise der Funkenerosion

Funkenbildung und Abtragsvorgang

Die Bildung der Funken lässt sich in verschiedene Phasen einteilen, siehe Abbildung 2.14. Nach [62, 103] lassen sich dabei drei Phasen unterscheiden. Die erste Phase, die sogenannte Zündphase, dient der Bereitstellung der benötigten Prozessenergie [112] und umfasst all jene Vorgänge, die zur Ionisation der Entladestrecke und zur Kanalbildung notwendig sind, bis im Entladekanal ein Stromdurchgang erfolgt. Nach der Streamer-Theorie entsteht ausgehend von einer Elektronenlawine ein sogenannter Streamer und über dessen Anwachsen eine leitfähige Entladestrecke [113, 114]. Diese Streamer können bereits zum leichten Abtrag und Elektrodenverschleiß beitragen [115]. Dabei bewirkt der geringe Widerstand den Zusammenbruch der Spannung auf eine werkstoffspezifische Entladespannung. Der Strom fließt dabei fast ausschließlich auf der Mantelfläche. Während der zweiten Phase, als Entladephase bezeichnet, bleiben Strom und Spannung annähernd konstant. Hier erfolgt die für den Abtrag notwendige Umsetzung der elektrischen Energie. Diese bewirkt ein Schmelzen bzw. Verdampfen des Materials, wodurch sich eine sich ständig vergrößernde Gasblase ausbildet. Mit dem Abschalten der Spannung beginnt der Abbruchvorgang (dritte Phase). Gasblase und Plasmakanal brechen zusammen und das teils verdampfte, teils flüssige Material wird ausgeschleudert, sodass sich der gleiche Vorgang an anderer Stelle wiederholen kann.

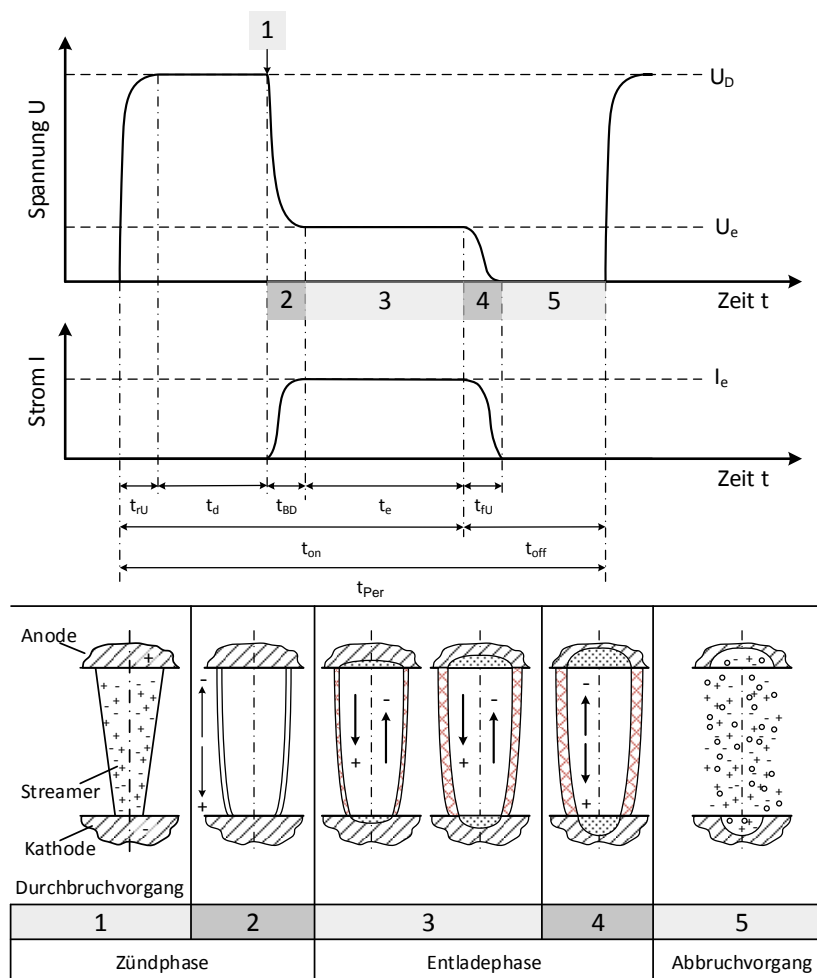


Abbildung 2.14: Phasen der Funkenentladung bei der Funkenerosion, nach [62, 116]

Pro Impuls findet nur eine Entladung statt [106]. Dies geschieht jedoch tausende Male pro Sekunde, sodass fast der komplette Spalt von Gas gefüllt ist [117, 118]. Die Einschläge finden dabei an verschiedenen Stellen statt, da die sich noch im Arbeitsspalt befindlichen Abtragspartikel in Verbindung mit den Gasblasen der vorangegangenen Entladungen zu einer erhöhten Leitfähigkeit in einem anderen Bereich der Bearbeitungsfläche führen [105]. Allgemein wird der Abtragsmechanismus auf elektrothermische Vorgänge zurückgeführt, wonach die durch die elektrische Entladung erzeugte Wärme die Elektroden- und Werkstückoberfläche im Bereich der Kanalfußpunkte aufschmilzt und der Werkstoffabtrag durch Verdampfen bzw. Ausschleudern des schmelzflüssigen Materials geschieht. Weitere Phänomene wie die Charakteristik der Einschlagkrater, (hohl-)kugelförmige Abtragspartikel und auftretende Zugeigenspannungen unterstützen diese Theorie, die ursprünglich von B. R. und N. I. Lazarenko sowie B. N. Zolotych entwickelt wurde [62, 103, 119]. Die sphärisch geformten Abtragspartikel entstehen aufgrund von Verdampfung hauptsächlich am Werkstück, an der Elektrode entstehen vermehrt nicht-sphärische Partikel durch Abplatzen [120]. Die Größe der abgetragenen Partikel liegt im Bereich der Spaltweite und der Oberflächenrauheit der Elektrode [117].

Aufgrund der Schwierigkeit die Temperatur an der Wirkstelle zu ermitteln, finden sich in der Literatur verschiedene Angaben und Ansätze zur Simulation einzelner Funken und den entstehenden Temperaturen sowie den damit in Zusammenhang stehenden aufgeschmolzenen Materialvolumina [109, 117, 121, 122, 123, 124]. Die angegebenen Temperaturwerte reichen meist von 8.000 °C bis 12.000 °C [107, 109, 125], wobei teilweise auch wesentlich höhere Werte bis 40.000 K genannt werden [103, 121]. Eine optische Auswertung einzelner Entladungen in einer Gasatmosphäre, die den Bedingungen wie im Dielektrikum kurz nach Pulsende ähneln soll, ergab Temperaturen im Bereich von 4.000 K bis 8.000 K [126]. Dazu ist anzumerken, dass einzelne Funken nicht den realen Bedingungen bei der Funkenerosion genügen und eine Übertragung auf eine kontinuierliche Bearbeitung nicht direkt möglich ist. Die Vielzahl von Einzelfunken ändert die Bedingungen im Spalt, sodass sich die Spaltweite, bei der gezündet wird, je nach Regelbewegung und Leitfähigkeit des Dielektrikums (in Abhängigkeit von Pausen- bzw. Deionisierungszeit (t_{off}) und Verschmutzung) ändern kann. Zudem erhöht sich die Temperatur der Elektroden aufgrund der Entladungswolken, die über die Elektrodenoberfläche wandern [103]. Die Effizienz der Erodierbearbeitung mit Folgeentladungen wird gegenüber Einzelentladungen dadurch verringert, dass aufgeschmolzenes und verdampft Material an den Elektroden wiedererstarren kann und erneut abgetragen werden muss. Dadurch können Einzelentladungen etwa zehnfach höhere Abtragsvolumina im Vergleich zu Folgeentladungen erreichen [119].

Die Entladung beginnt an der Stelle mit der größten Felddichte. Die Entladeenergie teilt sich im Prozess neben dem Dielektrikum auf die Werkstück- und die Werkzeugelektrode auf, sodass je nach Arbeitssituation ein nicht unerheblicher Verschleiß der Werkzeugelektrode auftritt, der zu Ungenauigkeiten in der Abbildung führen kann. Dies wird hauptsächlich an Ecken und Kanten deutlich, da an diesen

Stellen vor allem zu Beginn der Bearbeitung Verschleiß auftritt [127, 128]. Diesem Effekt wird durch eine Degradierung der Elektroden Rechnung getragen, indem neue Elektroden zuerst die Endbearbeitung durchführen, anschließend zum Schlichten und zum Schluss nur noch zum Schruppen eingesetzt werden. Die Herstellungskosten komplexer Elektroden können mehr als 70 % der Bearbeitungskosten ausmachen [129].

Das durch den Funken aufgeschmolzene Materialvolumen hängt von den Bearbeitungsparametern und dem Werkstoff ab. Ein entscheidender Faktor hierbei ist die Entladeenergie, welche von den Bedingungen während der konkreten Entladung abhängig ist. Diese sind wiederum wie beschrieben nicht unbedingt konstant. Daher wird die Entladeenergie über die mittleren Werte von Strom und Spannung während der Entladedauer, die nahezu mit der Impulszeit identisch ist, beschrieben, siehe Gleichung (16). Unter Vernachlässigung der minimalen Anstiegs- bzw. Breakdownzeit der Spannung, ergibt sich die Entladedauer als Differenz zwischen der am Generator einzustellenden Impulszeit und der von den Zündbedingungen im Spalt abhängigen Zündverzögerungszeit gemäß Gleichung (17) [103].

$$W_e = 10^{-6} \cdot \int_0^{t_e} U_e(t) \cdot I_e(t) \cdot dt \approx 10^{-6} \cdot \bar{U}_e \cdot \bar{I}_e \cdot t_{on} \quad (16)$$

W_e : Entladeenergie [J]
 t_e : Entladedauer [μ s]
 U_e : Entladespannung [V]
 I_e : Entladestrom [A]
 \bar{U}_e : mittlere Entladespannung [V]
 \bar{I}_e : mittlerer Entladestrom [A]
 dt : Zeitelement [μ s]

$$t_e = t_{on} - t_d \quad (17)$$

t_{on} : Impulszeit [μ s]
 t_d : Zündverzögerungszeit [μ s]

Die sich dem Bearbeitungsimpuls anschließende Pausenzeit dient der Regeneration der Bedingungen im Spalt, wie Entionisierung und Abtransport der Abtragspartikel. Das Verhältnis von Impuls- zu Periodendauer wird Tastverhältnis genannt und entspricht den zeitlichen Nutzungsgrad τ [103]:

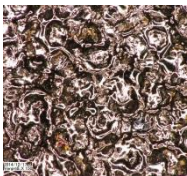


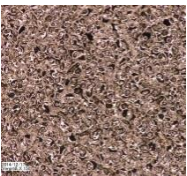

$$\tau = \frac{t_{on}}{t_{Per}} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (18)$$

τ : Tastverhältnis
 t_{Per} : Periodendauer [μ s]
 t_{off} : Pausenzeit [μ s]

Das aufgeschmolzene Volumen wird zum Teil beim Abbruch der Entladung ausgeschleudert und verursacht einen Krater. Der Teil an Schmelzvolumen, der nicht ausgeschleudert wird, kühlt wieder ab. Bei der Stahlbearbeitung werden nur etwa 15 % des Schmelzvolumens durch das Dielektrikum abtransportiert, der Rest verfestigt sich wieder [130]. Dies geschieht sowohl am Grund des Einschlagkraters als auch am oberen Rand und führt zu einem Aufwurf am Kraterrand, der vor allem bei Einzelentladungen deutlich erkennbar ist. Die beständige Wiederholung dieses Vorgangs beim Absenken der Werkzeugelektrode führt zum Materialabtrag. Der Vorschub wird dabei nicht kontinuierlich ausgeführt, sondern muss entsprechend dem Arbeitsfortschritt und den Bedingungen im Arbeitsspalt geregelt werden [64].

Die Überlagerung der Krater ist kennzeichnend für die entstehende Oberfläche. Verantwortlich für die Größe der Krater ist die bei der Entladung übertragene Energie [62]. Maßgebliche Parameter sind daher die Zündspannung, der Impulsstrom und die Zeit, während der Strom fließt. Allerdings hat auch die Härte des Werkstoffs einen Einfluss auf die Abtragsrate und die entstehende Oberfläche [131]. Zur Bewertung der funkenerodierten Oberfläche werden in der Regel der arithmetische Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z herangezogen [62]. Tabelle 2.5 zeigt am Beispiel eines 1.4301 die Oberfläche bei 150-facher Vergrößerung in Abhängigkeit von den verwendeten Bearbeitungsparametern.

Tabelle 2.5: Einfluss der EDM-Bearbeitungsparameter auf die Oberfläche

	1	2	3	4	5
					
Eingestellte Bearbeitungsparameter					
U_D [V]	100	100	180	180	180
I_{max} [A]	13,0	8,0	5,5	3,9	2,4
t_{on} [µs]	154,0	100,0	56,2	31,6	23,7
Rauheitskennwerte					
R_a [µm]	6,99	4,88	3,26	2,20	1,24
R_z [µm]	34,90	25,7	17,49	13,75	8,36
R_{max} [µm]	41,74	29,65	21,31	16,00	10,25
Materialtraganteil					
Mr (-1,00 / 5,0) [%]	6,64	7,81	11,64	8,62	16,82
Mr (-2,00 / 5,0) [%]	8,53	10,82	17,41	16,95	38,67
Mr (-3,00 / 5,0) [%]	10,48	14,24	24,78	29,35	65,28
100 % in Tiefe [µm]	40,32	27,57	18,10	13,40	8,51

Die übertragene Energiemenge, die zum Aufschmelzen des Materials zur Verfügung steht, wird jedoch durch Verluste in Werkstück, Elektrode, Dielektrikum und Strahlung reduziert. In [132] wurde durch Temperaturmessungen am Beispiel der Bearbeitung eines Hartmetalls mit Wolframkupfer gezeigt, dass in Abhängigkeit von den Parametern nur etwa 6,5–17,7 % Energie auf das Werkstück übertragen werden. Je kürzer die Impulszeiten sind, desto größer ist der Anteil an Energie, der zum Aufbau des Plasmas benötigt wird [133]. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Entladeenergie mehr Material aufgeschmolzen wird, sodass größere Erosionskrater zu einer höheren Rauheit führen [62]. Wie am Beispiel einer Stahlbearbeitung durch Kupfer und Grafit gezeigt wurde, ändert sich die Verteilung der Energie über die Impulszeit, sodass die an die Elektrode abgegebene Energie stetig sinkt und die an das Werkstück abgegebene Energie nach Durchlaufen eines Minimums wieder ansteigt [6]. Ein ähnliches Verhalten wurde auch für die Hartmetallbearbeitung mit Wolframkupfer nachgewiesen [134].

Einfluss der Bearbeitungsparameter

Mit Definition der elektrischen Spannung über den Weg s : $a \rightarrow b$, siehe Gleichung (8), lässt sich die theoretische Spaltweite im homogenen Dielektrikum unter

Vernachlässigung weiterer Einflüsse bestimmen. Der Funke zündet, wenn gilt, dass die Feldstärke im Spalt größer ist als die Durchschlagsfeldstärke des Dielektrikums (19), was normalerweise dort der Fall ist, wo der Abstand der Elektroden am geringsten ist. In Abbildung 2.15 ist die theoretische Spaltweite für ein neuwertiges Dielektrikum mit einer Durchschlagsfestigkeit von $E_{\text{Durchschlag}} = 23,2 \text{ kV/mm}$ (wie im Lieferzustand des in dieser Arbeit verwendeten Dielektrikums) und für ein verunreinigtes Dielektrikum mit einer angenommenen verringerten Durchschlagsfestigkeit von $E_{\text{Durchschlag}} = 18,0 \text{ kV/mm}$ unter der Annahme eines homogenen elektrischen Feldes zwischen zwei parallelen Elektroden dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Spaltweite durch Dielektrika mit geringerer Durchschlagsfestigkeit größer wird und damit die Abblidegenauigkeit im Prozess sinkt.

$$E_{\text{Spalt}} \geq E_{\text{Durchschlag}} \quad \begin{array}{l} E_{\text{Spalt}}: \text{elektrische Feldstärke im Spalt [kV/mm]} \\ E_{\text{Durchschlag}}: \text{Durchschlagsfestigkeit [kV/mm]} \end{array} \quad (19)$$

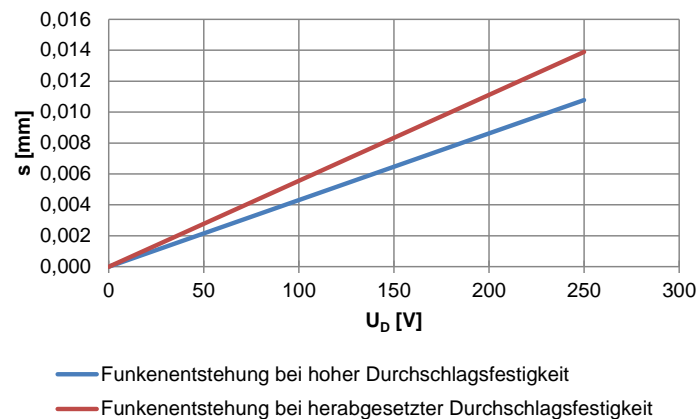


Abbildung 2.15: Theoretische Spaltweite zur Funkenentstehung bei verschiedenen Dielektrikumgüten

Daraus lässt sich ableiten, dass die Spaltweite von der angelegten Spannung abhängt. Eine zu kleine Spaltweite kann zu Kurzschlüssen, Fehlentladungen und zur Migration von Kupfer auf das Werkstück, eine zu große Spaltweite zu Leerläufen oder Einzelentladungen und großen Pausen führen. Aus diesem Grund sind Funkenerosionsanlagen mit einer Vorschubregelung ausgestattet, die einen Einfluss auf den Spalt ausübt. Daher muss bereits bei geringer Arbeitstiefe zwischen einem frontal und einem lateral gebildeten Spalt unterschieden werden. Der frontale Spalt wird durch die Regelung bestimmt, der laterale Spalt dagegen durch Dauer und Höhe der Entladeimpulse, durch die Materialpaarung, die Zündspannung und andere vorgegebene Werte [125].

Dass die auftretende Stromhöhe und die Impuls-Pausenzeit die Oberfläche im Hinblick auf Rauheit und Oberflächenschäden wie Risse und Wärmeeinflusszone entscheidend beeinflussen, ist ein bekanntes Phänomen und wurde vielfach untersucht, z. B. in [27, 135, 136, 137, 138, 139, 140]. Dabei wurde festgestellt, dass im Allgemeinen mit steigendem Strom die Abtragsrate [mm^3/min], aber auch die Rauheit, der Verschleiß und die Schädigungen der Randzone zunehmen. Dies ist auf

den für den Abtrag nutzbaren Energieanteil zurückzuführen, der mit steigendem Entladestrom bei konstanter Impulszeit überproportional wächst [103].

Bei der Funkenerosion kann ein thermisch induzierter oberflächlicher Eigenspannungszustand entstehen, der durch Zugspannungen in der äußersten Randzone gekennzeichnet ist [107]. Durch die starke Erhitzung und das relativ schnelle Abkühlen der Schmelze aufgrund der Wärmeableitung in das Grundmaterial entsteht z.B. bei Stahl auf der Oberfläche eine harte, spröde und bröckelige Schicht, die aus Austenit und Martensit besteht. Diese Schicht wird als „weiße Schicht“ (engl. white layer) bezeichnet, da sie in Schliffen unter dem Mikroskop betrachtet weiß erscheint. Die Zugeigenspannungen verursachen Risse in der Oberfläche, die senkrecht Richtung Grundmaterial verlaufen [141]. Die weiße Schicht weist eine dendritische Struktur auf und ist mit Kohlenstoff angereichert, welches aus dem Mineralöldielektrikum stammt. Ihr Kohlenstoffgehalt ist ca. viermal höher als im Grundmaterial. Sie besitzt daher eine höhere Härte als das Ausgangsmaterial, hervorgerufen durch Carbidkörner (Fe_3C) und ihre feinere Mikrostruktur [141, 142]. Bei der Verwendung von Wasser als Dielektrikum wurde hingegen nachgewiesen, dass die Schicht gegenüber dem Grundmaterial nur ca. die Hälfte an Kohlenstoff enthält [141]. Somit hängt die Zusammensetzung der weißen Schicht von der Zusammensetzung des verwendeten Dielektrikums ab [143]. Darunter entsteht durch das Abführen der Wärme eine Umwandlungszone, in der Temperaturen im Härtungsbereich des Werkstoffs auftreten können. Das Material in dieser Zone kann sich somit im Härte- oder Anlasszustand befinden [107]. Das Material unterhalb dieser Übergangszone bleibt durch die Bearbeitung unbeeinflusst.

Eine Verlängerung der Impuls- bzw. Entladezeit führt zu einem sinkenden Verschleiß. Der Verschleiß ist dabei definiert als das Verhältnis von abgetragenen Werkstoff am Werkzeug pro Zeiteinheit zum abgetragenen Werkstoff am Werkstück pro Zeiteinheit. In [103] wird vermutet, dass die hohe Energiedichte am Anfang der Entladung den größten Verschleiß verursacht; wenn der Entladekanal wächst, wechselt der Erosionsmechanismus und es wird hauptsächlich am Werkstück Material abgetragen.

Mit Verlängerung der Impulszeit steigt die Abtragsrate an, durchläuft ein Maximum und nimmt dann wieder ab. Dieses Verhalten lässt sich ebenfalls durch das Verhalten des Entladekanals erklären. Dieser dehnt sich weiter aus, womit der abtragswirksame Energieanteil wächst. Nach Durchlaufen des optimalen Radius überwiegen Energieverluste in die Elektroden und das Dielektrikum, wodurch die Abtragsrate wieder sinkt [103]. Die Pausendauer sollte aufgrund wirtschaftlicher Gesichtspunkte nur gerade so lange gewählt werden, wie der Entladekanal zur Deionisierung benötigt.

Zusätzlich beeinflusst die Wahl der Polung den Prozess. Bei der Stahlbearbeitung wird die Elektrode normalerweise anodisch und das Werkstück entsprechend kathodisch gepolt. Bei der Bearbeitung von Materialien, die eine hohe Thermoschockempfindlichkeit aufweisen, wie z. B. Hartmetall, wird die Polarität getauscht. Dabei

wird mit weitaus geringeren Impulszeiten ($t_e \leq 5\text{--}10 \mu\text{s}$) gearbeitet [103, 125]. Im elektrischen Feld beschleunigen die leichteren Elektronen wesentlich schneller als Protonen. Das bedeutet, dass bei kurzen Entladezeiten die Zahl der Ladungsträger überwiegend negativ ist. Die an der Auftreffelektrode entstehende Wärme hängt unter anderem von der kinetischen Energie, also Masse und Geschwindigkeit der Teilchen ab. Das bedeutet, um die gleiche Wärme bzw. den gleichen Abtrag einzubringen, müssen mehr negative als positive Ladungen auf die Oberfläche treffen. Daher sollte für kurze Impulszeiten die Polarität des Werkzeugs kathodisch sein. Die durch die Elektronen übertragene Energie ist insgesamt größer und somit wird am anodischen Werkstück einen höherer Abtrag erzielt. Umgekehrt sollte bei langen Impulszeiten die Polarität des Werkzeugs anodisch sein. Dadurch überwiegt die höhere kinetische Energie der Protonen und der Abtrag findet bevorzugt an dem dann kathodischen Werkstück statt. Abbildung 2.16 verdeutlicht diesen Sachverhalt nochmals. Die Polung WZ kathodisch / WS anodisch mit kurzer Impulszeit wird auch zum Polieren und für die Bearbeitung von Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit verwendet. Beim Polieren kann aufgrund der geringeren Entladeenergie eine glattere Oberfläche erzielt werden. Jedoch nimmt wie gezeigt der Verschleiß der Elektrode dabei zu. Bei Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit fließt die eingebrachte Wärme bei langen Pulsdauern in das Werkstück ab, weshalb die kurzen Pulsdauern eine effektivere Bearbeitung zulassen.

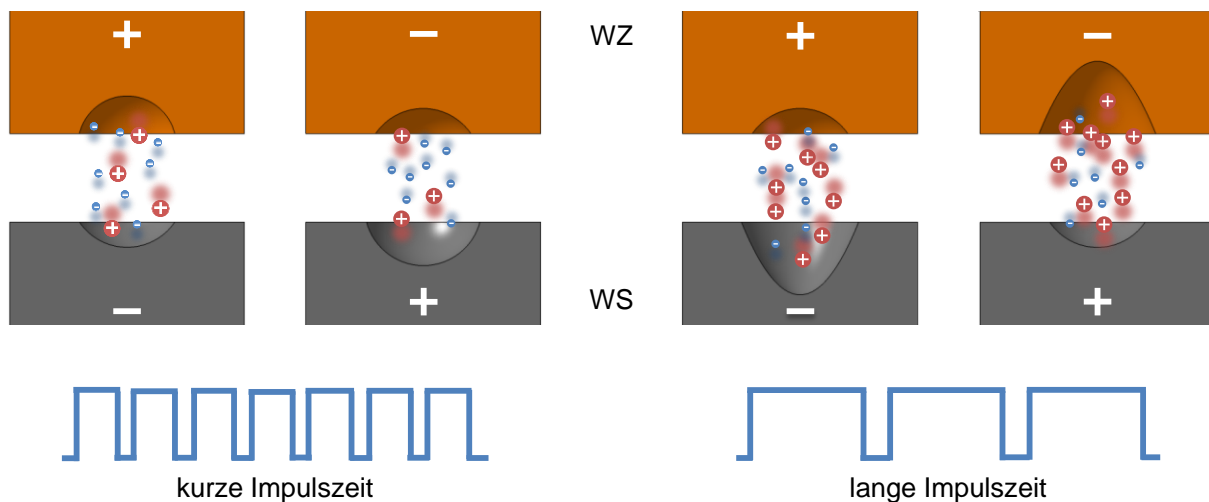


Abbildung 2.16: Einfluss der Polarität bei der Funkenerosion

Dielektrikum

Je nach Anwendung werden wasserbasierte oder kohlenwasserstoffbasierte Dielektrika verwendet. Dabei hat das Dielektrikum nach [62, 125] folgende Aufgaben:

1. Isolation:

Werkzeug und Werkstück müssen elektrisch isoliert sein, um ungewollte Entladungen zu vermeiden. Um eine optimale Abbildegenauigkeit und Abtragsleistung zu erreichen, darf die Entladung erst bei kleinstmöglichem Abstand zünden.

2. Ionisation:
Im Entladekanal müssen optimale Bedingungen für den Aufbau des elektrischen Feldes und der sich aufbauenden Entladung vorliegen. Nach Impulsende muss der Entladekanal schnell entionisiert werden, damit die nächste Entladung stattfinden kann.
3. Einschnürung des Entladekanals:
Während der Entladephase soll der Entladekanal möglichst eingeschnürt sein. Damit wird eine hohe Energiedichte und Abtragsleistung erreicht. Dabei bestimmt die Viskosität des Dielektrikums wesentlich die Ausdehnung des Entladekanals.
4. Kühlung:
Elektrode und Werkstück müssen aufgrund der extremen Prozesstemperaturen gekühlt werden, um hohen Verschleiß zu vermeiden. Zudem sollen die entstehenden Metaldämpfe kondensieren.
5. Abtransport der Abtragsprodukte:
Die entstehenden Abtragsprodukte müssen aus dem Funkenspalt entfernt werden, um konstante Bedingungen für die nächsten Entladungen zu schaffen und Prozessstörungen zu vermeiden. Dazu muss die Viskosität entsprechend niedrig sein.

Daneben sollte das Dielektrikum eine geringe Alterungsneigung haben, also eine hohe chemische Beständigkeit aufweisen [65]. Der Vorteil bei der Verwendung kohlenwasserstoffbasierter Dielektrika liegt in einer geringeren Spaltweite und damit besseren Reproduzierbarkeit der gewünschten Geometrie sowie der Vermeidung von Korrosionserscheinungen.

Werkzeugelektroden

Prinzipiell lassen sich beim funkenerosiven Senken alle leitenden Werkstoffe als Elektrodenmaterial einsetzen [62]. Die Auswahl geeigneter Werkstoffe wird jedoch beschränkt durch Anforderungen bzgl. guter Abtragsrate bei gleichzeitig möglichst geringem Verschleiß, die hauptsächlich durch die physikalischen Eigenschaften thermische Leitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit, Schmelzpunkt und Festigkeit bestimmt werden. Während die Abtragsrate die Fertigungszeit bestimmt, äußert sich der Werkzeugverschleiß vor allem in den Werkzeugkosten und in der erreichbaren Genauigkeit erodierter Bauteile [144]. Die Genauigkeit wird auch über die thermische Ausdehnung des Elektrodenmaterials beeinflusst. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Werkstoffeigenschaften und Erodierverhalten ist jedoch nicht gegeben [103].

Zu beachten ist, dass im Fall der reinen Senkerosion die erforderliche Kontur initial als Negativ auf die Elektrode aufgebracht werden muss. Dies ist je nach Kontur und Bearbeitbarkeit des Elektrodenwerkstoffs aufwändig und damit kostenintensiv, zumal die Elektroden aufgrund des Verschleißes regelmäßig ausgetauscht werden müssen.

Neben der konventionellen mechanischen Fertigung wurden bereits in den 1980er Jahren Verfahren mit galvanischer Abscheidung (engl. electroforming oder galvanofforming) zur Herstellung von Elektroden beschrieben. Dabei wird eine Form, das sogenannte Badmodell mit einer elektrisch leitenden Schicht versehen, z. B. durch Besprühen mit Silberlack oder Sputtern. Anschließend wird galvanisch eine elektrisch leitende Schicht aus beispielsweise Kupfer oder Nickel darauf abgeschieden. Nach

Entfernen des Badmodells und Abbau innerer mechanischer Spannungen kann das so entstandene Bauteil als Werkzeugelektrode im funkenerosiven Prozess verwendet werden. Das Badmodell selbst kann beispielsweise über lithografische Verfahren erstellt werden, was die Herstellung sehr feiner Strukturen erlaubt, auch als LIGA-Verfahren (**L**ithographie, **G**alvanik, **A**bformung) bekannt. Später wurde diese Idee auch im elektrochemischen Prozess verwendet [71, 103, 145, 146, 147, 148]. In [149] wird das LIGA-Verfahren zur Herstellung von Elektroden für Mikro-EDM von Hartmetall für Anwendungen in der Größenordnung von 200 μm bei einem Aspektverhältnis von 5 eingesetzt.

Aufgrund der genannten Erkenntnisse stehen bei modernen Funkenerosionsmaschinen umfangreiche Datensätze zur Verfügung, die eine relativ einfache Einstellung der Bearbeitungsparameter und einen automatisierten Wechsel zwischen verschiedenen Elektroden erlauben. Je nach Anwendungsfall haben sich in der Funkenerosion die in Tabelle 2.6 angegebenen Elektrodenwerkstoffe als vorteilhaft erwiesen und etabliert.

Tabelle 2.6: Empfohlene Werkstoffkombinationen für die Funkenerosion [107]

Elektrodenmaterial	Werkstoff	Werkstoff
	Stahl	Hartmetall
Kupfer	Alle Anwendungen	Alle Anwendungen
Feingrafit	Feine Oberflächen ($R_z < 20 \mu\text{m}$)	--
Normalgrafit	Große Elektroden und gröbere Oberflächen ($R_z > 20 \mu\text{m}$)	--
Wolfram-Kupfer	Feinbearbeitungen	Alle Anwendungen
Wolfram	Feinbearbeitungen	Feinbearbeitungen
Stahl	Große Werkzeuge Oberflächen-Nachbearbeitungen	--

Zusammenfassung

Parameter, die den funkenerosiven Prozess beeinflussen:

- Zündspannung U_D : hauptverantwortlich für die Spaltweite und damit für die Abbildegenauigkeit
- Entladestrom I_e : hauptverantwortlich für die Oberflächenrauheit und Oberflächenschäden
- Impulszeit t_{on} : hauptverantwortlich für den auftretenden Elektrodenverschleiß in Kombination mit dem Entladestrom
- Pausenzeit t_{off} : entscheidend für die Deionisierung des Arbeitsspalts
- Polung Werkzeug: anodisch für lange / kathodisch für kurze Impulszeit
- Polung Werkstück: anodisch für kurze / kathodisch für lange Impulszeit

Gängigste Werkstoffkombinationen:

- Kupfer für die Stahlbearbeitung
- Wolframkupfer für die Hartmetallbearbeitung
- Grafit für die Schruppbearbeitung von Stahl
- Wolfram für die Feinbearbeitung von Stahl und Hartmetall

Die Elektrodenpolarität beeinflusst das Bearbeitungsergebnis und muss entsprechend gewählt werden.

3 Stand der Technik

3.1 Elektrochemische Bearbeitung von Kupfer

Die Herausforderung bei der elektrochemischen Bearbeitung von Kupfer in neutralen Elektrolyten besteht in der hohen Auflösengeschwindigkeit des Materials. Diese ist zwar für eine schnelle Bearbeitung vorteilhaft, da sie zu wesentlich kürzeren Bearbeitungszeiten im Gegensatz beispielsweise zur Stahlbearbeitung führt, verursacht aber Probleme bei der genauen Abbildung von Strukturen. Daher beschränkt sich der industrielle Einsatz von ECM zur Bearbeitung von Kupfer auf komplex geformte, schmale, tiefe Löcher, die nur schwierig oder unmöglich mit anderen Verfahren hergestellt werden können [150].

Der Grund für die schnelle Auflösung ist in der elektrochemischen Spannungsreihe zu finden. Unter Bezug auf die Normalwasserstoffelektrode mit $E^{\circ} = 0 \text{ V}$ können die Normalpotentiale E° für Kombinationen des Typs Metall/Metallion (Metallelektroden 1. Art) für die Reaktion angegeben werden [14]. Die Reihung nach diesen Potentialen stellt die Spannungsreihe dar. Die für Kupfer möglichen Reaktionen sind in Tabelle 3.1 zu finden.

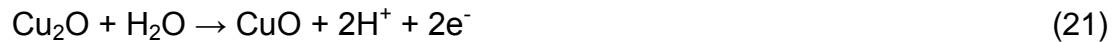
Tabelle 3.1: Ausschnitt der Standardpotentiale von Kupferverbindungen [151]

Reaction	E°/V
\vdots	\vdots
$\text{Cu}^+ + e \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.521
$\text{Cu}^{2+} + e \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	0.153
$\text{Cu}^{2+} + 2 e \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.3419
$\text{Cu}^{2+} + 2 e \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{Hg})$	0.345
$\text{Cu}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+}$	2.4
$\text{Cu}_2\text{O}_3 + 6 \text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons 2\text{Cu}^{2+} + 3 \text{H}_2\text{O}$	2.0
$\text{Cu}^{2+} + 2 \text{CN}^- + e \rightleftharpoons [\text{Cu}(\text{CN})_2]^-$	1.103
$\text{CuI}_2^- + e \rightleftharpoons \text{Cu} + 2 \text{I}^-$	0.00
$\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2 e \rightleftharpoons 2 \text{Cu} + 2 \text{OH}^-$	-0.360
$\text{Cu}(\text{OH})_2 + 2 e \rightleftharpoons \text{Cu} + 2 \text{OH}^-$	-0.222
$2 \text{Cu}(\text{OH})_2 + 2 e \rightleftharpoons \text{Cu}_2\text{O} + 2 \text{OH}^- + \text{H}_2\text{O}$	-0.080
\vdots	\vdots

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass sich reines Kupfer verschiedenwertig auflösen und dann weiter reagieren kann. So entsteht ab einem Potential von +0,3419 V zweiwertiges Kupfer und ab einem Potential von +0,521 V einwertiges Kupfer nach den angegebenen Reaktionen.

Mithilfe von Zyklovoltametrie durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass sich ab einer Spannung von -0,1 V Kupfer(I)oxid aus metallischem Kupfer nach Gleichung (20) bildet. Ab einer Spannung von +0,2 V wird das Kupfer(I)oxid teilweise

in Kupfer(II)oxid umgewandelt, siehe Gleichung (21). Es kommt somit zur Entstehung einer Duplex-Schicht aus CuO und Cu₂O. Zusätzlich wird weiteres Kupfer(II)oxid bis zu einem Potential von etwa +0,9 V gebildet, danach setzt die Sauerstoffentwicklung ein [83, 152].



Die Kupferoxidation in neutralen Elektrolyten und bei Spannungen unter 1 V führt dazu, dass bereits durch das Anliegen der Tastspannung von ca. 2,7 V in der Maschine eine unkontrollierte Oxidbildung stattfindet. Die Tastspannung wird zur Detektion der Werkstückoberfläche und von Kurzschlüssen verwendet. Allerdings ist der aufgrund der Tastspannung auftretende Strom auf 120 mA pro Generator begrenzt, sodass die bei den durchgeführten Wirkungsgradversuchen aufgebraachte Stromdichte kleiner als 0,00182 A/mm² ist und damit nur einen sehr geringen Einfluss hat.

Landolt et al. untersuchen die anodische Auflösung von Kupfer in neutralen Lösungen von KNO₃ und K₂SO₄ bei Stromdichten von 10–150 A/cm² in einer rechteckigen Durchflusszelle. Diese erlaubt Messungen unter definierten hydrodynamischen Bedingungen mit Durchflussgeschwindigkeiten von 1–25 m/s. Dabei wird beobachtet, dass bei der Bearbeitung von Kupfer abrupte Potentialwechsel von mehreren Volt auftreten, woraus auf zwei Auflösemodelle geschlossen wird: Aktive Auflösung bei niedrigen Anodenpotentialen, die zu Oberflächen ähnlich einer Ätzung führt, sowie bei höheren Anodenpotentialen eine transpassive Auflösung, die zu Löchern bzw. Pittingeffekten und Aufhellung der Oberfläche führt. Dabei werden Stromdichten beobachtet, die bis zu zehnmal höher sind als die Stromdichte, die zu Passivation führt. Der Grund dafür wird in einer Duplexstruktur aus einer dünnen, gut haftenden Schicht direkt an der Elektrode und einer darauf sitzenden porösen Schicht aus Kupferoxid gesehen [78, 153]. Für NaNO₃ werden andere Beobachtungen gemacht. Höhere Stromdichten im transpassiven Bereich führen hier zu glatteren Oberflächen [154]. Die nähere Untersuchung der Oberflächenausbildung zeigt einen Einfluss der kristallographischen Ausrichtung vor allem im aktiven Bereich. Dabei werden Körner bestimmter Orientierung bevorzugt angegriffen und aufgelöst. Aufgrund der sich ausbildenden anodischen Deckschichten wird der Effekt im transpassiven Bereich vermindert [155]. Werden chloridhaltige Elektrolyte verwendet, zeigt sich die Auflösung von Kupfer abhängig von der Ionenkonzentration, jedoch unabhängig vom pH-Wert [156, 157]. Die Unabhängigkeit wird ebenfalls für kaliumnitratbasierte und schwefelsaure Elektrolyte nachgewiesen [158]. Damit ist eine Verbesserung der Geometrie durch Anpassen des pH-Wertes bei diesen Elektrolyttypen auszuschließen.

Die Wertigkeitsänderung bei der Kupferauflösung wird durch die Stromdichte beeinflusst und ändert sich für nitratbasierte Elektrolyte von $z = 2$ im aktiven Zustand zu $z \approx 1,6$ im transpassiven Zustand [158, 159, 160], sodass je nach auftretender

Stromdichte andere Wertigkeiten beim theoretischen Massenabtrag anzunehmen sind. Der pH-Wert des Elektrolyten spielt bei der Wertigkeitsänderung eine vernachlässigbare Rolle [158]. In Abbildung 3.1 ist der Zusammenhang von Stromdichte und Potentialdifferenz bei der Kupferbearbeitung dargestellt, der transpassive Bereich ist grau hinterlegt ($\sigma = 160 \text{ mS/cm}$, $\text{pH} = 5,6$). Zu erkennen ist, dass der Übergang zwischen aktiver und transpassiver Auflösung nicht eindeutig, sondern in einem Bereich stattfindet und durch einen Potentialanstieg gekennzeichnet ist. Landolt et al. zeigen zudem, dass sowohl der Stromdichtebereich, in dem der Wechsel stattfindet, als auch die entstehende Oberfläche von der Strömungsgeschwindigkeit des Elektrolyten beeinflusst werden [78, 153, 155]. Da der Wechsel der verschiedenen Wertigkeiten nicht eindeutig einer Stromdichte zugeordnet werden kann und sich über einen Stromdichtebereich erstreckt, wird der Prozess hinsichtlich der Abtragseffizienz bei den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen anhand des später noch erläuterten spezifischen Materialabtrags SMR [mg/C] (engl. specific material removal) beurteilt.

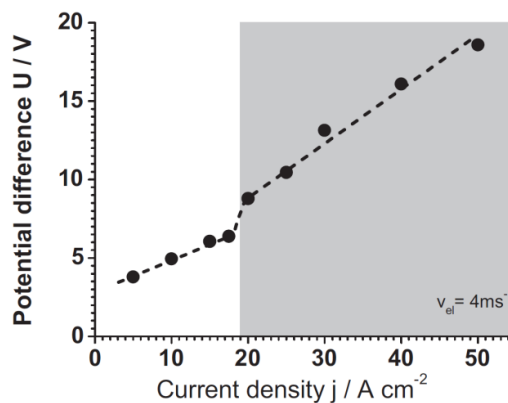


Abbildung 3.1: Potentialdifferenz vs. Stromdichte bei nitratbasierten Elektrolyten [160]

Bei Verwendung von alkalischen Elektrolyten ist bis zu einem gewissen Grad mit der Bildung einer stabilen Oxidschicht zu rechnen, wie am Pourbaix-Diagramm für Kupfer in Abbildung 3.2 erkennbar ist (vgl. auch [161]). Leckie zeigte, dass bei Verwendung von Natriumhydroxid-Lösungen mit steigendem pH-Wert eine höhere Stromdichte notwendig ist, um die Passivierung auszulösen [162]. Gleichzeitig sind die gebildeten Oxidschichten stabiler und schützen somit vor einer starken Auflösung [163].

In sauren Elektrolyten mit pH-Werten < 5 geht Kupfer unter der Bildung gut löslicher Cu(II)-Salze in Lösung, in stark alkalischen Medien hingegen steigt die Löslichkeit des Kupfers zunehmend durch die Bildung von Cu(II)-Komplexen (HCuO_2^- , CuO_2^{2-}). Kupfer ist damit in stark sauren und stark alkalischen Medien nicht in der Lage, eine schützende Oxidschicht auszubilden [164]. Eine erhöhte Abtragsrate bei pH 4 im Vergleich zu pH 8 wird auch in [165] festgestellt.

Kupfer zeigt in einem Bereich von ca. pH 7,5 bis pH 11,5 passives Verhalten gegenüber Korrosion, daher werden die pH-Werte in der vorliegenden Arbeit in diesem Bereich gehalten. Ergänzend wird ein saurer Wert gewählt, um den potentiell

höheren Abtrag für niedrigere pH-Werte auch bei PECM zu bestätigen. Die gewählten Werte sind pH 5,5 und pH 7,2 sowie pH 10,3.

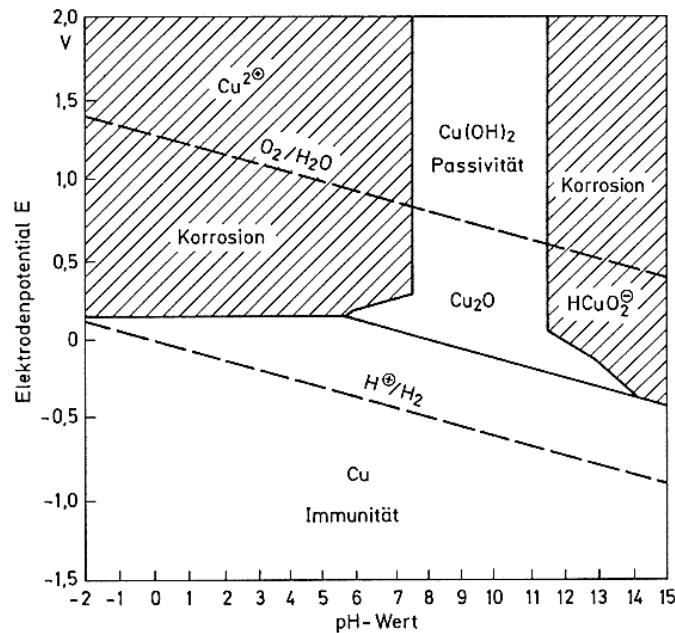


Abbildung 3.2: Pourbaix-Diagramm für Kupfer [166]

Bezogen auf die funkenerosive Bearbeitung von Hartmetall wäre die Verwendung von Wolfram-Kupfer vorteilhaft, allerdings löst sich der Wolframanteil bei der elektrochemischen Bearbeitung mit Natriumnitrat nicht auf. In Abbildung 3.3 ist das Ergebnis einer frontalen elektrochemischen Bearbeitung von WCu 75/25 gezeigt. Zu erkennen ist, dass sich der Kupferanteil auflöst, während die Wolframmatrix intakt bleibt und somit unweigerlich nach kurzer Bearbeitungszeit zum Kurzschluss führt. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Wolframauflösung in alkalischen Elektrolyten möglich ist [167]. Auch eine Beimengung von Ammoniak kann zu besserer Auslösung führen, wie dies an Wolframcarbid gezeigt wurde [168]. Aufgrund der Einschränkungen hinsichtlich der Umstellung des Elektrolytsystems werden die Versuche ohne die Zugabe von Ammoniak durchgeführt.

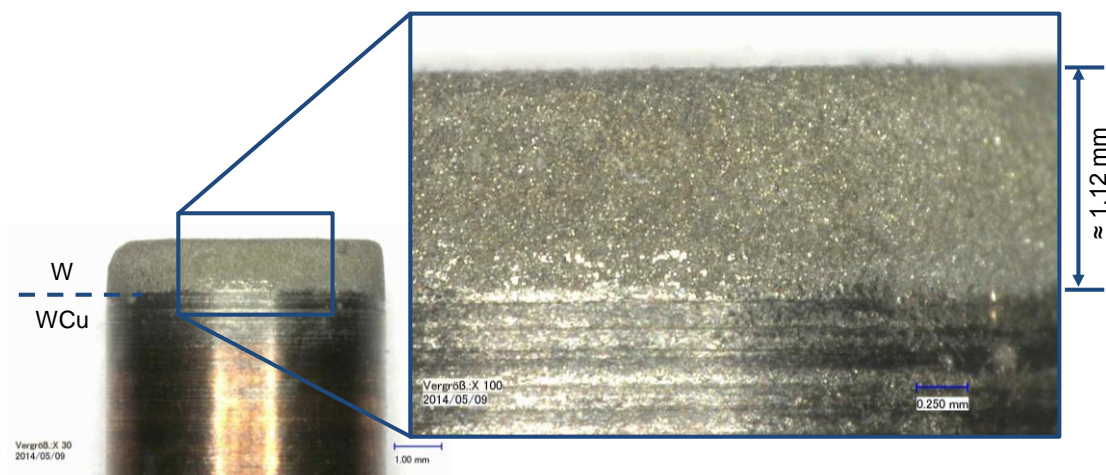


Abbildung 3.3: Ergebnis der elektrochemischen Bearbeitung von WCu in $NaNO_3$ bei pH 7,2

3.2 Elektrochemische Bearbeitung von Hartmetall

Die elektrochemische Bearbeitung von Hartmetall war und ist aktuell Gegenstand der Forschung, wie die DFG-geförderten Projekte „Wechselwirkung zwischen Gefüge und elektrochemischem Verhalten von carbidkeramischen Werkstoffen unter ECM-Bedingungen“ und „Gestaltung von Prozessen und Werkzeugen zur EC-Herstellung von 3D-Geometrien in carbidbasierten Werkstoffen“ zeigen [169, 170]. Erste grundlegende Untersuchungen zur elektrochemischen Auflösung titanbasierter Hartmetalle finden sich in [171]. Allerdings stellen Hartmetalle aufgrund der verschiedenen Bestandteile und deren unterschiedlichen elektrochemischen Auflösungsverhalten eine Herausforderung für den (P)ECM-Prozess dar, die bisher nicht zufriedenstellend gelöst werden konnte.

Das elektrochemische Verhalten von WC-Co-Hartmetall besteht in der Überlagerung des elektrochemischen Verhaltens der Hartphase (WC) und der Kobaltphase (Co) [172, 173]. Reines Wolfram ist weder in Natriumnitrat noch in Natriumchlorid auflösbar, die direkte Bearbeitung von WC ist damit nicht möglich. Der Auflösemechanismus ist bestimmt durch das Kobalt, welches sich bevorzugt im sauren pH-Bereich auflöst. In der Folge werden die WC-Partikel ausgewaschen, deren Fehlstellen zu rauen Oberflächen führen [174]. Darüber hinaus ergibt sich im PECM-Prozess mit dem Ausspülen relativ grober Partikel die Gefahr eines Kurschlusses und damit der Beschädigung von Kathode und Anode. Bei der elektrochemischen Bearbeitung von Wolfram sollte Wolframtrioxid, ein stabiles Oxid, welches die weitere Metallauflösung verhindert, entstehen [167]. Durch das beschriebene kathodische Zwischenpulsen können Deckschichten gezielt aufgelöst werden; der an der Werkstückoberfläche entstehende Wasserstoff reduziert dann die aus Oxiden oder Hydroxiden bestehende Passivschicht zu niederwertigen und besser löslichen Oxiden oder Hydroxiden [71]. Dies geht jedoch auf Kosten der Präzision und Lebensdauer der Kathode. Schubert et al. haben gezeigt, dass die Bearbeitung von Wolframcarbid in einer alkalischen Elektrolytmischung aus Ammoniak und Natriumnitrat möglich ist, wobei in diesem pH-Bereich die Kobalt-Bindematrix dann eine passive Schicht ausbildet [168, 175]. Die vorgeschlagene Mischung führt dazu, dass sich WC aktiv und Co transpassiv auflöst, was wiederum zu Problemen bzgl. der Oberflächengüte führen kann. Die basische Mischung von Natriumnitrat und Ammoniak zur Bearbeitung der Refraktärmetalle Wolfram, Molybdän und Tantal wurde 2004 vom Forschungszentrum Karlsruhe GmbH zum Patent angemeldet und 2006 offengelegt [176].

Die gleichzeitige elektrochemische Bearbeitung von Wolframcarbid und Kobalt mittels der am weitesten verbreiteten Elektrolyte NaNO_3 und NaCl ist nicht möglich. Somit kann festgehalten werden, dass zum jetzigen Zeitpunkt mit industriellem PECM keine zufriedenstellende Hartmetallbearbeitung möglich ist.

3.3 Funkenerosive Bearbeitung von Hartmetall

Die Funkenerosion ist ein Standardprozess zur Bearbeitung von fertig gesintertem Hartmetall. Die entstehenden Temperaturen sind prinzipiell ausreichend, um auch die relativ temperaturfesten Hartstoffkörner als wesentlichen Bestandteil des Werkstoffs aufzuschmelzen [107].

Allerdings weisen die eingelagerten Hartstoffkörner eine hohe Thermoschockempfindlichkeit auf, d. h. eine geringe Wärmeleitfähigkeit kombiniert mit einer nicht zu vernachlässigenden Wärmeausdehnung. Durch die Funkenentladungen entstehen große Temperatursprünge, in der festen Phase des Metalls in Größenordnungen von 10^5 – 10^6 K/s [41], welche zu Rissen oder sogar zum Ausbrechen größerer Werkstoffvolumina führen können. Bei der Bearbeitung von spröden Materialien mit hoher Schmelz- und Verdampfungstemperatur überwiegt der am Abtragsvorgang beteiligte mechanische Anteil, da im Entladekanal sehr hohe Drücke und elektrodynamische Kräfte auftreten, unter deren Einwirkung ein konzentrierter mechanischer Schlag erfolgt [41, 62]. Dieser Schlag und das Abtragen und Verdampfen der Kobaltbindematrix kann dazu führen, dass komplette Wolframcarbid-Körner ausfallen [177, 178]. Wird mit langen Impulsen gearbeitet, heizt sich das Material lokal stark auf und kühlt nach dem Abschalten des Impulses unter dem Einfluss des kalten Dielektrikums innerhalb kürzester Zeit wieder ab. Als Folge entstehen in der Oberfläche Risse, in Extremfällen kann das Werkstück auch vollständig zerstört werden [107].

Daher wird bei der Hartmetallbearbeitung die Elektrode kathodisch gepolt, was wie gezeigt die Verwendung von kurzen Entladedauern erlaubt. Auf diese Weise sind der Energieeintrag und damit das am Werkstück aufgeschmolzene Volumen zwar geringer, was zu längeren Bearbeitungszeiten führt, die sinkende Wärmebelastung führt jedoch zu besseren Oberflächen.

Die funkenerosive Bearbeitung von Stahl und Hartmetall ist vielfach Gegenstand wissenschaftlicher Veröffentlichungen und gut dokumentiert. Jedoch unterscheiden sich die für die Zielgrößen Abtragsrate, Elektrodenverschleiß sowie entstehende Oberflächenrauheit und Oberflächenschäden entwickelten Modelle. Teilweise werden auch gegensätzliche Verhalten festgestellt, wie in Tabelle 3.2 zu sehen ist. Es fällt auf, dass die Flächenmaße der Elektroden und Werkstücke oft nicht genannt werden oder nicht identisch sind bzw. gezielt Einsenkungen erzeugt werden. Somit kann der Einfluss der Parameter zumindest auf die Werkstückrauheit als nicht korrekt ermittelt angesehen werden, da die Aufteilung des Stroms auf Frontal- bzw. Seitenfläche unbekannt ist. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit bei der Untersuchung zur Oberflächenbewertung und eindeutigen Verschleißzuordnung konzentrisch ausgerichtete gleich große Elektroden verwendet.

Tabelle 3.2: Stand der Technik zur funkenerosiven (Hartmetall-)Bearbeitung

Aussage	Werkzeugmaterial	Werkstückmaterial	Quellen
Abtragsrate			
• steigt mit dem Entladestrom	Grafit, ECu, WCu, W, Messing	HM, Stahl	[136, 137, 179, 180, 181, 182, 183]
• steigt mit längerer Impulszeit bei niedrigen Strömen und erreicht konstante Werte bei höheren Strömen	Grafit, ECu, WCu, Messing	HM, WC	[136, 137, 180, 184]
• sinkt mit höherer Spannung	Grafit, ECu, WCu	HM	[137]
• steigt mit höherer Spannung	WCu, W	HM	[179, 181]
• steigt mit höherem Kobaltgehalt	Messing	HM	[180]
Elektrodenverschleiß			
• steigt mit höherem Entladestrom	Grafit, ECu, WCu	HM, WC	[136, 137, 181, 184]
• steigt mit höherer Spannung	Grafit, ECu, WCu, W	HM	[137, 179, 181]
• steigt mit längerer Impulszeit	Grafit, ECu, WCu	HM	[137, 185]
Rauheit			
• steigt mit höherem Strom	Grafit, ECu, WCu	HM, WC, SiC, Stahl	[136, 182, 184, 186, 187, 188]
• sinkt mit höherem Strom	ECu	Stahl	[189]
• steigt mit längerer Impulszeit	Grafit, ECu, WCu	HM, WC, SiC, Stahl	[136, 184, 186, 187, 188]
• steigt mit höherer Spannung	Grafit, ECu, WCu, W	HM	[137, 179, 181]
• wird nicht durch Strom oder Impulszeit beeinflusst	WCu	HM	[181]
sonstiges			
• die Dicke der beeinflussten Zone und die Anzahl der Risse steigt mit Strom und Impulszeit	ECu, WCu	HM, Stahl	[182, 183, 186, 188]
• die Spannung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Rissentstehung	ECu	HM	[190]
• Wolfram-Kupfer zeigt im Vergleich zu Kupfer weniger Verschleiß über alle Erodierbedingungen bei der Hartmetallbearbeitung	Grafit, ECu, WCu	HM	[137]
• höhere Abtragsrate, niedrigerer Verschleiß und bessere Oberfläche entstehen, bei kathodischer Polung der Elektrode	Grafit, ECu, WCu	HM	[137]
• eine bessere Oberfläche entsteht, bei anodischer Polung der Elektrode	ECu, WCu	WC, SiC	[187]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine höhere Entladeenergie zu einer höheren Abtragsrate, aber auch zu erhöhtem Verschleiß und raueren Oberflächen führt. Zwar ist die Bearbeitung selbst unabhängig von den mechanischen Eigenschaften, jedoch haben die chemische Zusammensetzung und die dadurch bestimmten physikalischen Eigenschaften (Schmelz- und Verdampfungstemperatur, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, elektrische Leitfähigkeit, Dichte) einen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis [103]. Grundsätzlich verhält sich damit jedes Material anders. In der Untersuchung des funkenerosiven Bearbeitungsverhaltens von Hartmetall werden daher nur die als relevant identifizierten Parameter Strom, Spannung und Impulszeit variiert, um den Versuchsumfang in einem angemessenen Rahmen zu halten.

Die meisten Veröffentlichungen verwenden 94W/6Co als Material. In dieser Arbeit soll jedoch gezielt auf die in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Hartmetalle aus dem Bereich der Werkzeugherstellung bzw. für Walz- und Ziehringe eingegangen werden. Viele

Untersuchungen beschränken sich auf die Verwendung von Wolfram-Kupfer als Elektrodenwerkstoff, da es eine deutlich bessere Verschleißbeständigkeit besitzt. Jedoch ist die Verwendung von Kupfer interessant, da es wesentlich günstiger als Wolfram-Kupfer ist (je nach Menge und Abmessung ca. 15–20 mal günstiger) und glattere Oberflächen im Vergleich zu Wolfram-Kupfer erzeugen kann [137, 187].

4 Untersuchungen zu Werkstoffverhalten und Prozesseinflüssen

4.1 Gepulste elektrochemische Bearbeitung von Kupfer

Um das Materialverhalten von Kupfer bei der PECM-Bearbeitung zu ermitteln, werden die Einflüsse auf das Bearbeitungsergebnis systematisch untersucht. Dazu werden die Eingangsparameter Vorschub v_f [mm/min], Prozessspannung U_{gap} [V], Impulszeit t_{on} [ms], pH-Wert, Phase [%] und Elektrolytdruck p_{El} [kPa] variiert. Als Ausgangsparameter werden Stromdichte J [A/mm²] (als Quotient aus Strom und Elektrodenfläche), SMR [mg/C] (als Quotient aus Massenabtrag Δm_{prak} sowie Strom und Bearbeitungszeit), Spaltweite s [mm] und Oberflächenrauheit R_a [μm] bewertet, siehe Abbildung 4.1. Es wird nur die arithmetische Rauheit R_a verglichen, da diese auch als maßgeblicher Kennwert bei der Funkenerosion herangezogen wird [62]. Die Auswertung erfolgt im Tastschnittverfahren nach EN ISO 4287 [191], vgl. Anhang E.

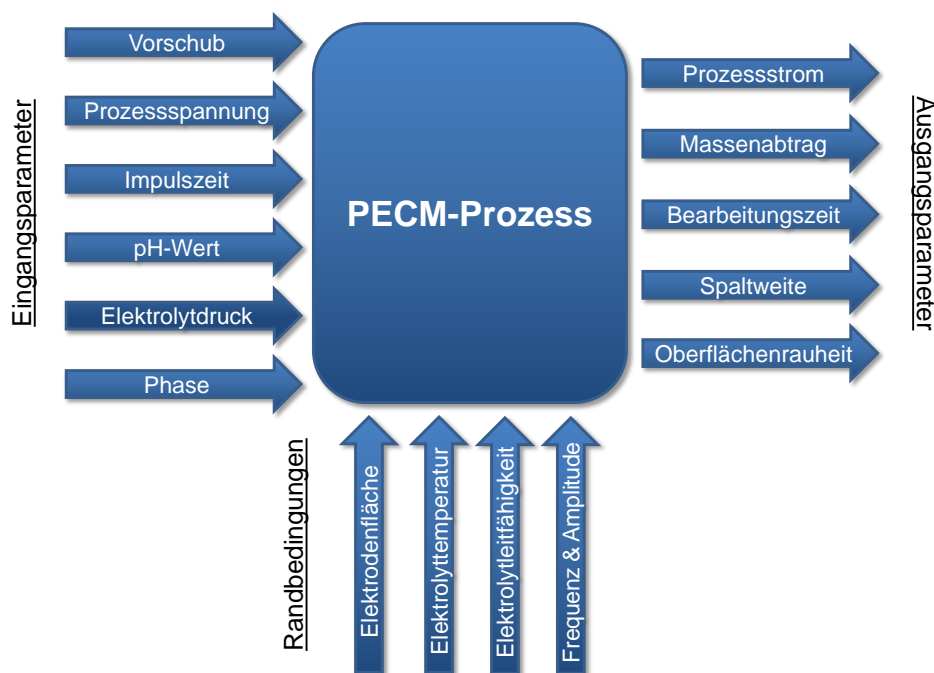


Abbildung 4.1: Einfluss- und Wirkgrößen des PECM-Prozesses

Die konstant gehaltenen Randbedingungen sind:

- Elektrodenfläche: $A = 76,98$ bzw. $77,60 \text{ mm}^2$ (je nach Charge)
- Elektrolyttemperatur: $T = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Elektrolytleitfähigkeit: $\sigma = 71 \pm 1 \text{ mS/cm}$
- Vibratorfrequenz: $f = 50 \text{ Hz}$
- Vibratoramplitude: $\text{Amp} = 183,5 \text{ } \mu\text{m}$

Die Versuche werden an einer industriellen elektrochemischen Senkanlage PEMCenter 8000 der Firma *PEMtec SNC* durchgeführt (vgl. Anhang D) und die Vibratoramplitude gemäß der neuesten Vermessung der Maschine angenommen.

Eine messtechnische Kontrolle der von der Maschine ausgegebenen Stromhöhe zeigt teilweise erhebliche lineare und nicht-lineare Abweichungen von den realen Werten in Abhängigkeit von der Stromhöhe selbst. Im Bereich bis 40 A ist der ausgegebene Wert zu hoch und der Fehler beträgt im Extremfall bis zu 80 %. Ab 40 A sind die ausgegebenen Werte zu klein, wobei dieser Fehler recht konstant 5–10 % beträgt, siehe Anhang D. Dies hat eine nicht-lineare Verschiebung und Verzerrung der Stromdichten bei der Auswertung zur Folge.

Um die Fehler zu korrigieren, werden die Ströme in drei Bereiche eingeteilt und die ausgegebenen Werte mit den entsprechenden Regressionen korrigiert (I_{real} = korrigierte Stromhöhe; I_{PEM} = ausgegebener Wert), siehe Tabelle 4.1:

Tabelle 4.1: Regressionen zur Stromkorrektur der ausgegebenen Stromhöhen

Ausgegebener Wertebereich [A]	Regression [A]
Bereich I	$0 \leq 10$ $I_{\text{real}} = 0,2867 \cdot e^{0,2499 \cdot I_{\text{PEM}}}$
Bereich II	$> 10 \leq 80$ $I_{\text{real}} = 1,1573 \cdot I_{\text{PEM}} - 7,9121$
Bereich III	> 80 $I_{\text{real}} = 1,0310 \cdot I_{\text{PEM}} + 5,7790$

Einschränkend soll erwähnt werden, dass die Ergebnisreproduktion vor allem im Bereich niedriger Stromdichten zu Schwierigkeiten führen kann. Um eine konstante Stromdichte über die Bearbeitungszeit zu erreichen, ist ein Vorschub der Kathode zwingend erforderlich. Bei den teilweise hier verwendeten Vorschüben von $v_f = 0,01$ mm/min bedeutet dies eine Absenkung von 16,6 μm pro Sekunde. Diese feine Bewegung wird zeitgleich durch eine Vibration der Kathode inkl. dem entsprechenden Achsenaufbau von 50 Hz überlagert, was zu Ungenauigkeiten in der Zustellung führen kann. Auf diese durch die Maschinenbauart bedingte Tatsache soll hier jedoch nicht weiter eingegangen werden, sie soll nur als potentielle Einflussquelle aufgeführt werden.

4.1.1 Versuchsaufbau und Versuchsplan

Der Versuche werden mittels eines Aufbaus mit konzentrisch positionierten Elektroden in einer Spülkammer durchgeführt. Bei diesen sogenannten Frontalspaltversuchen findet der Materialabtrag nur auf der frontalen Fläche statt, siehe Abbildung 4.2. Dies hat zur Folge, dass der abtragswirksame Strom eindeutig einer Fläche zugeordnet werden kann. Die verwendete Kathode besteht aus dem Werkstoff 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) und ist auf einen Durchmesser von 10,0 mm abgedreht. Die Stirnfläche besitzt eine Rauheit von $R_a < 0,3 \mu\text{m}$ / $R_z < 1,5 \mu\text{m}$. Nach jedem Versuch wird die Kathode mit 5%iger Salzsäure von Ablagerungen befreit und gründlich mit entsalztem Wasser („Osmosewasser“) abgespült. Die Kupferanoden

werden als Stangenmaterial geliefert, getrennt und plan gedreht. Die Stirnfläche besitzt anschließend eine Rauheit von $R_a < 1,0 \mu\text{m}$ / $R_z < 4,0 \mu\text{m}$. Fertigungsbedingte Durchmesserabweichungen werden bei der Auswertung der Stromdichte berücksichtigt.

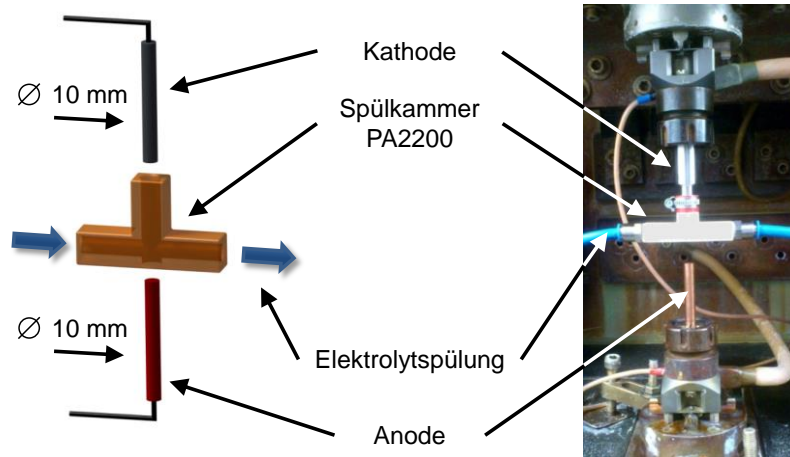


Abbildung 4.2: Versuchsaufbau der PECM-Frontalspaltversuche

Die verwendete Spülkammer besitzt an der Bearbeitungsstelle eine Spaltweite von 0,5 mm und gewährleistet reproduzierbare Strömungsbedingungen während der Experimente. Sie wird mittels additiver Fertigung (hier selektivem Lasersintern) aus PA2200 hergestellt, welches auf dem Polyamid PA12 basiert. Anschließend wird das Material mit Epoxidharz infiltriert, um eine Elektrolytaufnahme zu verhindern. Dieses Verfahren und Material findet Anwendung, da es eine freie Formgestaltung auch komplexer innenverschnittener Bauteile zulässt und eine ausreichende Druck- und Schlagfestigkeit sowie Korrosionsbeständigkeit bietet [192, 193]. Die Spülkammer stellt einen funktionalen Versuchsaufbau dar, um konstante Stromdichten ohne Seitenspalte zu erreichen. Die Abschätzung des Durchflusses nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille für eine stationäre, laminare Strömung zeigt, dass der Elektrolytaustausch quasi nur in den Pausenzeiten stattfindet, da zur Durchströmung der parameterabhängigen Spalte während der Bearbeitungsphase enorme Drücke notwendig wären, die die eingestellten Werte überschreiten würden, vgl. Anhang A. Die nahezu vollständige Spülunterbrechung während der Bearbeitungsphase hat auch den Vorteil, dass sich so quasi keine Spülriefen auf der Oberfläche ausbilden.

Die Wertebereiche der Eingangsparameter sind Tabelle 4.2 zu entnehmen, wobei nicht jede denkbare Kombination angewendet werden kann, etwa aufgrund der auftretenden Kurzschlüsse bei zu kleiner Spannung und Impulszeit in Kombination mit einem hohen Vorschub. Auf die Verwendung statistischer Versuchspläne wurde aufgrund der starken Interaktion der Parameter bewusst verzichtet, da ansonsten Effekte untereinander vermischt auftreten und die Wirkung der Einzelparameter nicht interpretierbar ist. Ausschnitte der Ergebnisse sind in Anhang B tabelliert.

Tabelle 4.2: Parameterstufen der elektrochemischen Wirkungsgradversuche

Parameter	Stufen										
Vorschub v_f [mm/min]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,10	0,13	0,16	0,19	0,22
Prozessspannung U_{gap} [V]	7	10	13								
Impulszeit t_{on} [ms]	1	2	3	4	5						
pH-Wert	5,5	7,2	10,3								
Druck p_{El} [kPa]	100	200	400								
Phase [%]	25	50	80								

Standardmäßig wird der Wirkungsgrad, der nach Gleichung (5) ermittelt wird, zur Beurteilung der Materialcharakteristik herangezogen. Der theoretische Massenabtrag ergibt sich nach dem Faraday'schen Gesetz (Gleichung (1)). Aufgrund der möglichen gemischtvalenten Auflösung von Kupfer ist eine eindeutige Zuordnung von Wertigkeitsänderung und Stromdichte nicht möglich, was die eindeutige Bestimmung des Wirkungsgrades erschwert. Daher wird an dieser Stelle der spezifische Materialabtrag SMR [mg/C] als Kennwert herangezogen. Dieser wird statt auf den theoretischen Massenabtrag nach Faraday auf die geflossene Ladung normiert. Vorteil dieses Vorgehens ist, dass der ermittelte SMR-Wert eine vergleichbare Aussage zum Wirkungsgrad liefert, dabei jedoch unabhängig von der Wertigkeitsänderung bleibt. Der praktische Massenabtrag wird mittels einer Präzisionswaage Sartorius MSE2203S bestimmt. Um den Fehler der Messunsicherheit von 0,001 g auf maximal 1 % zu begrenzen, wurden in jedem Durchlauf mindestens 0,1 g Material abgetragen. Die geflossene Ladung wird aus den exportierten Maschinenaufzeichnungen ermittelt. Dazu wird die mittlere Stromhöhe mit der Bearbeitungszeit nach Gleichung (2) multipliziert. Dieses Vorgehen liefert sehr genaue Werte für die geflossene Ladung. Der Fehler durch die Mittelung des Stroms anstelle der wesentlich aufwändigeren Berechnung über die aufgezeichneten Einzelwerte ist vernachlässigbar. Stichpunktartige Kontrollen zeigten Abweichungen im Bereich von 0,08–1 %. Als Bezugsgröße für den SMR-Wert wird die mittlere Stromdichte herangezogen.

Die entstehende Oberflächenrauheit wird mittels eines Perthometers MarSurf XR/XT20 der Firma Mahr bewertet. Aufgrund des Durchmessers von 10 mm steht nach EN ISO 4288 (DIN 4768) eine maximale Taststrecke von 5,6 mm bzw. eine Gesamtmessstrecke von 4 mm bei einer Grenzwellenlänge von 0,8 mm zur Verfügung, mit der Rauheiten von bis zu $R_a = 2 \mu\text{m}$ / $R_z = 10 \mu\text{m}$ erfasst werden können [194], vgl. Anhang E. Die gemessene stromdichteabhängige Rauheit weist teilweise höhere Werte auf. Jedoch hat die Taststrecke nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf das Ergebnis der Rauheitsmessung [41], weshalb die Messungen dieser Arbeit mit einer Taststrecke von 5,6 mm durchgeführt werden. Die sich einstellende frontale Spaltweite wird über einen Antastschritt unmittelbar nach Beendigung der Bearbeitung ermittelt. Sowohl die Rauheit als auch die Spaltweite werden auf die Stromdichte bezogen, die am Ende der Bearbeitung vorherrscht, da diese sich geringfügig von der mittleren Stromdichte unterscheiden kann.

Die Auswertungen erfolgen mittels der Software Minitab 17.0 von Minitab Inc. Für jeden Versuchsdurchlauf wird ein neues Werkstück verwendet, sodass die erhobenen

Daten nicht verbunden sind. Zur Identifizierung eines geeigneten statistischen Tests zur Beurteilung der Einflüsse der Einstellparameter werden die Daten im ersten Schritt nach dem Ryan-Joiner-Test auf Normalverteilung getestet. Dieser Test untersucht die Normalverteilung, indem die Korrelation zwischen den Daten und den normalverteilten Werten der Daten berechnet wird. Wenn der Korrelationskoeffizient nahe 1 liegt, ist die Grundgesamtheit wahrscheinlich normalverteilt. Die Ryan-Joiner-Statistik untersucht die Stärke dieser Korrelation. Wenn diese unter dem entsprechenden kritischen Wert liegt, wird die Nullhypothese verworfen, der zufolge die Grundgesamtheit normalverteilt ist [195]. Sind die Daten normalverteilt, wird getestet, ob gleiche Varianzen vorliegen. Ist dies erfüllt, wird anschließend der entsprechende Einfluss mittels einer ANOVA untersucht. Die Hypothesen für die ANOVA lauten:

- H_0 : Alle Mittelwerte der Grundgesamtheiten sind gleich.
- H_1 : Nicht alle Mittelwerte sind gleich.

Sind die Daten nicht normalverteilt, schließt das die Anwendung statistischer Verfahren, die eine Normalverteilung voraussetzen, z. B. F-Test oder ANOVA, aus. Ein geeigneter Test zur Bewertung von Zusammenhängen ist dann der Kruskal-Wallis-Test. Mit diesem Test wird ermittelt, ob zwei oder mehr unabhängige Stichproben aus identischen Grundgesamtheiten stammen; er stellt eine verteilungsfreie Alternative zu einer einfachen ANOVA dar. Der Test erfordert keine Normalverteilung der Daten und verwendet für die Analyse statt der tatsächlichen Datenwerte deren Rangfolge. Bei diesem Test wird davon ausgegangen, dass die Stichproben aus den verschiedenen Grundgesamtheiten unabhängige Zufallsstichproben aus stetigen Verteilungen sind, wobei die Verteilungen die gleiche Form aufweisen [195]. Die Ergebnisgruppen werden dazu als aus derselben Verteilung stammend angenommen. Obwohl der Kruskal-Wallis-Test keine Normalverteilung voraussetzt, dürfen die Daten normalverteilt sein, allerdings ist die Trennschärfe gegenüber der ANOVA etwas geringer. Die Hypothesen für den Kruskal-Wallis-Test lauten:

- H_0 : Alle Mediane der Grundgesamtheiten sind gleich.
- H_1 : Nicht alle Mediane sind gleich.

Die Wahrscheinlichkeit einen Fehler 1. Art¹ zu begehen wird bezogen auf die Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 5\%$ mittels des p-Wertes² getestet. Für den p-Wert gilt 0,05 entsprechend einer fünfprozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit üblicherweise als Grenze für die Annahme, dass der jeweilige Effekt wahr ist. Unter 0,05 gilt der Effekt als wahr (reproduzierbar aufgrund von Systemveränderungen), über 0,05 als scheinbarer Effekt (nicht reproduzierbare, zufällige Streuung). Dies schützt allerdings nur davor, einen scheinbaren Effekt als wahren Effekt anzusehen, unklar bleibt, ob ein wahrer Effekt irrtümlicherweise als scheinbarer Effekt eingestuft wird [196].

¹ Fehler 1. Art: Nullhypothese H_0 wird verworfen, obwohl sie richtig ist [224].

² Der Wert p ist die unter H_0 berechnete Wahrscheinlichkeit, dass die Testgröße T so extrem oder noch extremer ausfällt als der aktuelle Wert $T(x)$ dieser Größe. Ist ein Signifikanzniveau α vorgewählt, so verwirft man H_0 , falls p kleiner gleich diesem α ist, sonst verwirft man nicht [224].

Bemerkung

Auf die Untersuchung des Materialverhaltens mittels der elektrochemischen Grundlagenuntersuchungen Cyclovoltammetrie und Chronoamperometrie wird in dieser Arbeit verzichtet, da zum einen zu Kupfer bereits entsprechende Arbeiten existieren, vgl. [83, 152], und zum anderen sich die auf industriellen Anlagen vorhandenen Strömungs- und vor allem Spannungs- sowie Impulsbedingungen von den Untersuchungen im Labormaßstab unterscheiden können. Die maximale Anstiegsrate des kommerziellen Potentiostaten SP-150 des Herstellers BioLogic beträgt $\Delta U/\Delta t = 200 \text{ V/s}$ bzw. $0,0002 \text{ V}/\mu\text{s}$ [197]. Eine messtechnische Kontrolle am PEMCenter8000 zeigte Anstiegszeiten im Bereich $\Delta U/\Delta t = 0,0359$ und $0,0689 \text{ V}/\mu\text{s}$, dazu wurden die in dieser Arbeit verwendeten Spannungsstufen mehrmals angefahren. Selbst im langsamsten Fall ist die industrielle Anlage damit ca. 179-mal schneller. Mit den genannten Verfahren können grundlegende Reaktionsmechanismen geklärt werden. Ein Rückschluss auf das Verhalten an der Maschine, also etwa auf parameterabhängige Stromdichten, Spaltweiten, Rauheiten etc., oder die Definition von sinnvollen Bearbeitungsparametern ist jedoch nicht möglich.

4.1.2 Kathodenbewegung während der Impulse und Einfluss der Phase

Im Folgenden soll die Bewegung der Kathode während der Impulszeit erläutert werden, um das Verständnis für den Prozessablauf zu erhöhen. Anschließend wird der Phaseneinfluss untersucht.

Die frontale Spaltweite ändert sich während des Bearbeitungsimpulses aufgrund der Oszillation der Kathode, vgl. Abbildung 4.3. Diese mechanisch bedingte Spaltweitenänderung ist unabhängig von der Spaltweite, die sich aufgrund des Vorschubs und der chemischen Auflösungsvorgänge ergibt. Die Maschine regelt die vorgegebene Spannung so, dass die Sollwertvorgabe im unteren Totpunkt (UT) der Oszillation erreicht wird. Um einen konstanten Arbeitsstrom über die gesamte Impulszeit zu erreichen, muss die Spannung dem Winkel des Vibrators entsprechend über die Impulszeit angepasst werden. Die maximale mechanische Änderung der Spaltweite Δs_{mech} während der Impulszeit lässt sich über folgende Kosinus-Beziehung aus den Gleichungen (22) bis (24) berechnen.

$$\Delta s_{\text{mech}} = \text{Amp} \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right) \quad (22)$$

Δs_{mech} : mechanische Änderung der Spaltweite [μm]
 Amp: Amplitude des Vibrators [μm]
 β : überstrichener Winkel [$^\circ$]
 γ : Winkelverschiebung aufgrund der Phasenverschiebung [$^\circ$]

$$\beta = f \cdot \frac{t_{\text{on}}}{1000} \cdot 360^\circ \quad (23)$$

$$\gamma = \left| \beta \cdot \left(0,5 - \frac{P}{100} \right) \right| \quad (24)$$

P: Phase [%]

Der überstrichene Winkel β ist nur von der Impulszeit und der Frequenz abhängig. Jedoch beeinflusst der Wert Phase (P) ebenfalls die mechanische Spaltweite über die Möglichkeit den Bearbeitungspuls um einen bestimmten Prozentanteil der Impulszeit gegenüber UT zu verschieben. Dabei bedeutet $P = 50\%$, dass der Mittelpunkt der Impulszeit im UT liegt, $P = 0\%$, dass der Impuls im UT gestartet wird, und $P = 100\%$, dass der Impuls im UT endet. Da als Bezug der UT verwendet wird, wird die mechanische Spaltänderung größer, sobald ein anderer Wert als 50% für die Phase gewählt wird.

Das bedeutet, je kleiner die Impulszeit und je kleiner die Frequenz, desto gleichmäßiger ist der Spalt, und je weiter der Wert Phase von 50% abweicht, desto größer ist die maximale Spaltweitenänderung. Die mechanisch erzwungene Spaltänderung ist nicht unerheblich, wie Abbildung 4.3 am Beispiel einer Phaseneinstellung von 50% und 75% zeigt. Der Unterschied der mechanischen Änderung der Spaltweite ist an Δs_{50} bzw. Δs_{75} deutlich zu erkennen.

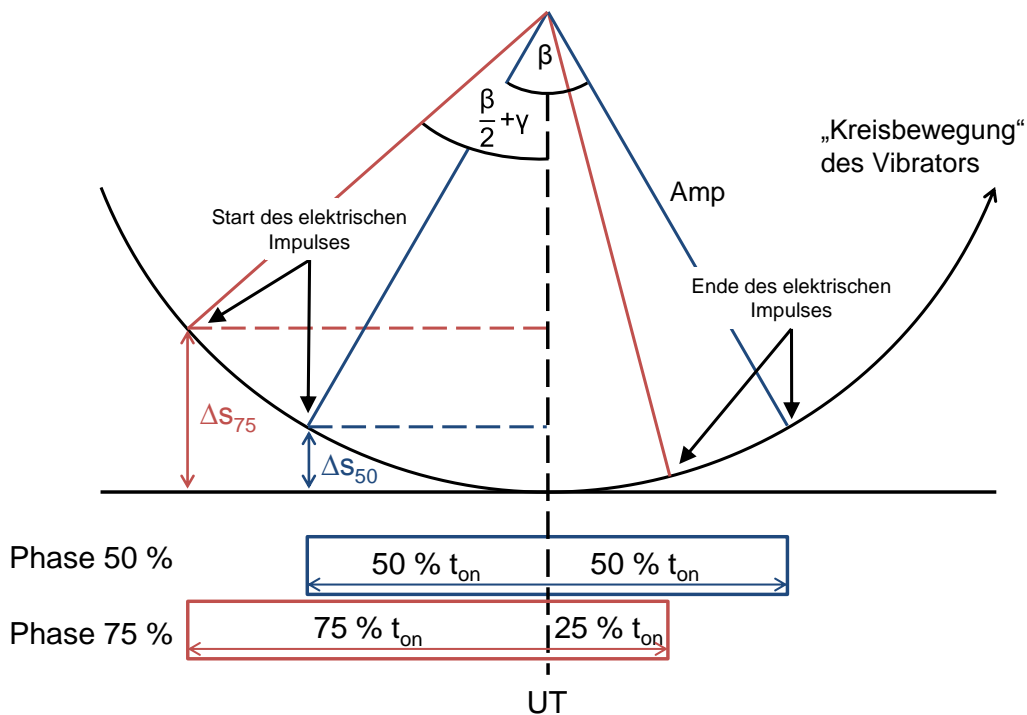


Abbildung 4.3: Einfluss der Phase auf die mechanische Spaltweitenänderung

Da die eingestellte Spannung immer bzgl. UT geregelt wird (bis zu maximal $18,7\text{ V}$) und der Arbeitsstrom bzw. die Stromdichte theoretisch konstant bleibt, ändert sich die durch die weiteren Parameter beeinflusste auflösungsbedingte Spaltweite nicht. Jedoch kann durch die Verlagerung des Impulsstarts Richtung früh ($P > 50\%$) die Prozessstabilität erhöht werden, da die entstehenden Gasblasen durch die Abwärtsbewegung des Vibrators komprimiert werden. Abbildung 4.4 zeigt die maximale mechanische Änderung der Spaltweite für verschiedene Frequenzen und Phaseneinstellungen bei einer konstanten Impulszeit von $t_{on} = 2\text{ ms}$. Die Zunahme der Spaltweite bei Abweichung von $P = 50\%$ und bei Steigerung der Frequenz ist deutlich zu erkennen.

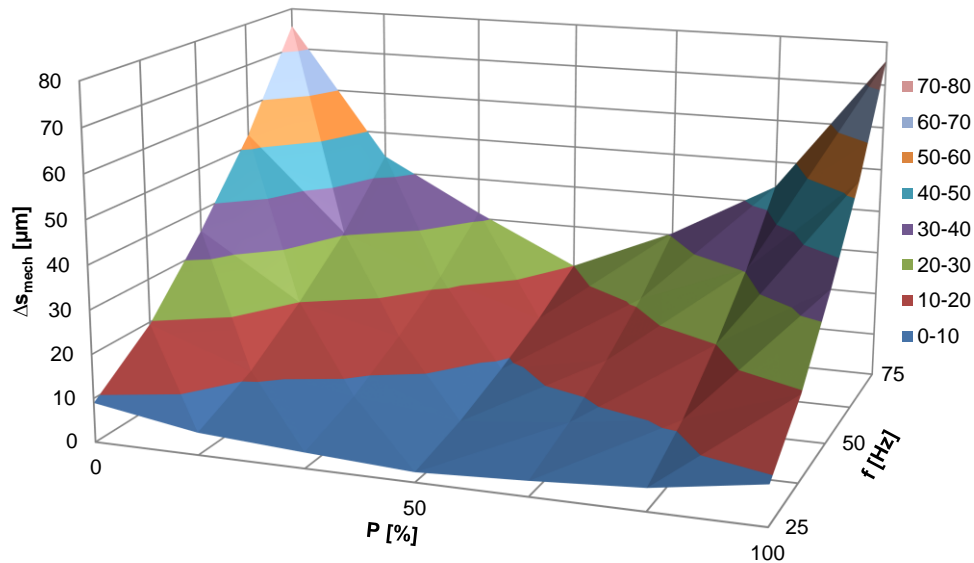


Abbildung 4.4: Einfluss der Phase und der Frequenz auf die mechanische Spaltweitenänderung

Diese Annahme wird durch Versuche bei pH 7,2 mit Phaseinstellungen von $P = 25\%$, 50% und 80% bestätigt. In den folgenden Abbildungen 4.5–4.7 sind die Ergebnisse für $v_f = 0,1$ mm/min und Impulszeiten von $t_{on} = 2\text{--}5$ ms dargestellt. Für die Stromdichte werden die höchsten Werte (grün) bei der kleinsten Impulszeit erreicht, entsprechend werden die niedrigsten Stromdichten (blau) bei der längsten Impulszeit erreicht. In Rot ist der Mittelwert der Stromdichten dargestellt, womit diese Datenreihe der Darstellung eines Effektplots entspricht. Die Phaseinstellung hat keinen signifikanten Einfluss auf die Stromdichte, d. h. innerhalb der Spannungsstufen unterscheiden sich die Stromdichten nur sehr leicht. Die p-Werte für Stromdichte vs. Phase nach der ANOVA liegen bei $p = 0,992$ für 7 V, $p = 0,968$ für 10 V und $p = 1,000$ für 13 V. Es ist eine leichte Erhöhung der Stromdichten aufgrund der Spannungssteigerung zu erkennen, siehe auch Kapitel 4.1.4.

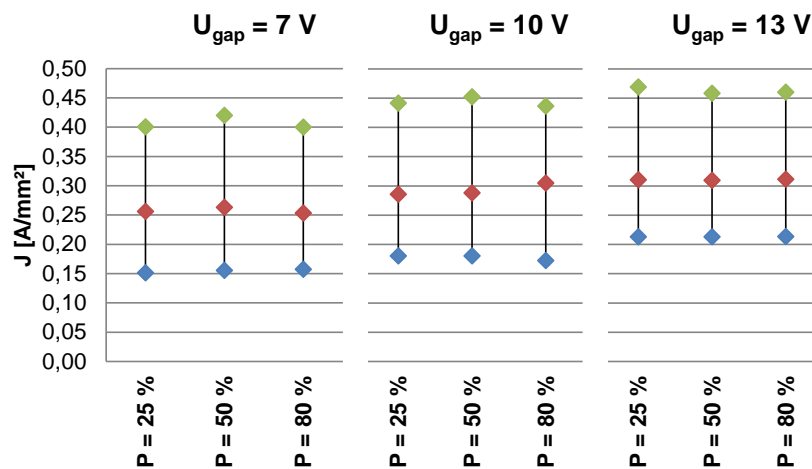


Abbildung 4.5: Einfluss der Phase auf die Stromdichte

Der Einfluss der Phase auf die parameterbedingte Spaltweite ist mit $p = 0,599$ für 7 V, $p = 0,723$ für 10 V und $p = 0,914$ für 13 V ebenfalls nicht signifikant, wie auch Abbildung 4.6 verdeutlicht. Hierbei gilt für die Spaltweite, dass der kleinste Spalt mit der kürzesten Impulszeit erreicht wird und der größte Spalt mit der längsten Impulszeit. Deutlich zu erkennen ist hier, dass die Spaltweite mit höherer Spannung und Impulszeit zunimmt, dieser Zusammenhang wird in Kapitel 4.1.5 untersucht.

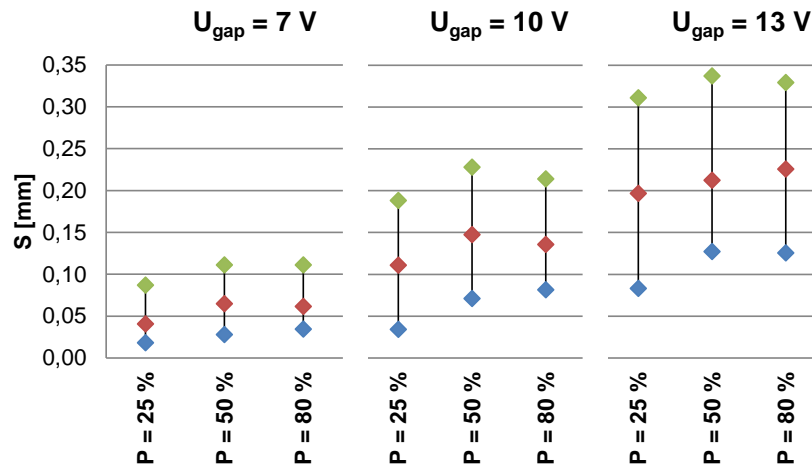


Abbildung 4.6: Einfluss der Phase auf die Spaltweite

Wie Abbildung 4.7 und die zugehörigen Werte $p = 0,229$ für 7 V, $p = 0,221$ für 10 V und $p = 0,137$ für 13 V zeigen, ist der Einfluss der Phase auf den spezifischen Materialabtrag SMR nicht signifikant. Zu erkennen ist, dass der Wert mit steigender Spannung tendenziell leicht kleiner wird, dieser Zusammenhang wird in Kapitel 4.1.6 untersucht.

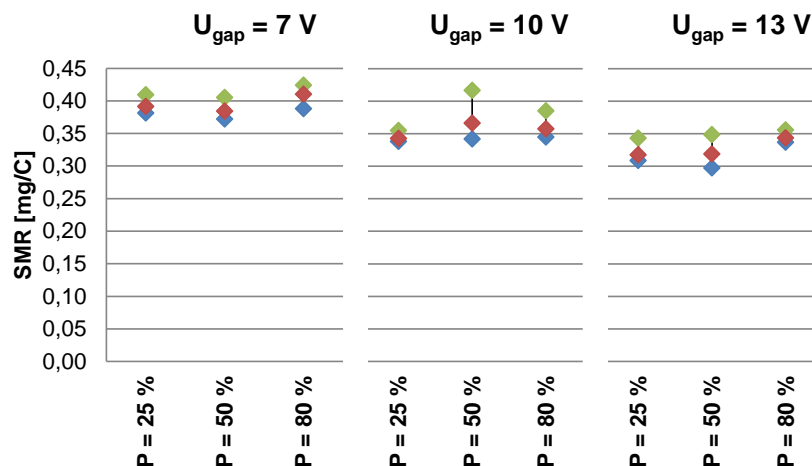


Abbildung 4.7: Einfluss der Phase auf den spezifischen Materialabtrag

Wie vermutet zeigt die sich ausbildende Oberflächenrauheit eine leichte Abhängigkeit von der Phase, siehe Abbildung 4.8 für eine konstante Impulszeit von 2 ms. Trotz ähnlicher Stromdichten werden mit vorverlagertem Impulsstart bessere

Rauheiten erzielt. Die p-Werte für R_a vs. Phase liegen bei $p = 0,191$ für 7 V, $p = 0,032$ für 10 V und $p = 0,005$ für 13 V. Dieses Phänomen kann wahrscheinlich auf gleichmäßigere Elektrolytbedingungen im Spalt aufgrund von Komprimierung der sich bildenden Gasblasen zurückgeführt werden. Die großen Rauheiten entstehen vor allem bei niedrigen Stromdichten, siehe auch Kapitel 4.1.7.

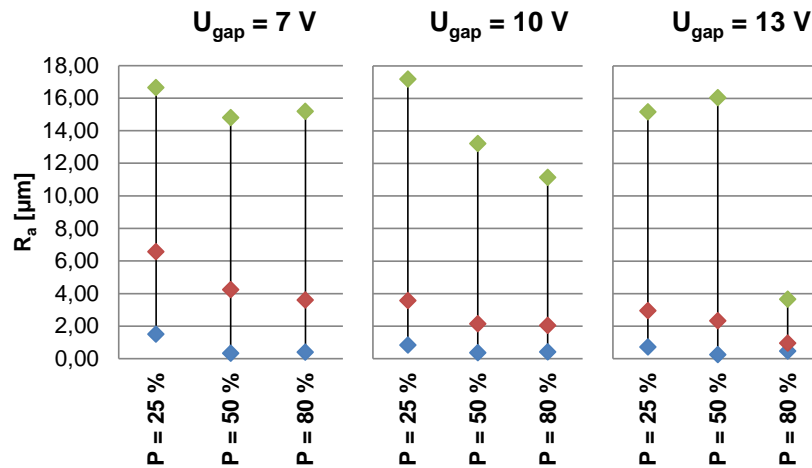


Abbildung 4.8: Einfluss der Phase auf die Oberflächenrauheit

Damit hat die Phasenlage lediglich einen Einfluss auf die Oberflächenrauheit, wie die Zusammenfassung in Tabelle 4.3 zeigt. Im Weiteren wird aufgrund der besseren Impulsstabilität mit einer Phase von $P = 80\%$ gearbeitet.

Tabelle 4.3: Signifikanz der Phase auf die Ausgangsparameter

Phase vs.	p-Wert für $U_{\text{gap}} = 7\text{ V}$	p-Wert für $U_{\text{gap}} = 10\text{ V}$	p-Wert für $U_{\text{gap}} = 13\text{ V}$	Einfluss signifikant?
Stromdichte	0,992	0,968	1,000	×
Spalt	0,599	0,723	0,914	×
Spez. Materialabtrag	0,229	0,221	0,137	×
Oberflächenrauheit	0,191	0,032	0,005	✓

4.1.3 Einfluss des Elektrolytdrucks

Um zu entscheiden, mit welchem Druck im Weiteren zu arbeiten ist, wird der Versuchsaufbau bei der Bearbeitung mit verschiedenem Druck beaufschlagt und die Prozessergebnisse Stromdichte, Spaltweite, spez. Materialabtrag und Oberfläche werden miteinander verglichen. Die Versuche werden bei einer konstanten Spannung von $U_{\text{gap}} = 10\text{ V}$ und einer Impulszeit von $t_{\text{on}} = 3\text{ ms}$ durchgeführt. Die Darstellung erfolgt aufgrund der vielen Vorschubstufen mit sogenannten Konturdiagrammen, um das Zusammenwirken verschiedener Einstellungen zu visualisieren. Konturdiagramme stellen jeweils einen Ausgangsparameter in Abhängigkeit von zwei Eingangsparametern dar. Punkte mit gleichen Werten der

Antwortvariablen werden dabei verbunden, um so Höhenlinien konstanter Werte zu erstellen [195].

In Abbildung 4.9 sind die Konturdiagramme der Ausgangsparameter gegenüber Druck und Vorschub dargestellt. Sie verdeutlichen, dass Stromdichte, Spalt und spezifischer Materialabtrag unabhängig vom eingestellten Druck sind, dagegen sind die geringeren Werte für die Rauheit vor allem für einen hohen Vorschub zu erkennen.

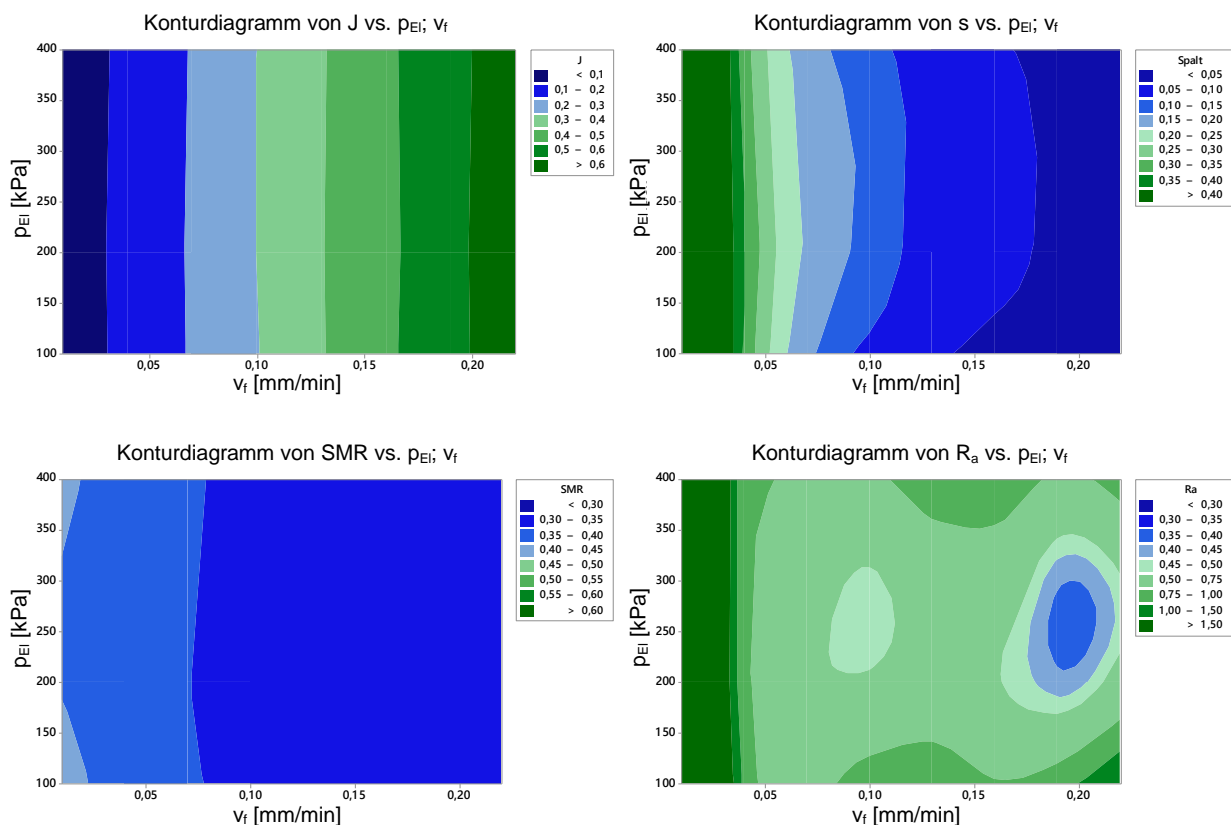


Abbildung 4.9: Konturdiagramme zum Druckeinfluss

Die Betrachtung der deskriptiven Statistik unter Ausschluss des Extremwertes für die verschiedenen Drücke und pH-Werte zeigt, dass die Rauheit im Mittel bei einem eingestellten Druck von 200 kPa am geringsten ausfällt und die kleinste Standardabweichung besitzt, vgl. Tabelle 4.4. Bereits zu erkennen ist der Einfluss des pH-Wertes auf die Rauheit, worauf in Kapitel 4.1.7 nochmals eingegangen wird.

Tabelle 4.4: Druckeinfluss auf die Oberflächenrauheit

pH-Wert		100 kPa	200 kPa	400 kPa
		R_a [μm]	R_a [μm]	R_a [μm]
pH 5,5	Mittelwert	1,37	0,84	1,10
	Standardabweichung	0,40	0,22	0,16
pH 7,2	Mittelwert	0,90	0,47	0,86
	Standardabweichung	0,38	0,12	0,23
pH 10,3	Mittelwert	0,48	0,37	0,48
	Standardabweichung	0,14	0,08	0,17

Im Folgenden werden die Wirkungsgradversuche daher bei $p_{EL} = 200 \text{ kPa}$ durchgeführt. Die Auswertung des Kruskal-Wallis-Tests zeigt, dass der Druck einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheit hat, wohingegen die weiteren Parameter unbeeinflusst bleiben, siehe Tabelle 4.5.

Tabelle 4.5: Signifikanz des Drucks auf die Ausgangsparameter

Druck vs.	p-Wert	Einfluss signifikant?
Stromdichte	0,974	×
Spalt	0,650	×
Spez. Materialabtrag	0,946	×
Oberflächenrauheit	0,046	✓

4.1.4 Vorschub und Stromdichte

Die sich ergebende Stromdichte ist das Ergebnis der Einstellparameter und des Materialverhaltens. Unter Vorgabe eines konstanten Vorschubs ergibt sich eine bestimmte Prozesszeit für den Abtrag eines bestimmten Materialvolumens. Je nach Impulszeit variiert damit die zur Bearbeitung zur Verfügung stehende Zeit. Wird beispielsweise eine kurze Impulszeit gewählt, müsste bei konstant angenommenem Strom mit weniger Ladungseinheiten das gleiche Materialvolumen abgetragen werden. Da dies nicht möglich ist, steigt der Strom bei kleinerer Impulszeit an. Somit stehen mehr Ladungsträger zur Verfügung, die den Unterschied zwischen verfügbarer Bearbeitungszeit und benötigtem Materialabtrag ausgleichen.

Ähnliches gilt für die Frequenz. Bei kleinerer Frequenz steht für denselben Vorschubweg weniger Bearbeitungszeit zur Verfügung. Dies führt zu einem höheren Stromfluss. Umgekehrt folgt bei höherer Frequenz ein niedrigerer Strom. Die niedrigere Frequenz führt jedoch wie aus Gleichung (22) ersichtlich zu einem konstanteren Spalt während des Impulses. Die durch Variation der Impulszeit oder Änderung der Frequenz beeinflusste Stromdichte wirkt sich unmittelbar auf den entstehenden Spalt und die entstehende Oberflächenrauheit aus. Der theoretische Zusammenhang zwischen den Parametern und der Stromdichte unter Annahme einer konstanten Spaltweite beim PECM-Prozess lässt sich wie folgt aus den Gleichungen (3), (4) und (5) ableiten, vgl. [198]:

$$V_{\text{prak}} = \eta \cdot \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot I \cdot t_P \cdot t_{\text{on}} \cdot f \quad \eta: \text{Wirkungsgrad [\%]} \quad (25)$$

$$V_{\text{prak}} = A \cdot h \quad \begin{array}{l} A: \text{Bearbeitungsfläche [mm}^2\text{]} \\ h: \text{Höhe des abgetragenen Volumens [mm]} \end{array} \quad (26)$$

Gleichsetzen von (25) und (26) führt auf:

$$h = \eta \cdot \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot \frac{I}{A} \cdot t_P \cdot t_{\text{on}} \cdot f \quad (27)$$

$$v_f = \frac{h}{t_p} \quad v_f: \text{Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]} \quad (28)$$

$$J = \frac{I}{A} \quad (29)$$

Einsetzen von (28) und (29) in (27) führt auf:

$$J = \frac{z}{\eta} \cdot \left(\frac{\rho \cdot F}{M} \cdot \frac{v_f}{t_{on} \cdot f} \right) \quad (30)$$

Wird also etwa mit dem Ziel einer gleichmäßigeren Spaltausbildung eine niedrigere Frequenz verwendet, muss auch der Vorschub im gleichen Maße verringert werden, um dieselbe Stromdichte zu erreichen. Eine Erhöhung des Vorschubs führt zu einer linearen Steigerung der Stromdichte, vorausgesetzt, dass sich der Reaktionsmechanismus nicht ändert. Abbildung 4.10 zeigt den Einfluss der Impulszeit und der Frequenz auf die Stromdichte bei der Bearbeitung von Kupfer für eine theoretische Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 0,05 \text{ mm/min}$, eine Wertigkeitsänderung von $z = 2$ und einen Wirkungsgrad von $\eta = 100 \%$.

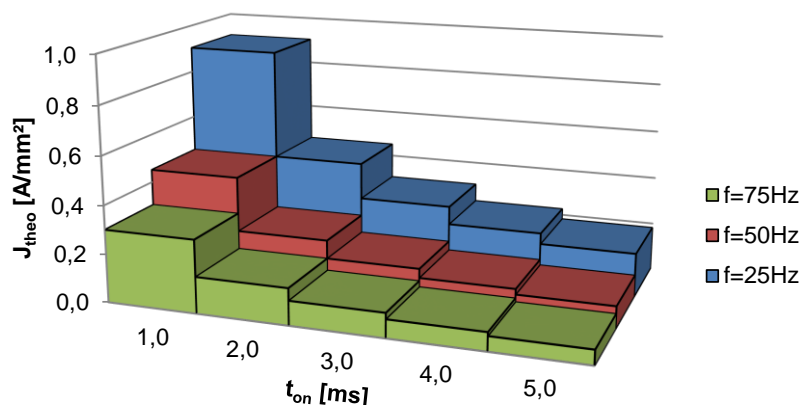


Abbildung 4.10: Einfluss von Impulszeit und Bearbeitungsfrequenz auf die Stromdichte [198]

Die Interaktion der Parameter ist komplex und der in Gleichung (30) vorgestellte Faktor z/η wird benötigt, um etwaige Änderungen der Wertigkeit und Passivation zu berücksichtigen. Da sowohl z als auch η von der Stromdichte selbst abhängen, ist eine Berechnung der genauen Stromdichte analytisch quasi nicht möglich. Wird die gemessene Stromdichte durch den bekannten Klammersausdruck dividiert, lässt sich der unbekannte Faktor z/η berechnen. Abbildung 4.11 stellt z/η über die reale Stromdichte am Beispiel von $t_{on} = 2 \text{ ms}$ dar. Für Stromdichten über $J \approx 0,2 \text{ A/mm}^2$ pendelt sich der Faktor bei ca. 2 ein, für Werte darunter ist er nicht eindeutig identifizierbar. Das bedeutet, dass sich das Verhältnis entweder durch Wechsel in der Wertigkeit und/oder im Wirkungsgrad ändert, wofür ein Wechsel im Reaktionsmechanismus ursächlich sein kann. Zudem weisen die Unterschiede zwischen den Kurven auf eine Spannungsabhängigkeit des Reaktionsmechanismus hin.

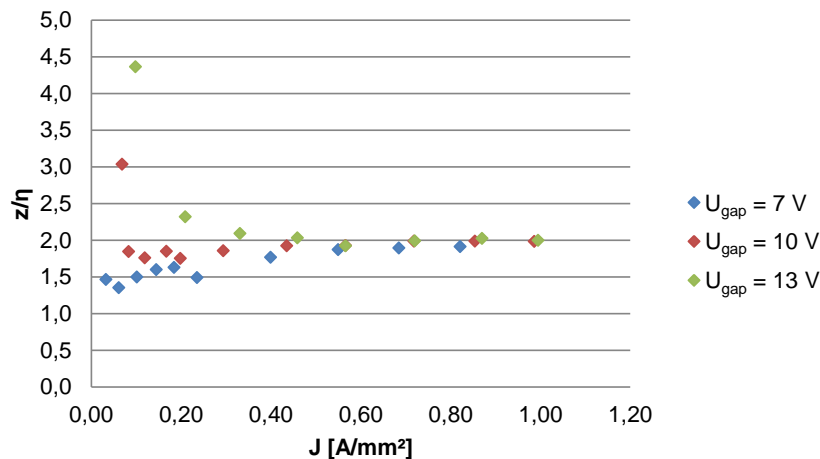
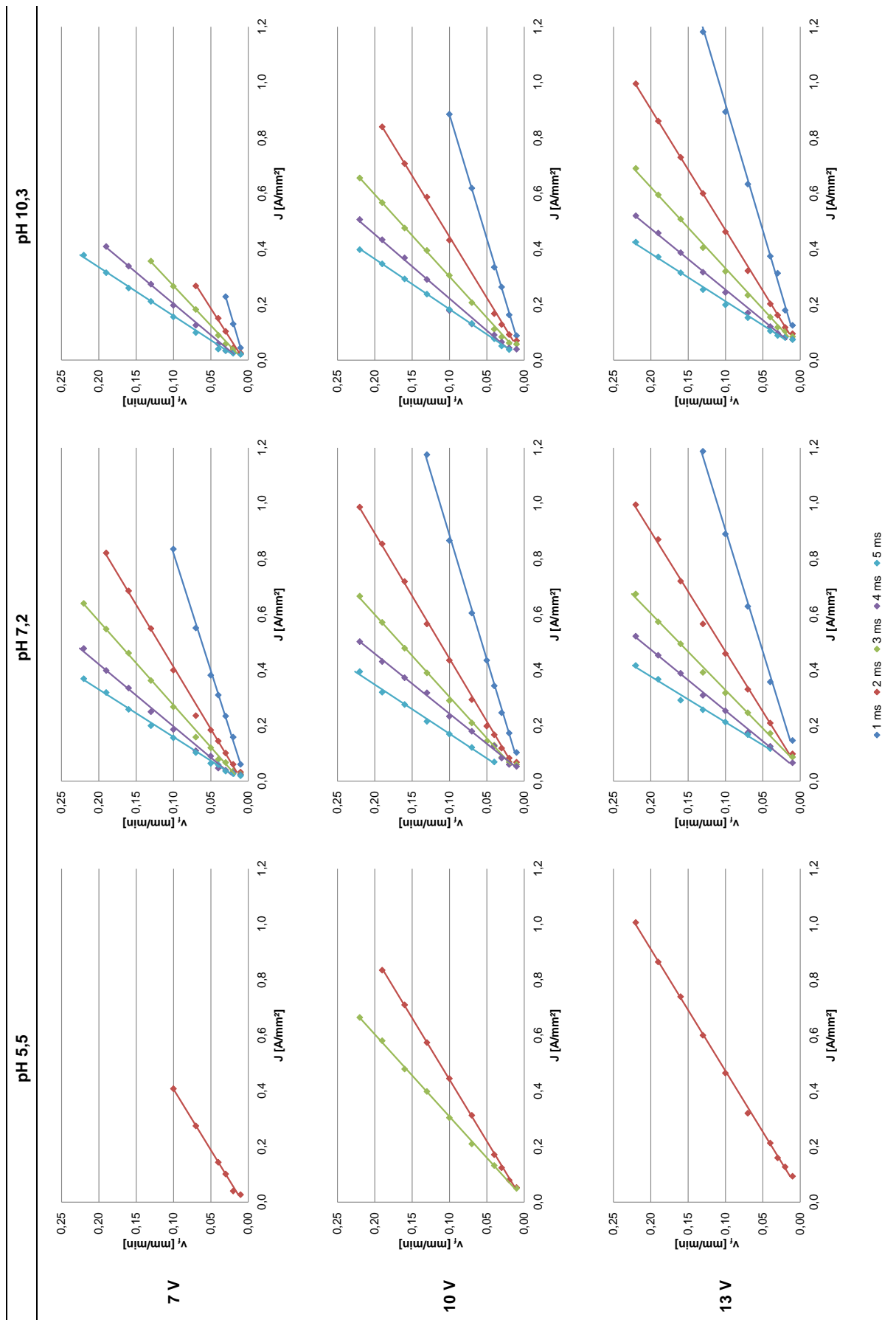


Abbildung 4.11: Änderung der praktischen zur theoretischen Stromdichte

In Tabelle 4.6 ist der Zusammenhang von Vorschub und Stromdichte dargestellt. Die Stromdichte ist auf der x-Achse aufgetragen, da sie im Weiteren als Vergleichsbasis dient. Wie aus Gleichung (30) hervorgeht, wächst die Stromdichte linear mit dem Vorschub, wenn keine Änderung im Faktor z/η auftritt. Mit zunehmender Impulszeit wird die Stromdichte geringer, da aufgrund der Materialauflösung innerhalb der Impulszeit der Spalt wächst und der somit steigende elektrische Widerstand zu einem Absinken des mittleren Stroms führt. Der Einfluss der Impulszeit ist umgekehrt proportional zur Stromdichte, sodass die Differenz zwischen den erreichten Stromdichten mit zunehmender Impulszeit geringer wird, was am kleiner werdenden Abstand zwischen den eingezeichneten Regressionslinien für längere Impulse erkennbar ist.

Weist diese Abhängigkeit wie hier eine lineare Charakteristik auf, deutet dies auf einen konstanten Reaktionsmechanismus, also eine konstante Wertigkeitsänderung hin. Bezogen auf die Klassifizierung charakteristischer Vorschub-Stromdichte-Kennlinien nach [68] kann Kupfer dem Typ A zugeordnet werden, dessen direkte Proportionalität zwischen der Abtragsgeschwindigkeit und der Stromdichte auf einen festen, von der Stromdichte unabhängigen Abtragsmechanismus hinweist. Dies gilt im vorliegenden Fall für jede Kombination aus pH, U, t_{on} und v_f . Der zuvor beschriebene Wechsel im Reaktionsmechanismus ist in dieser Darstellung nicht identifizierbar, wird jedoch in den weiteren Ergebnissen bestätigt.

Tabelle 4.6: Stromdichte unter dem Einfluss von Vorschub, Impulszeit und pH-Wert



Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf die Stromdichte

In Abbildung 4.12 ist der Einfluss des pH-Werts, der Spannung und der Impulszeit auf die Stromdichte zu sehen. Die blauen Werte entsprechen dabei den niedrigsten Stromdichten, die bei $v_f = 0,01$ mm/min erreicht werden, für die grünen Werte wurde der Vorschubwert von $v_f = 0,19$ mm/min gewählt, da höhere Vorschübe nicht durchgängig für alle pH-Werte vorliegen. Die Bandbreite zwischen den blauen und grünen Datenreihen ergibt sich hier und in den folgenden Abbildungen aus den verschiedenen Vorschüben und aus den damit in erster Linie erreichten unterschiedlichen Stromdichten. In Rot ist wiederum der Mittelwert aller Daten der entsprechenden Versuchsreihe dargestellt.

Der Einfluss des pH-Werts ist vor allem für niedrige Stromdichten bemerkbar. So beträgt die Stromdichte beim niedrigsten Vorschub und pH 5,5 nur ca. 75,3 % der Stromdichte bei pH 10,3. Diese Differenz wird für steigende Vorschübe sehr schnell kleiner, sodass ab Stromdichten von ca. $0,12$ A/mm² die Abweichungen der Werte nur noch ca. 1–2 % betragen und so keine pH-bedingten Unterschiede mehr auftreten. Die Durchführung einer ANOVA bestätigt die Unabhängigkeit der Stromdichte vom pH-Wert mit $p = 0,764$ bis $p = 1,000$. Als Nullhypothese liegt dabei zugrunde, dass die unterschiedlichen pH-Werte die gleichen Stromdichten liefern.

Für die gleiche Vorschub-Impulszeit-Kombination wird mit höherer Spannung eine höhere Stromdichte erreicht. Damit zeigt sich eine Abhängigkeit, die in Gleichung (30) nicht erkennbar ist. Der Zusammenhang ist statistisch signifikant ($p = 0,087$ für pH 5,5; $p = 0,002$ für pH 7,2; $p = 0,000$ für pH 10,3) und deutlich linear mit $R^2 = 0,974$ – $0,999$ und einer Steigung von im Mittel $0,023$ [A/(mm²·V)]. Der gegenüber dem Wert von $\alpha = 0,05$ leicht zu hohe Wert für pH 5,5 kann mit einem gegenüber den anderen Werten viel geringeren Stichprobenumfang erläutert werden (Anzahl der Versuche insgesamt: 35 für pH 5,5; 250 für pH 7,2; 138 für pH 10,3). Aufgrund der Selbstregulierung des elektrochemischen Abtragsprozesses sollte eine höhere Spannung zu einem größeren Spalt bei gleicher Stromdichte für dieselbe Vorschub-Impulszeit-Kombination führen. D. h. in den vorliegenden Untersuchungen verändert sich die Spaltweite nicht so stark, wie es aufgrund der geänderten Spannung zu erwarten wäre. Der Grund dafür könnte eine spannungsabhängige Auflösung von Kupfer, die zu anderen Spaltweiten führt, bzw. die spannungsabhängige Ausbildung unterschiedlich dicker Passivschichten sein. Auch hier ist dies vor allem für kleine Vorschübe deutlich. So beträgt die Stromdichte für $v_f = 0,01$ mm/min bei 7 V nur ca. 27,2 % der Stromdichte bei 13 V. Ab einem Vorschub von $v_f = 0,10$ mm/min liegt die Abweichung dann recht konstant bei 4 %.

Der Einfluss der Impulszeit auf die Stromdichte lässt sich wie aufgrund von Gleichung (30) zu erwarten mit einer Potenzfunktion und $R^2 = 0,98$ – $1,00$ sehr gut approximieren, sodass eine längere Impulszeit zu niedrigeren Stromdichten führt. Auch hier führt der geringe Stichprobenumfang zu fehlerhaften p-Werten für pH 5,5, jedoch bestätigen die Werte $p = 0,004$ für pH 7,2 und $p = 0,017$ für pH 10,3, dass die Impulszeit einen signifikanten Einfluss auf die Stromdichte hat.

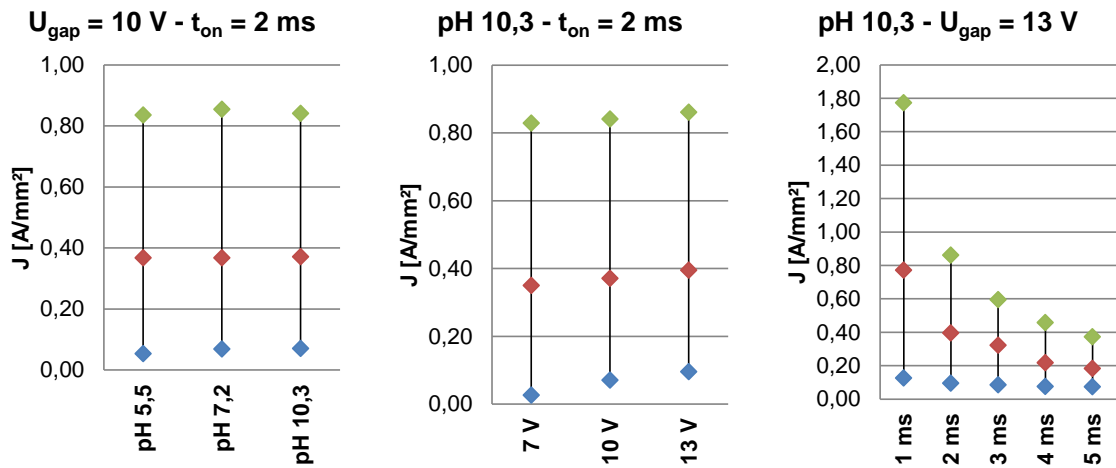


Abbildung 4.12: Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf die Stromdichte

Die Konturdiagramme über verschiedene Kombinationen von Vorschub, Impulszeit und Spannung illustrieren die Zunahme der Stromdichte mit höherem Vorschub, kleineren Impulszeiten ebenso wie mit steigender Spannung. Im letzten Konturdiagramm wird die Unabhängigkeit vom pH-Wert am vertikalen Verlauf der Übergänge sichtbar. Der bei ca. pH 8,5 dargestellte Einbruch im letzten Konturdiagramm ergibt sich aus rechentechnischen Gründen der programminternen Dateninterpolation.

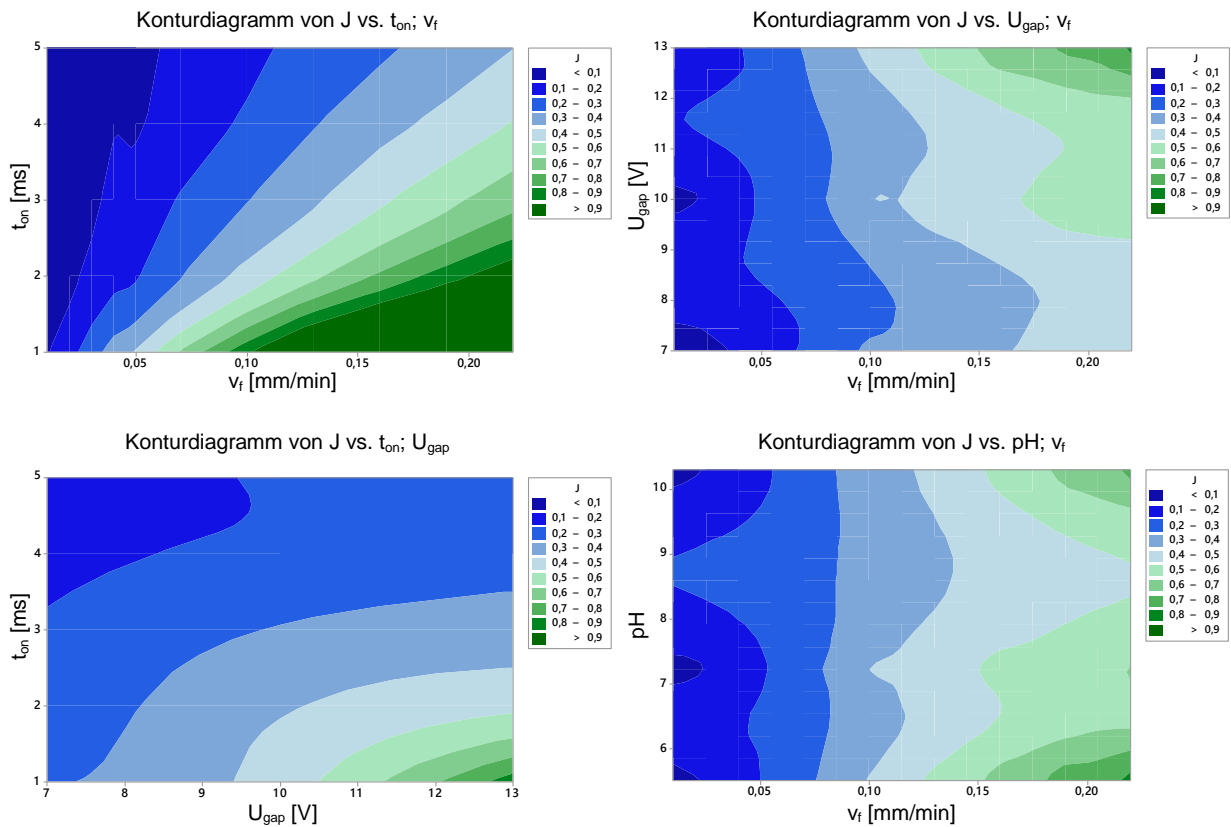


Abbildung 4.13: Konturdiagramme zur Stromdichte

Fazit

- Stromdichte und Vorschub stehen in linearem Zusammenhang.
- Der pH-Wert hat keinen signifikanten Einfluss auf die Stromdichte.
- Die Spannung hat einen linearen Einfluss auf die für eine bestimmte Vorschub-Impulszeit-Kombination erreichte Stromdichte.
- Die Impulszeit hat einen signifikanten Einfluss auf die erreichbare Stromdichte.

Beschreibungsmodell

Der lineare Zusammenhang zwischen Vorschub und Stromdichte lässt sich für jede Kombination aus Spannung und Impulszeit mittels linearer Regression in folgender Form beschreiben:

$$J = m(U_{\text{gap}}, t_{\text{on}}) \cdot v_f + b(U_{\text{gap}}, t_{\text{on}}) \quad (31)$$

Dabei stellt m als Steigung das Verhältnis der Vorschubgeschwindigkeitsänderung zur Stromdichteänderung im Prozess dar. Die Verschiebung der y -Achse mittels b führt zu einer mindestens erforderlichen Stromdichte, um den Auflösprozess zu starten. Bei Betrachtung der Kurven in Tabelle 4.6 wird deutlich, dass eine Mindeststromdichte bei Kupfer quasi nicht vorhanden ist und sich das Material bereits bei kleinen Stromdichten aufzulösen beginnt. Die Faktoren m und b können dabei selbst wieder in einer Abhängigkeit von Spannung und Impulszeit stehen.

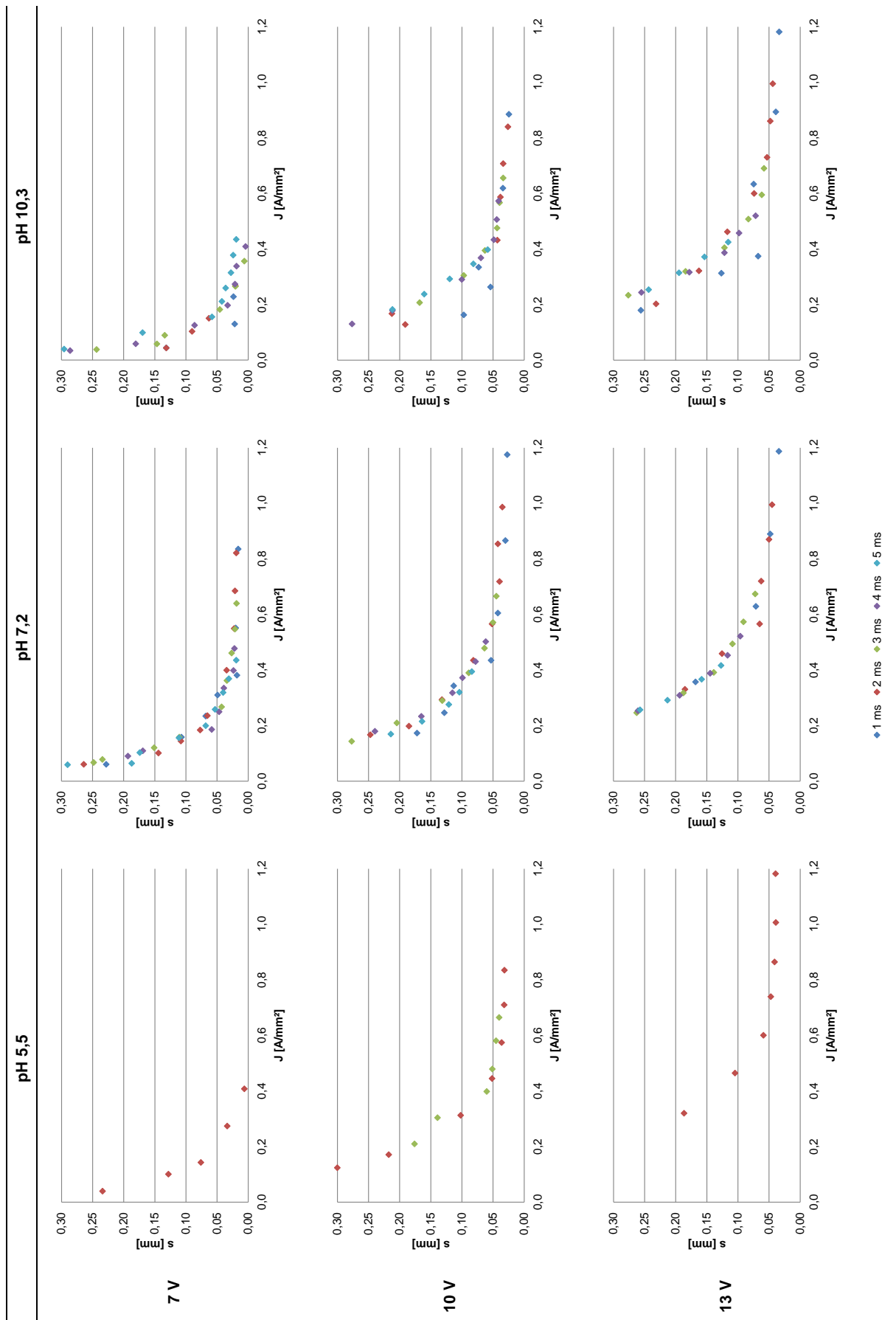
Ein empirisches Modell zur Berechnung der Stromdichte in Abhängigkeit von den Einstellparametern für pH 7,2 und mit $R^2 = 0,991$ wurde in [199] vorgestellt, siehe Gleichung (32). Der grundsätzliche lineare Zusammenhang zwischen Vorschub und erreichbarer Stromdichte ist zu erkennen, ebenso wie ein mit höherer Spannung zunehmend gedämpfter Einfluss der Impulszeit sowie der Spannung selbst.

$$J = (7,924 \cdot t_{\text{on}}^{-0,164 \cdot \ln(U_{\text{gap}}) - 0,6132}) \cdot v_f + 0,1433 \cdot \ln(U_{\text{gap}}) - 0,3081 \quad (32)$$

4.1.5 Spaltweite und Stromdichte

Mit steigendem Vorschub wird der Spalt kleiner und gleichzeitig steigt die Stromdichte. Die Abhängigkeit der Spaltweite von der Stromdichte folgt dabei einer Potenzfunktion, siehe Tabelle 4.7. Zu erkennen ist, dass die Spaltweite proportional zur angelegten Spannung und umgekehrt proportional zur Stromdichte ist, wie auch aus Gleichung (10) hervorgeht. Wird die Stromdichte als Basis genommen, ist der Einfluss der Impulszeit nicht direkt erkennbar. Jedoch führt eine längere Impulszeit zur Auflösung eines größeren Materialvolumens während des Impulses und somit zu einem größeren Spalt.

Tabelle 4.7: Spaltweite unter dem Einfluss von Vorschub, Impulszeit und pH-Wert



Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf die Spaltweite

Um den Einfluss des pH-Wertes auf die Spaltweite zu ermitteln, muss die Stromdichte berücksichtigt werden. Da der pH-Wert keinen signifikanten Einfluss auf die Stromdichte hat, wird diese zur statistischen Beurteilung gemittelt, damit die Spaltweite der verschiedenen pH-Werte auf denselben Stromdichtewert bezogen wird. Der Effekt des pH-Wertes auf die Spaltweite ist vor allem bei niedrigen Stromdichten zu bemerken und wird mit zunehmender Stromdichte geringer, sichtbar an den grünen Werten für einen Vorschub von $v_f = 0,01$ mm/min. Für höhere Stromdichten verkleinern sich die Spaltweiten für pH 5,5 etwas mehr als für pH 7,2, sodass der neutrale pH-Wert die größten Spaltweiten liefert, wie an den roten und blauen Reihen in Abbildung 4.14 zu erkennen ist. Im Schnitt ist der Spalt der verglichenen Werte:

- bei pH 5,5 ca. 12 % kleiner als bei pH 7,2
- bei pH 5,5 ca. 16 % größer als bei pH 10,3
- bei pH 10,3 ca. 22 % kleiner als bei pH 7,2

Dass die Spaltweite bei vergleichbaren Stromdichten bei höherem pH-Wert etwas kleiner ausfällt, lässt sich mit stabileren Oxidschichten erklären. Unerwartet ist, dass auch bei niedrigerem pH-Wert im Verhältnis kleinere Spaltweiten auftreten, da in saurer Umgebung eine stärkere Auflösung erwartbar wäre. Wie erwartet, hat die Spannung einen signifikanten Einfluss auf die Spaltweite ($p = 0,784$ für pH 5,5; $p = 0,017$ für pH 7,2; $p = 0,037$ für pH 10,2). Der gegenüber $\alpha = 0,05$ viel zu hohe Wert für pH 5,5 muss wieder mit einem gegenüber den anderen Werten geringeren Stichprobenumfang erklärt werden. Die Spaltweite steht unmittelbar mit der Stromdichte in Zusammenhang. Innerhalb einer bestimmten Vorschub- und Spannungs-kombination hat die Impulszeit jedoch einen großen Einfluss auf die Stromdichte und damit die Spaltweite. Die Aufweitung des Spalts für längere Impulszeiten ist eindeutig erkennbar und mit Werten von $p < 0,004$ statistisch signifikant.

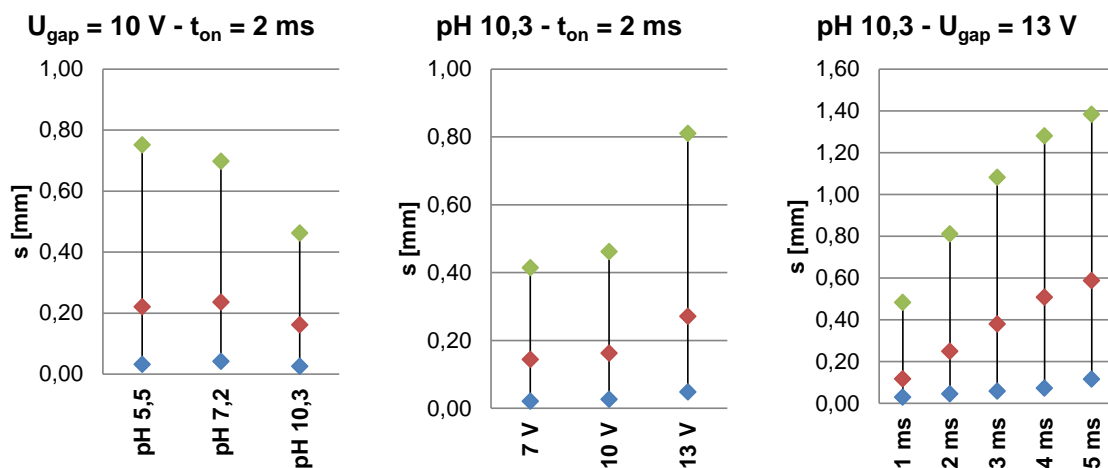


Abbildung 4.14: Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf die Spaltweite

Die Konturdiagramme über alle Werte von Vorschub, Impulszeit und Spannung illustrieren die Abnahme der Spaltweite mit höherem Vorschub, kleineren

Impulszeiten und geringerer Spannung. Das Zusammenspiel von Spannung und Impulszeit bei der Spaltbildung wird im dritten Konturdiagramm deutlich. Im Konturdiagramm von Vorschub und pH wird das Absinken der Spaltweite gegenüber pH 7,2 bei höheren Stromdichten sichtbar.

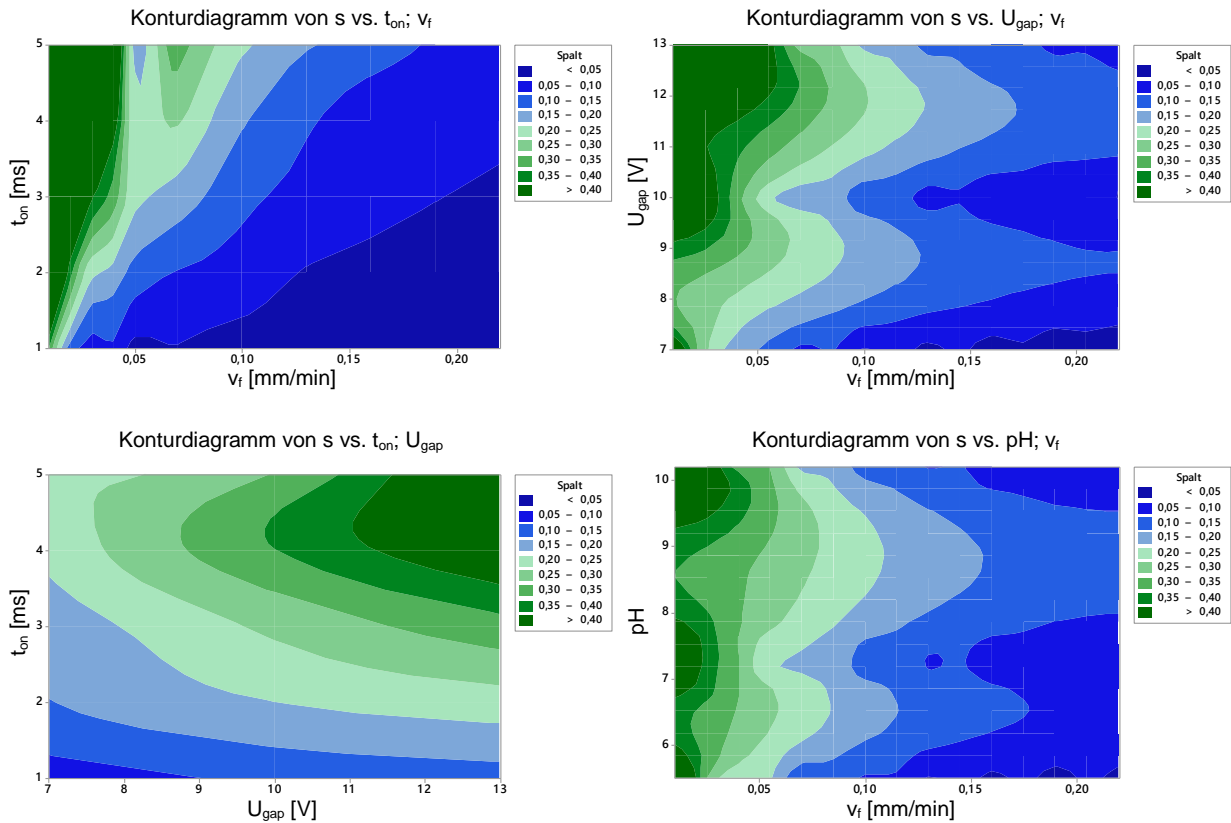


Abbildung 4.15: Konturdiagramme zur Spaltweite

Fazit

- Der pH-Wert hat einen Einfluss auf den Spalt und führt bei pH 7,2 zu den größten und bei pH 10,3 zu den kleinsten Spaltweiten.
- Die Spannung hat einen signifikanten Einfluss auf die für eine bestimmte Vorschub-Impulszeit-Kombination erreichte Spaltweite.
- Die Impulszeit hat einen signifikanten Einfluss auf die erreichbare Stromdichte.

Beschreibungsmodell

Wie aus Gleichung (10) ersichtlich wird, ergibt sich eine umgekehrte Proportionalität zwischen Spaltweite und Stromdichte $s \sim 1/J$. Die Stromdichte ergibt sich wiederum aus den bereits gezeigten Zusammenhängen. Damit lässt sich die Spaltweite mittels folgender Formel darstellen. Hier können der Skalierungsfaktor a und der Dämpfungsterm x ebenfalls von den Einstellparametern abhängen. Insgesamt muss x negativ sein, um ein Abklingen der Kurve zu gewährleisten:

$$s = a \cdot J^x \quad (33)$$

Ein empirisches Modell zur Berechnung der Spaltweite in Abhängigkeit von den Einstellparametern für $\text{pH} = 7,2$ wurde ebenfalls in [199] vorgestellt, siehe Gleichung (34). Zwar gibt das Modell mit $R^2 = 0,966$ die Form des Spalts gut wieder, es zeigt jedoch Schwächen für langsame Vorschübe. Der Spaltbildungsprozess ist komplex, da er ein Zusammenspiel der Parameter und der chemischen Reaktion des Materials ist. Während eine Erhöhung der Spannung und der Impulszeit die Spaltweite erhöht, führt eine Erhöhung des Vorschubs zu einer Verkleinerung des Spalts. Die damit einhergehende Veränderung der Stromdichte kann zu anderen chemischen Reaktionen führen.

Der grundsätzliche Zusammenhang kann mittels einer Potenzfunktion über den Vorschub beschrieben werden, wobei Dämpfung und Skalierung von der Spannung und der Impulszeit abhängen. Der pH-Einfluss wurde vernachlässigt, da dieser im Bereich der relevanten hohen Stromdichten sehr gering ist.

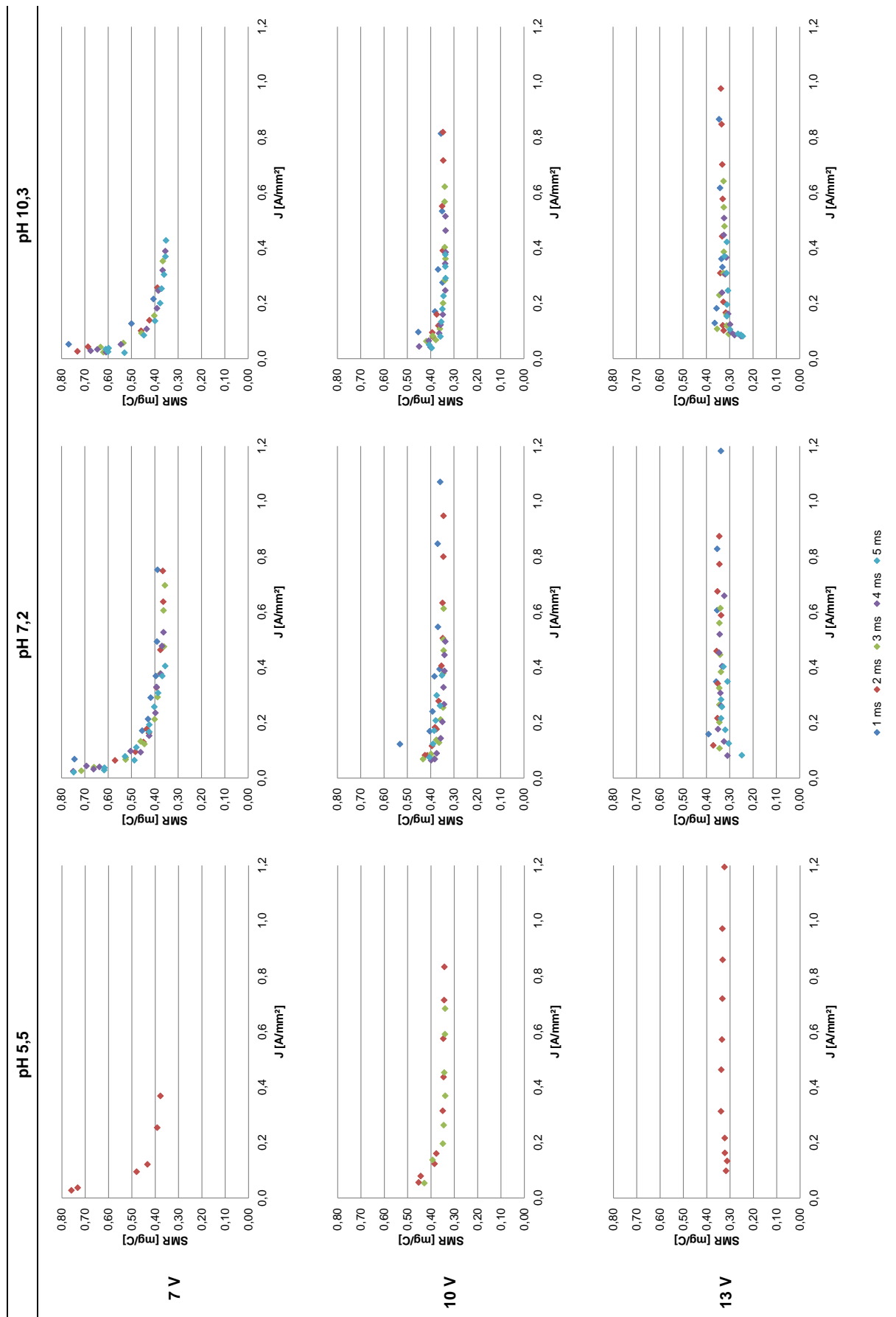
$$s = ((0,0026 \cdot U_{\text{gap}} - 0,015) \cdot \ln(t_{\text{on}}) + 0,0004 \cdot U_{\text{gap}} - 0,0019) \cdot v_f^{0,0213 \cdot t_{\text{on}} + 0,3062 \cdot \ln(U_{\text{gap}}) - 1,7798} \quad (34)$$

4.1.6 Spezifischer Materialabtrag und Stromdichte

Bei Betrachtung des spezifischen Materialabtrags von Kupfer fällt der ungewöhnliche Verlauf auf, vgl. Tabelle 4.8. Kupfer weist für niedrige Stromdichten in Verbindung mit niedriger Spannung einen hohen SMR-Wert auf. Mit steigender Stromdichte oder höheren Spannungen nimmt der Wert ab und fällt auf einen konstanten Abtrag von $\text{SMR} = 0,32\text{--}0,34 \text{ mg/C}$. Da die gemessene Rauheit für niedrige Stromdichten sehr große Werte annimmt, siehe Kapitel 4.1.7, werden sich in diesem Stromdichtebereich vermutlich größere Partikelverbände aus dem Grundmaterial ablösen und somit wird relativ viel Volumen bzw. Gewicht pro Ladung abgetragen.

Der sich je nach Kombination der Eingangsparameter ab Stromdichten von ca. $J = 0,2\text{--}0,3 \text{ A/mm}^2$ ausbildende konstant bleibende Abtrag deutet auf einen stabilen Oxidfilm hin. Es lassen sich damit zwei Bereiche unterscheiden, die dem aktiven Bereich mit einer stromdichteabhängigen Auflösung bzw. dem transpassiven Bereich mit einer konstanten Auflösung zuzuordnen sind. Dies deckt sich mit Erkenntnissen, wonach die Kupferauflösung von einer diffusionsbestimmten in eine filmbestimmte Auflösung übergeht [162]. Die Ausprägung dieses Phänomens ist vor allem für $U_{\text{gap}} = 7 \text{ V}$ deutlich erkennbar und wird mit höherer Spannung geringer. Dies liegt an den bei höherer Spannung erreichten höheren Stromdichten und führt zu einer Verschiebung der SMR-Kurve entlang der x-Achse. Die Oxidationszahl +2 stellt bei Kupfer die stabilere dar [14], jedoch legen Untersuchungen der elektrochemischen Auflösung von Kupfer den Verdacht nahe, dass je nach Prozesssituation neben der zweiwertigen Auflösung auch weitere Wertigkeiten auftreten [158, 159, 160]. Daraus resultiert eine andere chemische Umsetzung des Materials, was eine Erklärung für die Veränderung der SMR-Werte bei gleicher Stromdichte in Abhängigkeit von der Spannung sein kann.

Tabelle 4.8: Spezifischer Materialabtrag unter dem Einfluss von Vorschub, Impulszeit und pH-Wert



Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf den spez. Materialabtrag

In Abbildung 4.16 ist der Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf den spezifischen Materialabtrag dargestellt. Um den Einfluss des pH-Wertes zu ermitteln, werden die Verhältnisse des SMR-Wertes bei denselben Kombinationen von Vorschub, Spannung und Impulszeit für die verschiedenen pH-Werte miteinander verglichen. Diese liegen im Schnitt aller Kombinationen je nach pH-Wert zwischen 0,97 und 1,04 und weichen demnach nur leicht voneinander ab. Damit hat der pH-Wert unabhängig von der Stromdichte keinen signifikanten Einfluss auf den Abtrag ($p = 0,100$).

Die Spannung hingegen hat einen statistisch signifikanten Einfluss auf den Abtrag, was der Wert von $p = 0,000$ beim Kruskal-Wallis-Test belegt. Vor allem die SMR-Werte für kleine Impulszeiten bei niedrigen Spannungen weisen sehr hohe Werte auf. Der im Mittel höhere Abtrag bei $U_{\text{gap}} = 7 \text{ V}$ ergibt sich aus den dort vorhandenen niedrigeren Stromdichten und aus der Tatsache, dass aufgrund der geringeren Spaltweiten nicht so hohe Vorschübe und damit Stromdichten erreicht werden konnten wie bei $U_{\text{gap}} = 10 \text{ V}$ bzw. $U_{\text{gap}} = 13 \text{ V}$, bei denen sich ein geringerer Abtrag einstellen würde. Die Darstellung rechts täuscht etwas, da unter Berücksichtigung aller Werte die Impulszeit statistisch gesehen keinen signifikanten Einfluss auf den SMR-Wert hat ($p = 0,550$).

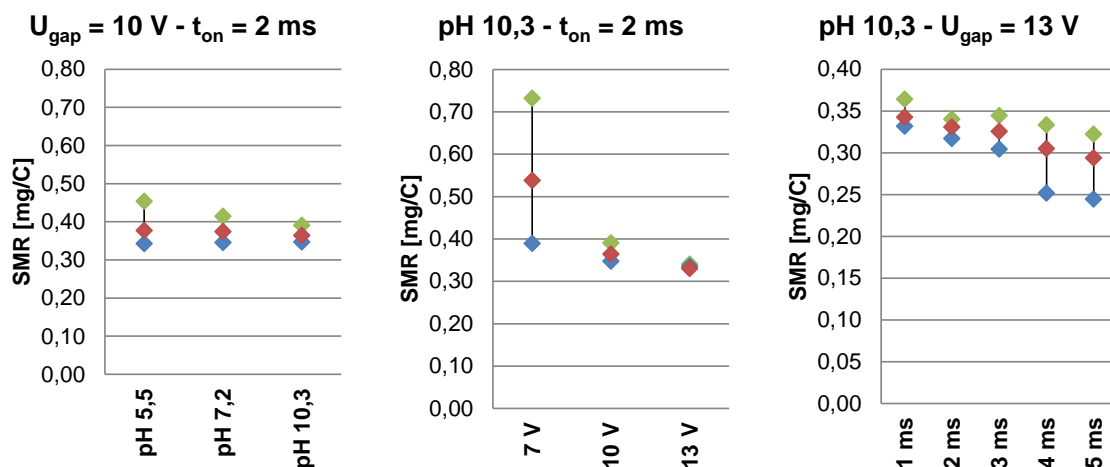


Abbildung 4.16: Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf den spezifischen Materialabtrag

Die Konturdiagramme über alle Werte von Vorschub, Impulszeit und Spannung verdeutlichen die Abnahme des Abtrags mit höherem Vorschub, kleineren Impulszeiten ebenso wie mit höherer Spannung, also insgesamt zunehmender Stromdichte. Der Einfluss der Spannung in Verbindung mit dem vernachlässigbaren Einfluss der Impulszeit wird im dritten Konturdiagramm deutlich. Das vierte Konturdiagramm verdeutlicht die Unabhängigkeit des SMR-Wertes vom pH-Wert.

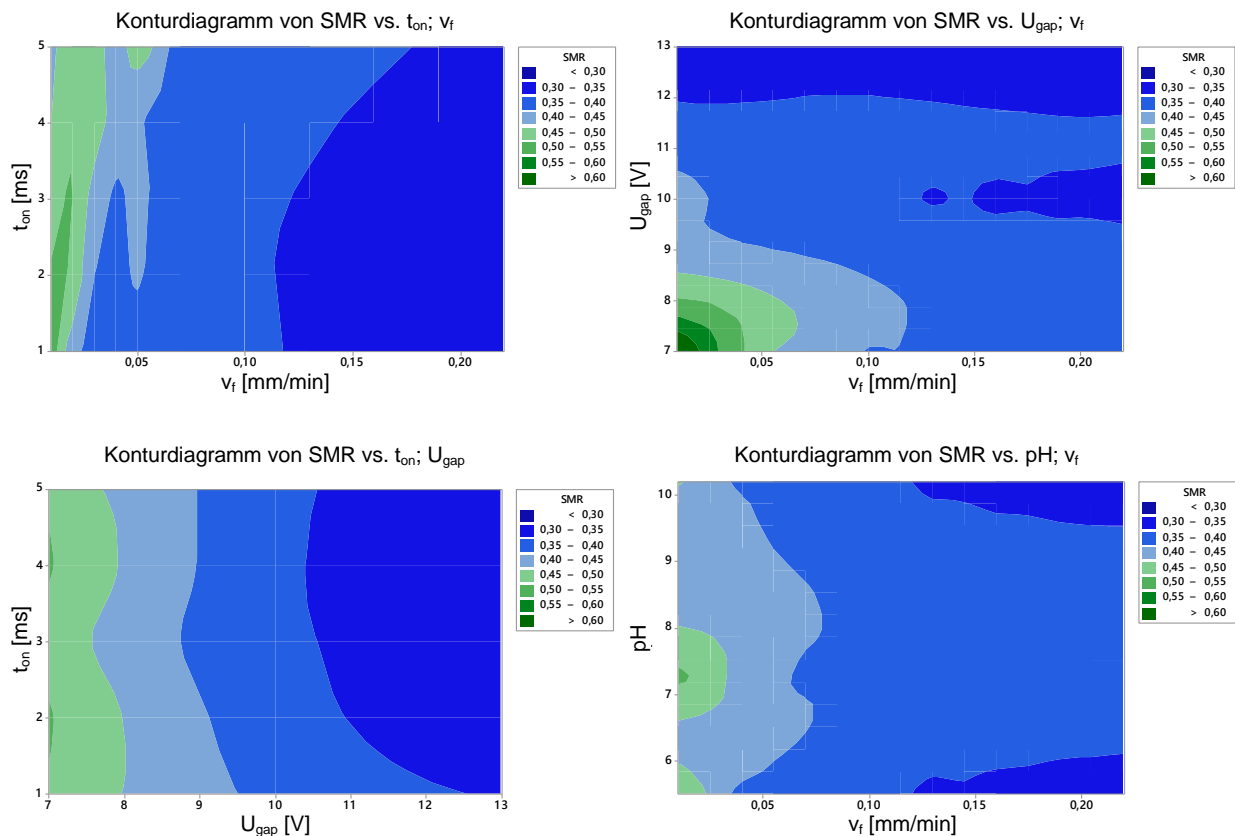


Abbildung 4.17: Konturdiagramme zum spezifischen Materialabtrag

Fazit

- Der spezifische Materialabtrag nimmt mit der Stromdichte ab und erreicht ab ca. 0,2–0,3 A/mm² einen konstanten Wert von 0,34 mg/C.
- Der pH-Wert hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf den spezifischen Materialabtrag.
- Die Spannung hat einen signifikanten Einfluss und führt bei höheren Werten zu niedrigeren SMR-Werten.
- Die Impulszeit hat keinen signifikanten Einfluss auf den spezifischen Materialabtrag.

Beschreibungsmodell

Eine Möglichkeit den Wirkungsgrad auf Basis der Stromdichte zu berechnen wurde von Altena durch Verwendung nicht-linearer Regression vorgestellt [54]. Diese Idee wurde in [199] zu einer empirischen Formel erweitert und hier nochmals leicht überarbeitet, sodass der Materialabtrag SMR [mg/C] für Kupfer auf Basis der Einstellparameter berechnet werden kann, siehe Gleichung (35). Das Modell gibt den Verlauf gut wieder, der Wert $R^2 = 0,770$ wird verursacht durch den abweichenden Verlauf der Abtragsrate für $U_{\text{gap}} = 13 \text{ V}$.

Der Kotangens hyperbolicus führt zu einem abnehmenden Verlauf der Kurve und dem Hineinlaufen in einen Grenzwert. Der Faktor a dient zum Skalieren der SMR-Werte. Der Term in der Klammer zeigt eine lineare Abhängigkeit vom Vorschub, bei der die Steigung m und die Verschiebung der x -Achse x abhängig von der angelegten Spannung ist.

$$\text{SMR} = a \cdot \coth(m \cdot v_f + x) \quad (35)$$

$$a = 0,4241 \cdot U_{\text{gap}}^{-0,09}$$

$$m = 0,6667 \cdot U_{\text{gap}} + 5,3333$$

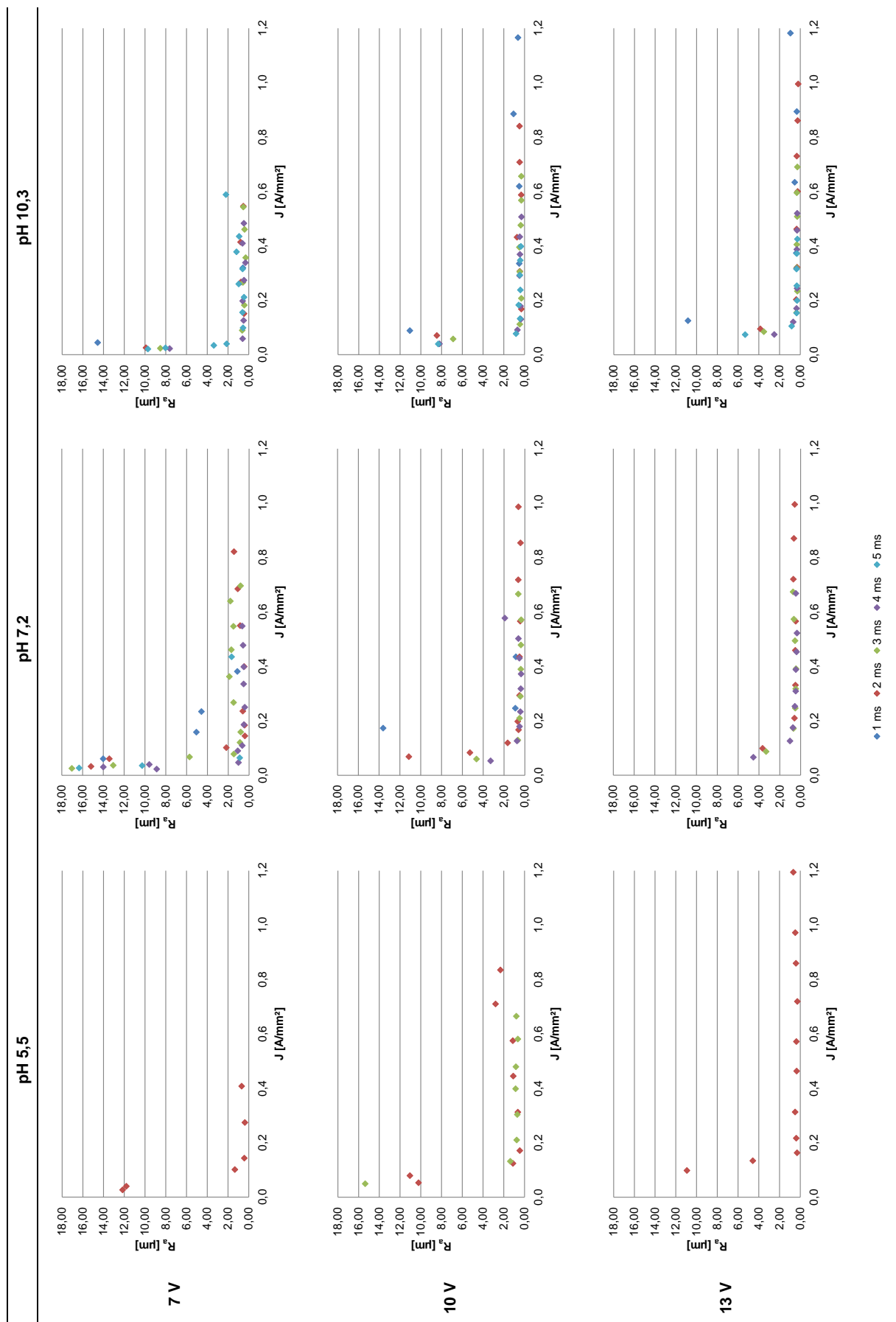
$$x = 0,0004 \cdot U_{\text{gap}}^{3,57}$$

4.1.7 Oberfläche und Stromdichte

Bezüglich der Oberfläche lassen sich zwei Bereiche unterscheiden, vgl. Tabelle 4.9. Bis zu einer bestimmten Grenzstromdichte werden sehr raue Oberflächen erzeugt, darauf folgt für höhere Stromdichten ein Abfall der Rauheit auf einen recht konstanten Wert. Diese unterschiedlichen Resultate werden dem aktiven bzw. transpassiven Auflösungsverhalten zugeschrieben. Der Übergang liegt bei $J = 0,1\text{--}0,2 \text{ A/mm}^2$, nach dem Werte zwischen $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ folgen. Die wieder leicht steigende Rauheit ab $J \approx 0,9 \text{ A/mm}^2$ liegt in schlechter werdenden Spülbedingungen aufgrund der dann sehr kleinen Spaltweite begründet.

Niedrigere Stromdichten im aktiven Bereich führen zu schlechten Oberflächen, die regelrechte Löcher aufweisen, was unter dem engl. Namen „Pitting“ bekannt ist. Dieser Effekt tritt vor allem im Stromdichtebereich von $J \approx 0,1 \text{ A/mm}^2$ auf. Bei niedrigeren Stromdichten verbinden sich die Löcher zu einer sehr rauen Oberfläche, bei höheren Werten verschwinden sie und die Oberfläche wird glatt, wie an den Aufnahmen mit 30-facher Vergrößerung in Abbildung 4.18 zu erkennen ist. Eine Erklärung für die Löcher kann in der bevorzugten Auflösung von Körnern entlang der $\{100\}$ -Ebene unter der Bildung von Sauerstoff liegen [154, 159]. Die glatte Oberfläche im transpassiven Bereich entsteht durch die Ausbildung eines viskosen Films, der die Sauerstoffbildung verhindert und zu einer gleichmäßigen Oberfläche führt [154, 200]. Oxidische Einschlüsse im Kupfer können durch Unterspülen ausfallen und ebenfalls zu Pitting führen [200]. Folglich können Einschlüsse, Versetzungen und Körner bestimmter Orientierung als Startpunkt für das Pitting angesehen werden; in Verbindung mit dem höheren Abtrag bei kleinen Stromdichten entstehen ausgehend von mikroskopischen dann makroskopische Defekte.

Tabelle 4.9: Oberflächenrauheit unter dem Einfluss von Vorschub, Impulszeit und pH-Wert



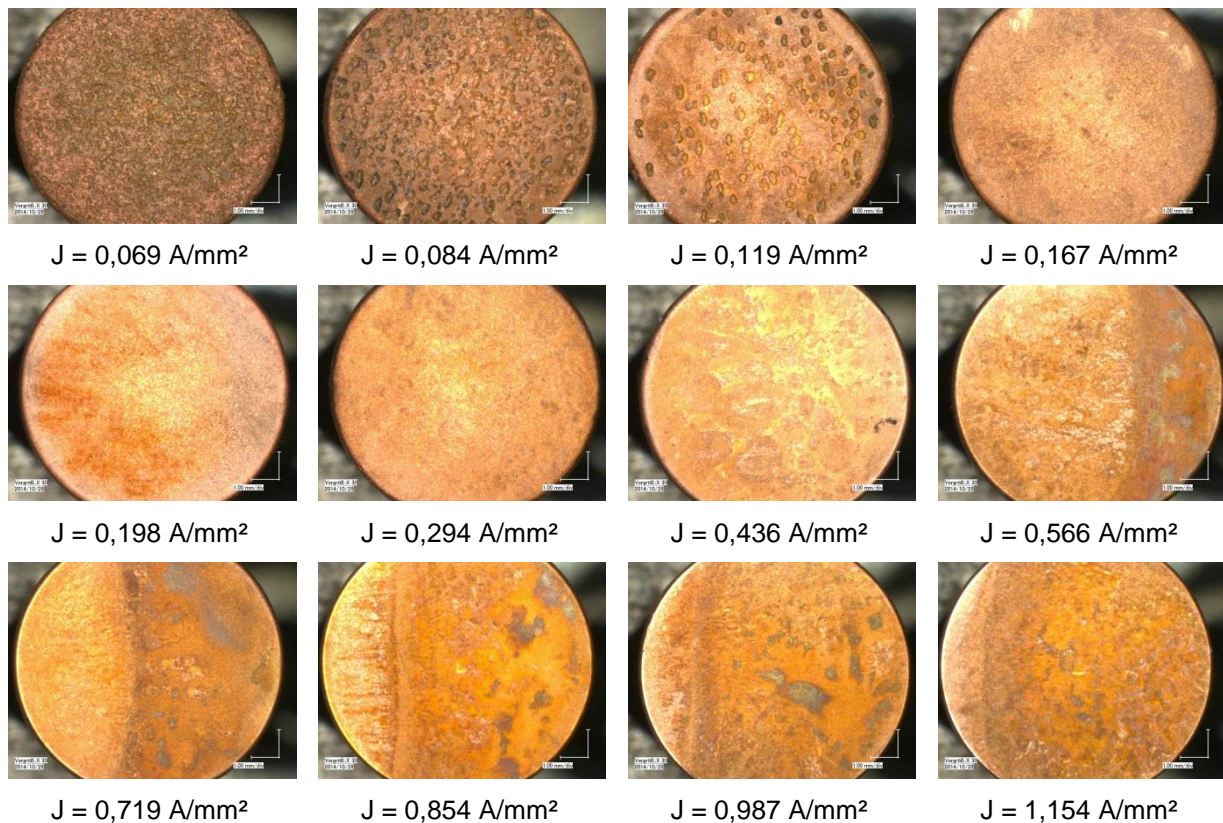


Abbildung 4.18: Oberflächenbeschaffenheit in Abhängigkeit von der Stromdichte bei
pH 7,2; $U_{\text{gap}} = 10 \text{ V}$; $t_{\text{on}} = 2 \text{ ms}$

Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf die Oberflächenrauheit

In Abbildung 4.19 ist der Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf die Oberflächenrauheit ohne die Extremwerte dargestellt. Um den Einfluss des pH-Wertes zu ermitteln, werden die Rauheitswerte bei denselben Kombinationen von Vorschub, Spannung und Impulszeit miteinander verglichen. Da die Stromdichten nicht durch den pH-Wert beeinflusst werden, ergeben sich nahezu identische Stromdichten. Die mittleren Abweichungen der Rauheitswerte untereinander zeigen, dass die Rauheit:

- bei pH 5,5 ca. 62 % größer ist als bei pH 7,2
- bei pH 5,5 ca. 96 % größer ist als bei pH 10,3
- bei pH 10,3 ca. 16 % kleiner ist als bei pH 7,2

Werden die Extremwerte für die beiden langsamsten Vorschübe bzw. niedrigsten Stromdichten entfernt, ändern sich die Prozentzahlen nur minimal. Die Berechnung für den p-Wert bleibt ebenfalls unverändert bei $p = 0,000$ und zeigt damit einen signifikanten Einfluss des pH-Wertes auf die Oberflächenrauheit.

Die Spannung zeigt ebenfalls einen signifikanten Einfluss, wobei höhere Spannungen zu kleineren Rauheiten führen ($p = 0,022$ für pH 5,5; $p = 0,000$ für pH 7,2; $p = 0,000$ für pH 10,3). Die höhere Spannung führt zu einem größeren Spalt.

Aufgrund der relativ hohen Auflösengeschwindigkeit des Kupfers entstehen schnell viele Abtragspartikel, die im größeren Spalt besser abtransportiert werden können, und es resultiert eine glattere Oberfläche. Allerdings wird durch den größeren Spalt die erreichbare Präzision verringert.

Die Impulszeit hat mit $p = 0,178$ keinen signifikanten Einfluss. Eine längere Impulszeit führt zwar zu einer Spaltaufweitung und besseren Spülbedingungen, jedoch auch zu niedrigeren Stromdichten, was vor allem im Bereich des Übergangs von aktiver zu transpassiver Auflösung zu unterschiedlichen Oberflächenrauheiten führen kann.

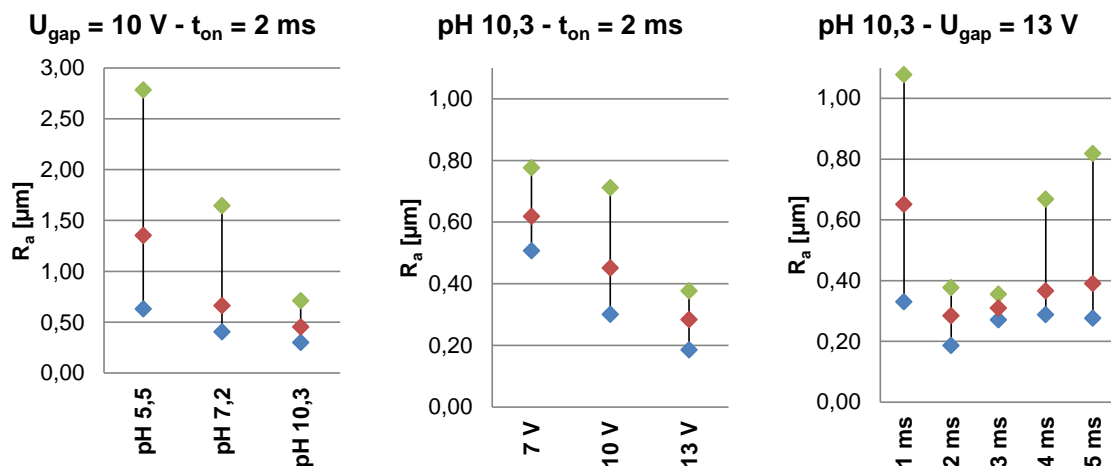


Abbildung 4.19: Einfluss von pH-Wert, Spannung und Impulszeit auf die Oberflächenrauheit

Die Konturdiagramme über alle Werte von Vorschub, Impulszeit und Spannung verdeutlichen nochmals die beschriebenen Zusammenhänge.

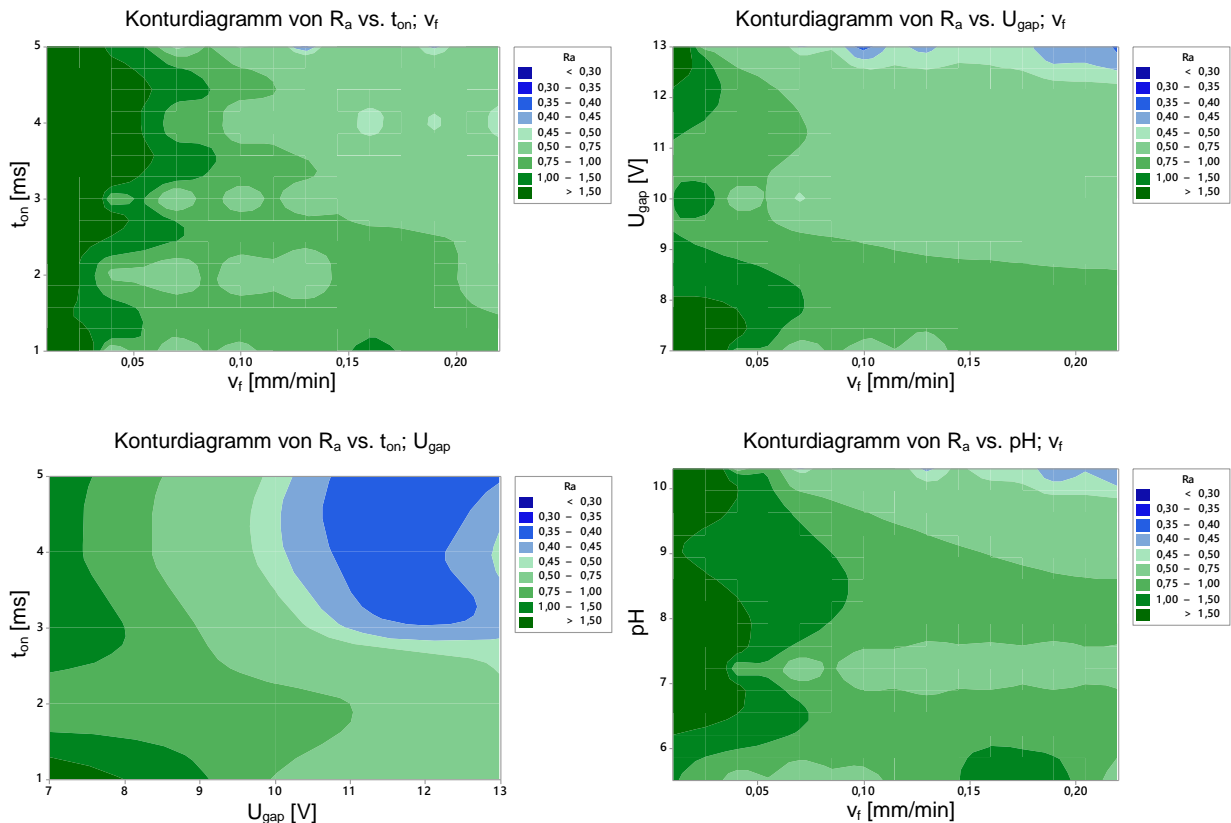


Abbildung 4.20: Konturdiagramme zur Oberflächenrauheit

Fazit

- Die Stromdichte und der Mechanismus von aktiver und transpassiver Auflösung bestimmen maßgeblich die Oberfläche.
- Der pH-Wert hat einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheit.
- Die Spannung hat einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheit.
- Die Impulszeit hat keinen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheit.

Auf die Bildung eines Beschreibungsmodells wird aufgrund der deutlich ausgeprägten Unterschiede zwischen aktivem und transpassivem Bereich verzichtet. Für die relevanten Werte pH 7,2 und pH 10,3 sind die durchschnittlichen Rauheiten im Bereich $J \geq 0,15 \text{ A/mm}^2$ in Tabelle 4.10 angegeben.

Tabelle 4.10: Durchschnittliche Kupfer-Oberflächenrauheit bei pH 7,2 und pH 10,3

R_a [μm]	$U_{gap} = 7 \text{ V}$	$U_{gap} = 10 \text{ V}$	$U_{gap} = 13 \text{ V}$
pH 7,2	1,15	0,58	0,53
pH 10,3	0,65	0,45	0,36

4.1.8 Polarisationsspannung

Zwischen der theoretisch erwarteten und der gemessenen Spaltweite existiert ein Unterschied aufgrund der Polarisationsspannung. Die passive Schicht auf den Elektroden kann als Widerstand interpretiert werden, die einen Spannungsabfall an der Grenze von Elektrode zu Elektrolyt bedingt. Dies führt dazu, dass eine kleinere Spannung zur Verfügung steht, was dann in kleineren Spaltweiten resultiert, als sie aufgrund des Ohm'schen Gesetzes zu erwarten wären. Dieser Spannungsabfall kann in Versuchen bei bekannter Leitfähigkeit als Differenz von angelegter Spannung sowie Spannungsabfall über den Elektrolyten nach dem Ohm'schen Gesetz berechnet werden. Durch Umstellen von Gleichung (10) ergibt sich:

$$U_{\text{pol}} = U_{\text{gap}} - \frac{J \cdot s}{\sigma} \quad (36)$$

Die Polarisationsspannung ist nicht konstant, sondern ändert sich in Abhängigkeit von der Stromdichte entsprechend der Prozessreaktion. Für die gleichen Kombinationen aus Vorschub, Spannung und Impulszeit werden je nach pH-Wert andere Stromdichten und Spaltweiten und damit andere Polarisationsspannungen erreicht, was für die Bildung unterschiedlich dicker passiver Schichten spricht oder für die Annahme, dass die Schichten unterschiedliche elektrische Eigenschaften aufweisen. Die nach Gleichung (36) ermittelte Polarisationsspannung enthält sowohl den anodenseitigen als auch den kathodenseitigen Spannungsabfall. Eine einfache Zuordnung des Spannungsabfalls zu den Elektroden durch gleichmäßiges Aufteilen ist jedoch nicht möglich, da sich die Bedingungen an den Elektroden unterscheiden.

Nach [54] kommt der Effekt der Polarisationsspannung nur unterhalb von Spaltweiten von $s = 100 \mu\text{m}$ zum Tragen, wobei ein linearer Zusammenhang zwischen Polarisationsspannung und Stromdichte festgestellt wurde. Daher werden zur Auswertung auch nur die entsprechenden Werte berücksichtigt. In Abbildung 4.21 sind die Werte der Polarisationsspannung über die Stromdichte für Kupfer mit einer linearen Regression und dem zugehörigen Bestimmtheitsmaß dargestellt.

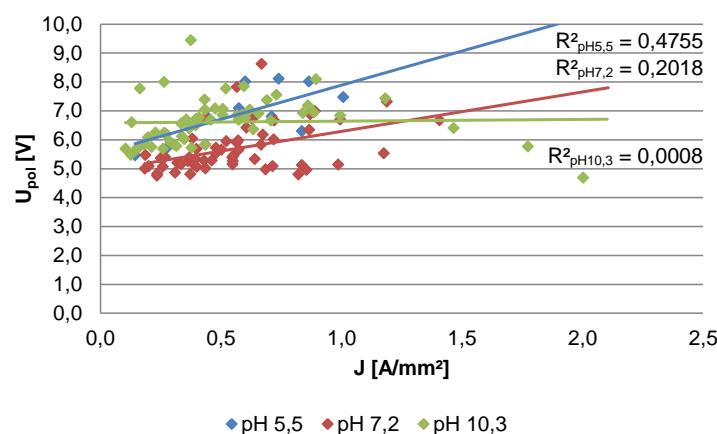


Abbildung 4.21: Polarisationsspannung in Abhängigkeit von der Stromdichte

Die Werte weisen eine starke Streuung auf, sodass sich für sehr ähnliche Stromdichten unterschiedliche Polarisationsspannungen ergeben. Für den gewählten Aufbau und die durchgeführten Versuche kann keine zufriedenstellende Regression ermittelt werden. Da die Stromdichte unabhängig vom pH-Wert ist, lassen sich die Unterschiede in der Polarisationsspannung zwischen den pH-Werten nur erklären, wenn sich pH-abhängige Schichten ausbilden. Als einzige freie Variable bei ansonsten gleichen Randbedingungen (U_{gap} und σ) verbleibt die Spaltweite. Die Polarisationsspannung für pH 7,2 erscheint tendenziell am kleinsten, damit steht dem Prozess die größte Prozessspannung (nämlich $U_{\text{gap}} - U_{\text{pol}}$) zur Verfügung und damit sollten sich die größten Spaltweiten bilden, entsprechend umgekehrt gilt das für pH 5,5 und pH 10,3, wie bereits in Kapitel 4.1.5 gezeigt wurde.

Dass die Polarisationsspannung neben den Prozessbedingungen auch von der Materialpaarung abhängt, ist in Abbildung 4.22 zu sehen. Dort wurden Versuche mit Elektrolytkupfer (CW004A) als Kathode bei $U_{\text{gap}} = 10 \text{ V}$ und $t_{\text{on}} = 2 \text{ ms}$ durchgeführt.

Der Mittelwert für die Paarung 1.4571–CW004A beträgt $U_{\text{pol}} = 5,67 \text{ V}$ und für CW004A–CW004A $U_{\text{pol}} = 6,43 \text{ V}$, die Standardabweichung liegt für beide Materialpaarungen bei identischen $0,944 \text{ V}$, dabei sind die Werte nicht normalverteilt. Mit einem p-Wert von $p = 0,040$ zeigt der Kruskal-Wallis-Test, dass sich die Mediane der Polarisationsspannungen voneinander unterscheiden. Das bedeutet, dass der Anodenwerkstoff einen signifikanten Einfluss auf die Polarisationsspannung und damit den Bearbeitungsprozess hat.

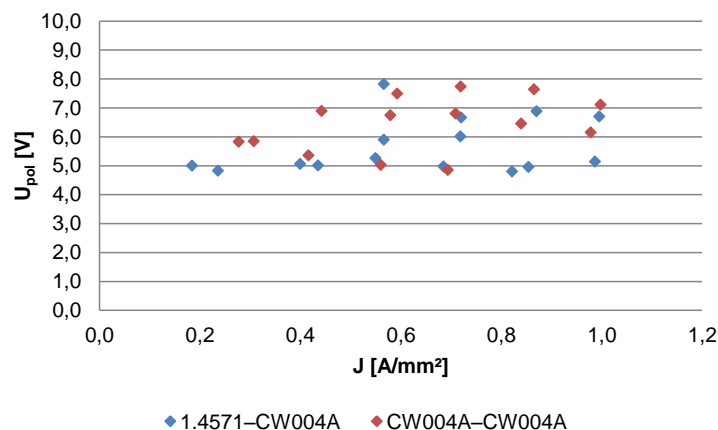


Abbildung 4.22: Einfluss der Materialpaarung auf die Polarisationsspannung

Die Polarisationsspannung muss bei der Prozessauslegung berücksichtigt werden, wenn ein definierter Arbeitsspalt zu erreichen ist. Die Bestimmung der Polarisationsspannung auf dem gezeigten Wege ist prinzipiell möglich, jedoch ergibt sich bei der schnellen Kupferauflösung das Problem, dass sich bereits während eines einzelnen Impulses die Spaltweite und damit die über dem Elektrolyt abfallende Spannung sowie die Stromdichte stark ändern. Daher wird die Polarisationsspannung im behandelten Stromdichtebereich am besten über den Mittelwert repräsentiert.

4.1.9 Fazit und Festlegen einer Bearbeitungsstrategie

Fazit

In Tabelle 4.11 ist nochmals in Matrixform dargestellt, welche Eingangsparameter bei dem verwendeten Versuchsaufbau einen signifikanten Einfluss auf welchen Ausgangsparameter haben.

Der dominierende Effekt von Vorschub und Spannung ergibt sich durch die bestimmende Wirkung auf die Stromdichte. Ebenso beeinflusst die Impulszeit die Stromdichte. Der Einfluss der Impulszeit auf die Stromdichte und den Spalt ergibt sich durch die schnelle Auflösung. Bereits während des Impulses ändert sich die Spaltweite und damit die Stromdichte. Dagegen beeinflussen die Phase und der Druck hauptsächlich die Oberflächenrauheit aufgrund der Beeinflussung der Spülbedingungen im Prozess. Der pH-Wert wirkt sich signifikant auf die Spaltweite und die Oberfläche aus, was in der Bildung unterschiedlich stabiler passiver Schichten begründet sein dürfte. Der Wahl der Anfangsspaltweite kommt aufgrund der Auflösungscharakteristik eine hohe Bedeutung zu.

Tabelle 4.11: Signifikanz der Eingangsparameter auf die Ausgangsparameter

		Ausgangsparameter			
		Stromdichte	Spaltweite	Spez. Materialabtrag	Rauheit
Eingangsparameter	Phase	x	x	x	✓
	Druck	x	x	x	✓
	Vorschub	✓	✓	✓	✓
	Spannung	✓	✓	✓	✓
	Impulszeit	✓	✓	x	x
	pH-Wert	x	✓	x	✓

Festlegen einer Bearbeitungsstrategie

Werden strukturierte Elektroden eingesetzt, können auf dem Werkstück an Stellen niedriger Stromdichte, verursacht beispielsweise durch nicht-isolierte Seitenflächen der Elektroden, raue Oberflächen entstehen. Um dies zu verhindern, kann nach der Formgebung (Strukturierung) ein zweiter Bearbeitungsschritt zur Glättung bzw. Politur der Oberfläche (Polieren) durchgeführt werden. Dazu muss die Elektrode auf eine möglichst gleichmäßige Spaltweite zurückgezogen und eine gewünschte Stromdichte für eine gewisse Zeit aufgeprägt werden. Dies stellt eine große Herausforderung dar, denn die Kenntnis bzw. die Definition und das Einstellen eines gleichmäßigen Spalts sind je nach Kathodengeometrie nicht möglich.

Definition von Strukturierungsparametern

Abbildung 4.23 zeigt qualitativ die Zusammenhänge bezogen auf die Stromdichte bei der Parameterauswahl für $P = 80 \%$, $p_{EL} = 200 \text{ kPa}$ und $\text{pH } 10,3$. Die Zusammenhänge im Einzelnen sind Tabelle 4.6 bis Tabelle 4.9 zu entnehmen. Zu

erkennen ist ein nicht näher bestimmbarer Bereich bei sehr niedrigen Stromdichten, in dem beim verwendeten Versuchsaufbau keine Daten ermittelt werden konnten. Der grau schraffierte Bereich bietet keine reproduzierbaren Prozessbedingungen, sodass keine präzise Bearbeitung möglich ist, und ist als nicht empfehlenswert für die Kupferbearbeitung anzusehen. Ab Stromdichten von $J \geq 0,2 \text{ A/mm}^2$ werden glatte Oberflächen erzielt, die mit steigender Stromdichte zunehmend besser werden. Die zur präzisen Geometrieübertragung benötigten kleinen Spaltweiten ($s \leq 100 \mu\text{m}$) schränken die wählbaren Parameterkombinationen weitgehend ein. In Abhängigkeit von einer bestimmten Spannung und Impulszeit ergibt sich dann eine bestimmte Vorschubgeschwindigkeit, vgl. das gestrichelt eingezeichnete Beispiel, bei dem eine Spannung von $U_{\text{gap}} = 13 \text{ V}$ gänzlich ungeeignet erscheint. Je länger die Impulszeit gewählt wird, desto schneller arbeitet der Prozess. Der spezifische Abtrag ist für höhere Stromdichten kleiner, daher ist ein Kompromiss zu finden zwischen kleiner Spaltweite und niedrigem Abtrag bei der Gefahr eines Kurzschlusses bzw. größerer Spaltweite und höherem Abtrag bei abnehmender Präzision. Dabei bietet der Wert pH 10,3 aufgrund kleinerer Spaltweiten bei gleichen Stromdichten und Spannungen Vorteile bzgl. der Abbildungstreue.

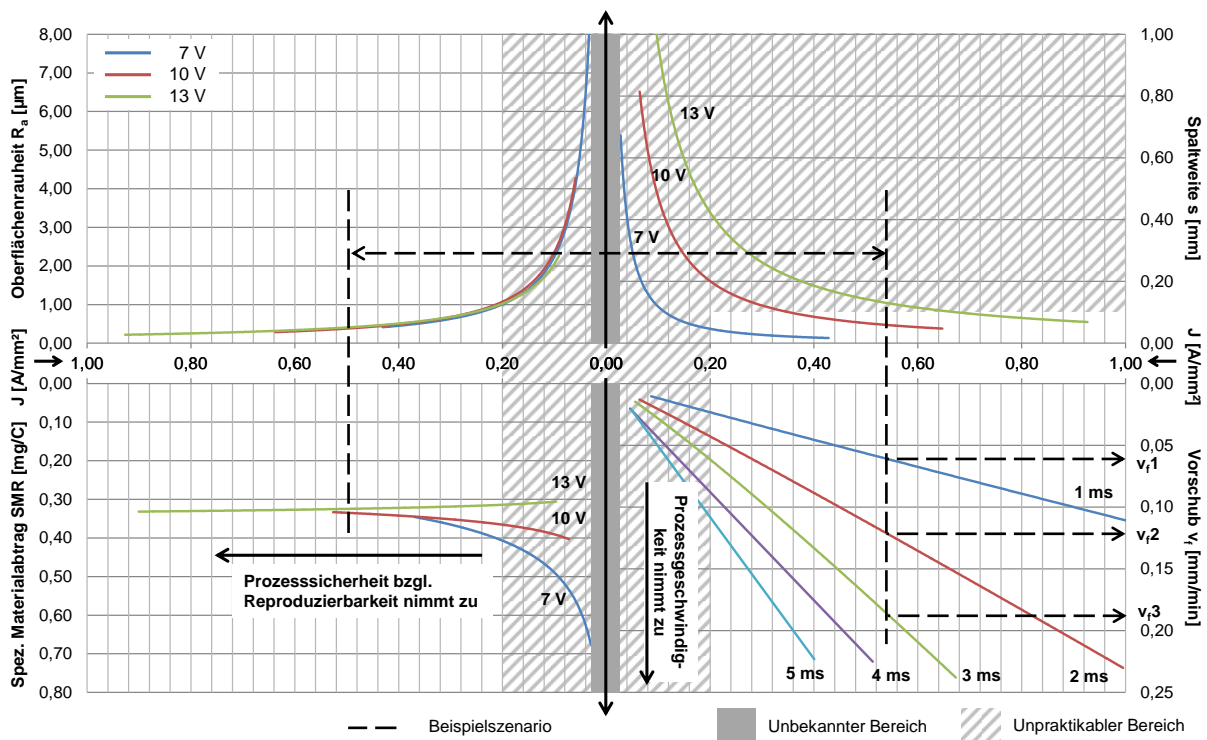


Abbildung 4.23: Parameterauswahl für die Strukturierung

Definition von Polierparametern

Um die Oberfläche in einem zweiten Schritt zu glätten (Polierschritt), wird eine zu definierende möglichst hohe Stromdichte J_{polier} gewählt, da so der spezifische Materialabtrag auch bei Schwankungen der Stromdichte am gleichmäßigsten ist. Während dem Polierschritt wird Werkstückmaterial abgetragen, welches im ersten

Strukturierungsschritt als Aufmaß Δh bei der Definition der Einsenktiefe berücksichtigt werden muss.

Die benötigte Zeit für den Polierschritt kann dann nach Gleichung (37) in Abhängigkeit vom Aufmaß berechnet werden. Die Impulszeit und die Frequenz können dabei genutzt werden, um die Bearbeitungszeit zu beeinflussen. Der Wert $SMR(J_{\text{polier}})$ kann Kapitel 4.1.6 entnommen werden und sollte möglichst klein sein. Die zu wählende Spannung hängt von der Gleichgewichtsspaltweite und der Polarisationsspannung der gewünschten Stromdichte ab und wird nach Gleichung (38) durch Umstellen von Gleichung (10) bzw. Gleichung (36) berechnet. Eine Herausforderung besteht darin, dass die Aufweitung des Spalts während der Pulse im zweiten Schritt bereits zu einem Absinken der Stromdichte führt, daher ist J_{polier} recht hoch zu wählen, um trotz der abnehmenden Stromdichte eine gute Oberfläche zu erzielen.

$$\begin{aligned}
 SMR(J) &= \frac{m_{\text{prak}}}{I \cdot t_P \cdot t_{\text{on}} \cdot f} \\
 &= \frac{\rho \cdot A \cdot \Delta h}{I \cdot t_P \cdot t_{\text{on}} \cdot f} && \Delta h: \text{Aufmaß [mm]} \\
 \rightarrow t_P &= \frac{\rho}{SMR(J_{\text{polier}})} \cdot \frac{\Delta h}{J_{\text{polier}}} \cdot \frac{1}{t_{\text{on}} \cdot f} && J_{\text{polier}}: \text{Polierstromdichte [A/mm}^2\text{]} \quad (37)
 \end{aligned}$$

$$U_{\text{gap}} = \frac{J_{\text{polier}} \cdot s}{\sigma} + U_{\text{pol}} \quad (38)$$

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Kupfer mit einer möglichst hohen Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Spannung und Impulszeit bearbeitet werden sollte, um die Spaltweite klein zu halten. Wird dabei die Impulszeit kurz genug gehalten, führt das zu sehr hohen Stromdichten, sodass in manchen Fällen auf einen Polierschritt verzichtet werden kann, der eine zusätzliche Unsicherheit bzgl. Materialabtrag und damit Geometrieabbildung in den Prozess einbringt. Ein Absenken der Spannung führt zu kleineren Spaltweiten, jedoch ebenfalls zum Abnehmen der Stromdichte. Eine Verkürzung der Impulszeit führt umgekehrt zu einer hohen Stromdichte bei kleinerer Spaltweite. Spaltweiten von $s < 20 \mu\text{m}$ sollten vermieden werden, da aufgrund der schnellen Auflösung die vielen Abtragsprodukte zu einem Kurzschluss führen können.

4.2 Elektrochemische Bearbeitung von Wolframkupfer und Hartmetall

Die elektrochemische Bearbeitbarkeit des Wolframkupfers und der beiden gewählten Hartmetalle wurde mit dem in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Versuchsaufbau bei pH 10,3 untersucht. Dabei trat jeweils erwartungsgemäß ein Kurzschluss auf, sodass eine Bearbeitung nicht möglich war. Als Startdistanz wurden $30 \mu\text{m}$ bei einem

Vorschub von 0,05 mm/min, einer Spannung von 13 V und einer Impulszeit von 4 ms verwendet. Diese Kombination sollte zu einer großen Spaltweite führen.

Die entstehende Oberfläche wurde mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht, um festzustellen, welche Stoffe auf der Oberfläche gebildet wurden. Dazu wurde ein Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop Sigma der Firma Zeiss verwendet, siehe Anhang D. Die Aufnahmen wurden im VP-mode (engl. variable pressure) gemacht, d. h. nicht im Hochvakuum, sondern bei höherem Druck. Aufgrund der eingeschränkten Leitfähigkeit wurden die Proben durch den Elektronenbeschuss elektrostatisch aufgeladen, sodass die freiwerdenden Elektronen durch das entstehende Feld abgelenkt wurden, was zu unscharfen Bildern und EDX-Auswertungen führte. Die Aufnahmen wurden bei einer Beschleunigungsspannung von 20 kV aufgenommen. Detektiert wurden Sekundärelektronen bei einem Arbeitsabstand von 8–9 mm.

Die EDX-Auswertung erfolgt auf der im Bild eingezeichneten Linie anhand von 200 äquidistanten Punkten. Um eine Aussage über die chemische Verbindung treffen zu können, müssen die detektierten Massenprozent in Atomprozent der einzelnen Elemente umgerechnet werden. Dies geschieht über folgende Umrechnung:

$$\text{Atom}\%_i = \frac{\frac{\text{Massen}\%_i}{\text{Atommasse}_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\text{Massen}\%_i}{\text{Atommasse}_i}} \quad i: \text{Laufindex der Elemente} \quad (39)$$

Die teilweise vorkommende Abweichung der Summe der Atomprozent von 100 % resultiert aus Ungenauigkeiten der angenommenen Atommassen und Rundungen.

4.2.1 Wolframkupfer

Wie auf der REM-Aufnahme und der EDX-Auswertung des Linienscans von WCu nach der PECM-Bearbeitung zu sehen ist, hat sich der Kupfer bis zu einem Anteil von 4,7 % und damit größtenteils aufgelöst und es ist nur noch die Wolframmatrix vorhanden, vgl. Tabelle 4.12 und Tabelle 4.13. Die Umrechnung der Massenprozent in Atomprozent unter Beachtung der zugehörigen Atommassen der Anteile zeigt, dass sich ein Verhältnis von Wolfram zu Sauerstoff von

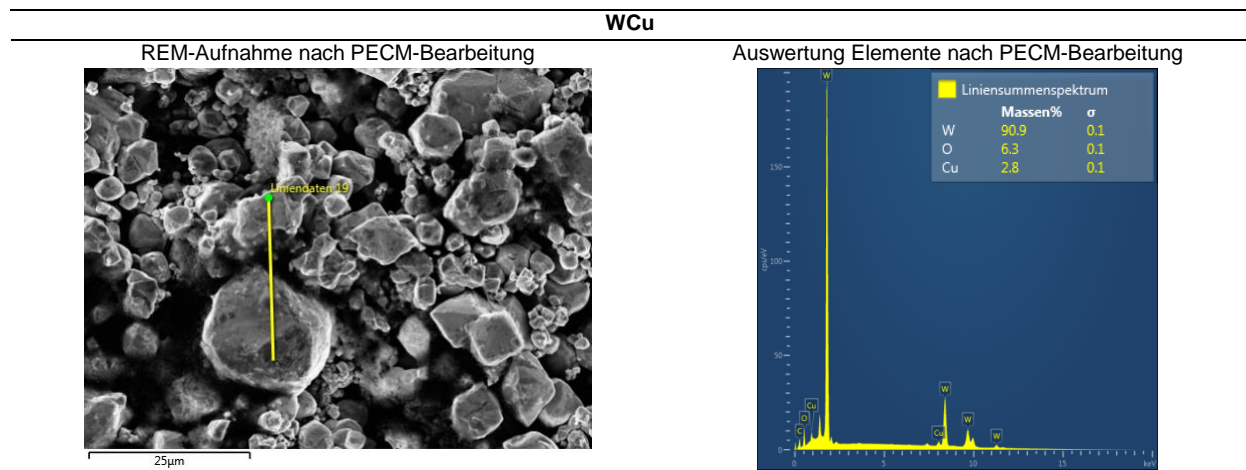
- W:O = 1:0,796

einstellt. Eine Verbindung von Sauerstoff mit mehreren Anteilen Wolfram ist chemisch nicht stabil. Daher kann davon ausgegangen werden, dass sowohl Wolfram in Reinform als auch Oxidationsstufen von Wolfram vorliegen. Die elektrochemische Bearbeitung von Wolframkupfer mit reinem Natriumnitratelektrolyt ist somit nicht möglich.

Tabelle 4.12: Anteile der Elemente in Massen- und Atomprozenten für WCu nach PECM

Element	Massenprozent [%]	Atommasse [u]	Atomprozent [At %]
W	90,9	183,85	53,0
O	6,3	16,00	42,2
Cu	2,8	63,55	4,7

Tabelle 4.13: REM- und EDX-Aufnahmen für WCu nach PECM



4.2.2 Hartmetall

Die REM-Aufnahmen und die EDX-Auswertungen der Linienscans der Hartmetalle zeigen, dass die Lieferangaben für VG627 recht genau zutreffen, wohingegen die Zusammensetzung von VGH2 leicht abweicht.

Die Präparation der beiden Lieferzustände erfolgte durch Vorschleifen mit Diamantscheibe (180er Körnung), dann Feinschleifen mit Diamantsuspension auf Unterlage MD Allegro bis 6 µm und anschließend Polieren mit Diamantsuspension auf MD Dac bis 3 µm. Nach der Politur wurden die Proben wieder ausgebettet und je 5 min in Aceton und Ethanol im Ultraschallbad gereinigt. Der Vergleich der Elemente vor und nach der PECM-Bearbeitung in Tabelle 4.14 zeigt für beide Hartmetalle eine starke Abnahme des Kobaltgehalts, d. h. dass sich das Kobalt sehr gut aufgelöst hat und wie im Falle von WCu eine Wolframmatrix zurückbleibt. Die Aufnahme von Sauerstoff kann nachgewiesen werden. Das Verhältnis von Wolfram zu Sauerstoff beträgt für:

- VG627: W:O = 1:2,849
- VGH2: W:O = 1:3,149

Der nachgewiesene Anteil an Natrium resultiert aus Elektrolytrückständen, die auch auf den Aufnahmen sichtbar sind. Unter „Rest“ sind weitere detektierte Elemente, jedoch vernachlässigbaren Anteils zusammengefasst, weshalb keine Atommasse

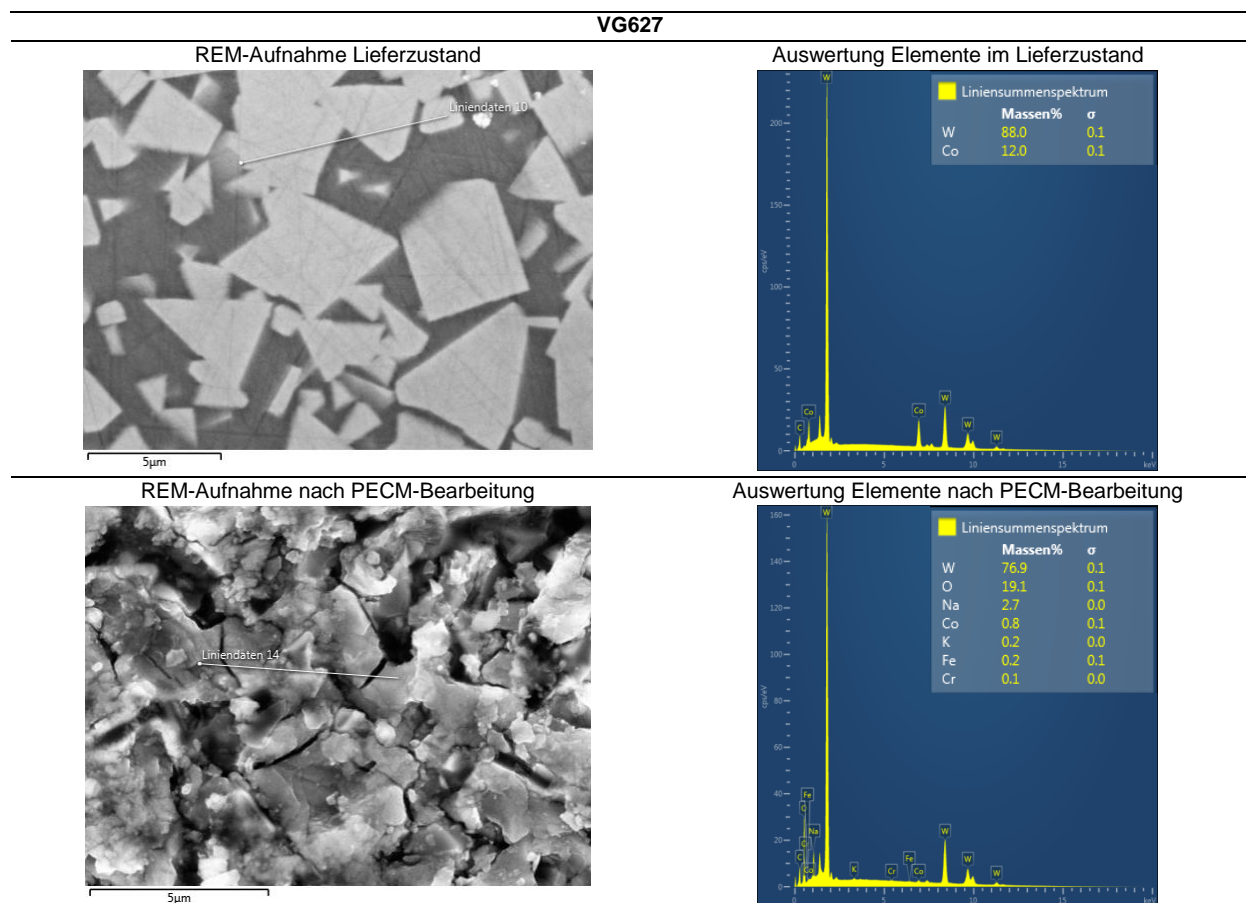
angegeben ist. In Tabelle 4.15 sind die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und die Ergebnisse der EDX-Linienscans dargestellt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei der elektrochemischen Hartmetallbearbeitung Wolframtrioxid (WO_3) gebildet wird, welches die weitere Auflösung der Materialien verhindert. Damit ist die elektrochemische Bearbeitung nicht möglich und im Weiteren wird zur Hartmetallbearbeitung die Funkenerosion eingesetzt.

Tabelle 4.14: Anteile der Elemente in Massen- und Atomprozenten der Hartmetalle nach PECM

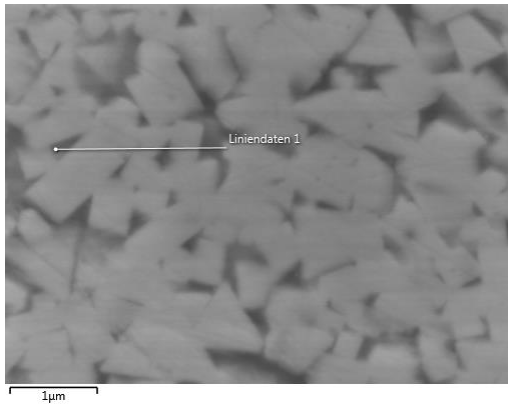
	Element	Massenprozent [%]	Atommasse [u]	Atomprozent [At %]
VG627 im	W	88,0	183,85	70,2
Lieferzustand	Co	12,0	58,93	29,8
VG627 nach	W	76,9	183,35	23,9
PECM	O	19,1	16,00	68,1
	Co	0,8	58,93	0,8
	Na	2,7	22,99	6,7
	Rest	0,5		0,6
VGH2 im	W	87,5	183,85	69,0
Lieferzustand	Co	11,8	58,93	29,0
	Cr	0,7	52,00	2,0
VGH2 nach	W	74,3	183,35	22,1
PECM	O	20,4	16,00	69,6
	Co	2,7	58,93	2,5
	Na	2,3	22,99	5,5
	Rest	0,3		0,3

Tabelle 4.15: REM- und EDX-Aufnahmen der Hartmetalle nach PECM

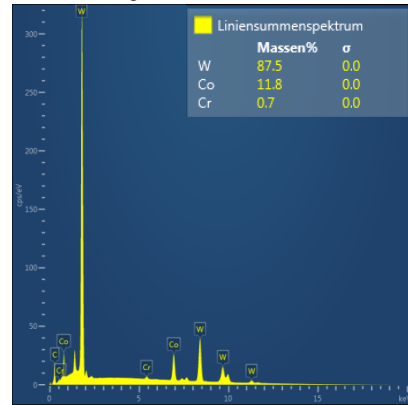


VGH2

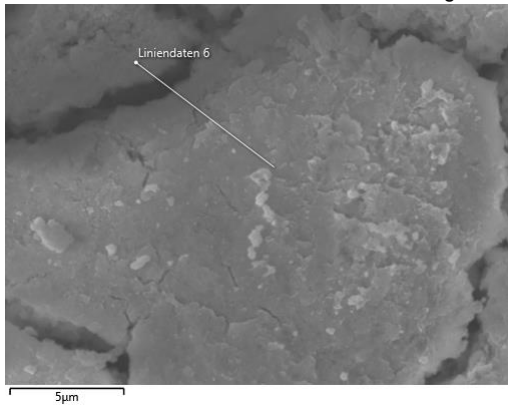
REM-Aufnahme Lieferzustand



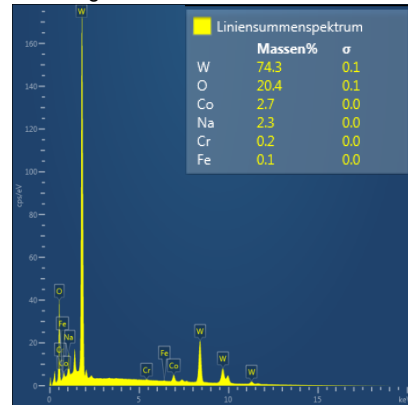
Auswertung Elemente im Lieferzustand



REM-Aufnahme nach PECM-Bearbeitung



Auswertung Elemente nach PECM-Bearbeitung



4.3 Funkenerosive Bearbeitung von Hartmetall

Um das Bearbeitungsverhalten von Hartmetall bei der EDM-Bearbeitung zu ermitteln, werden die Einflüsse auf das Bearbeitungsergebn systematisch untersucht. Dazu werden die Eingangsparameter Zündspannung U_D [V], maximaler Entladestrom I_{max} [A] und Impulszeit t_{on} [μ s] variiert. Als Ausgangsparameter werden Massenabtrag Δm [g], Verschleiß [-], Oberflächenrauheit R_a [μ m] bewertet, siehe Abbildung 4.24. Wie zuvor wird nur die arithmetische Rauheit R_a verglichen, da diese als maßgeblicher Kennwert bei der Funkenerosion angesehen wird [62].

Neben den hauptverantwortlichen Prozessparametern können oftmals weitere maschinenspezifische Parameter vorgegeben werden. Diese Randbedingungen werden konstant gehalten und weiter unten kurz vorgestellt.

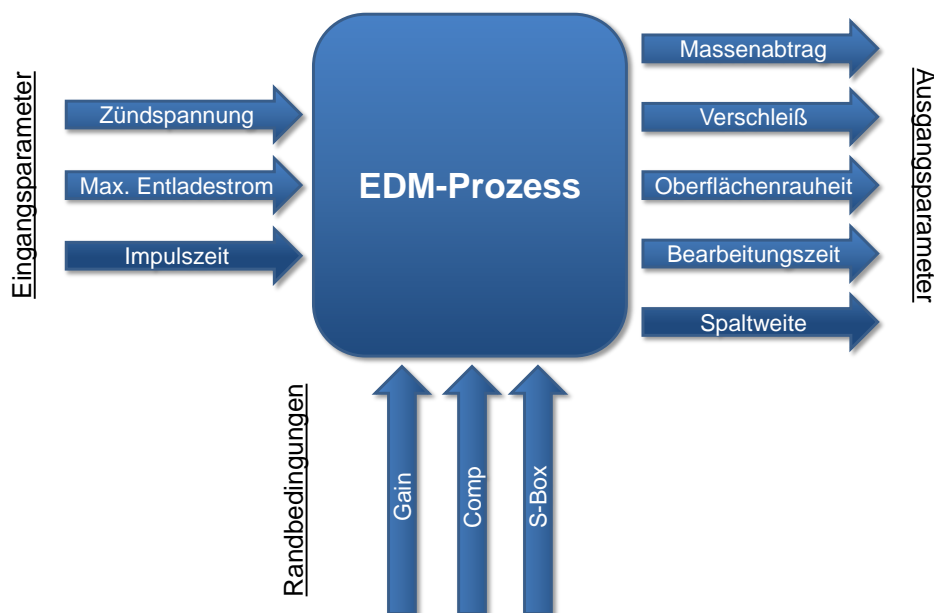


Abbildung 4.24: Einfluss- und Wirkgrößen des EDM-Prozesses

Die Werkzeugelektroden werden während der Versuche aufgrund der verwendeten kurzen Impulszeiten kathodisch gepolt. Die Spannung, die zum Zünden der Funken verwendet wird, fällt während der Impulszeit auf einen materialspezifischen Wert. Der maximal erlaubte Stromfluss wird vorgegeben, der real fließende Strom hängt jedoch von der Situation der jeweiligen Bearbeitung ab, also Spaltweite, Elektrodenfläche, Verschmutzung im Spalt usw. Die Aufnahme der Strom- und Spannungswerte der Impulse während der Bearbeitung war nicht möglich, da die bei der Hartmetallbearbeitung verwendeten Impulszeiten im unteren Bereich (hier $t_{on} = 2,7 \mu$ s) nach dem Nyquist-Shannon-Kriterium (vgl. [201, 202, 203]) theoretisch eine Abtastfrequenz von $f_{abtast} \geq 2 \cdot f_{max} \approx 741$ kHz voraussetzen würden. Der verwendete Stromwandler HTA 100-s besitzt jedoch nur eine Bandbreite bis 50 kHz [204], weshalb die Auswertung des Versuchsplans auf Basis der einstellbaren Werte

ohne Kenntnis der realen Entladeenergien erfolgt. In einer weiteren Versuchsreihe wird der Einfluss der Spannung auf die frontale und seitliche Spaltweite untersucht.

Die Versuche werden an einer industriellen Senkanlage Form20 der Firma +GF+ AgieCharmilles (jetzt *GF Machining Solutions*) durchgeführt, siehe auch Anhang D. Als Dielektrikum wird IonoPlus IME-MH der Firma *Oelheld* verwendet.

Im Folgenden werden die weiteren maschinenspezifischen Randbedingungen nach [107] erläutert, die in den Versuchen konstant gehalten und auf anwendungstypische Werte gesetzt werden:

GAIN: Verstärkung der Positionsregulierung. GAIN regelt die Geschwindigkeit der Zustellung. Ein hohes GAIN kann zur Vibration der Elektrode führen, ein zu niedriges GAIN bewirkt eine träge Zustellung der Elektrode. Mit GAIN 0 ist der Vorschub gestoppt, der maximal einstellbare Wert beträgt 255.
Gewählte Einstellung: 75.

COMP: Verzögerung der Entladung in Prozent. Die Kompression gibt die Daten zum Eintritt des Reglers in die mechanische Position vor. Eine höhere Kompression positioniert die Elektrode näher am Werkstück, was zu einem höheren Abtrag führt, aber auch die Gefahr einer Prozess-Degeneration erhöht. Je höher die Kompression, desto kleiner der Abstand von Elektrode zu Werkstück. Dies bewirkt bei guter Spülung einen erhöhten Abtrag, andernfalls erhöht sich das Risiko von Fehlentladungen. Bei niedriger Kompression erhöht sich der frontale Abstand. Der seitliche Funkenspalt wird bedingt durch eine erhöhte Ausfunktendenz leicht grösser.
Einstellbereich: 1 bis 100.
Gewählte Einstellung: 20 (kleinere Werte führten zu stockender Bearbeitung).

S-Box: Position der Zusatzkondensatoren zum Schlichten. Hinter dem Parameter S-Box verbirgt sich ein zusätzlicher Generatorteil, welcher speziell für Bearbeitungen mit extrem kurzer Impulszeit ausgelegt ist. Hohe Werte für diesen Parameter in Verbindung mit hohen Werten für die Entladedauer und den Entladestrom entsprechen einer hohen Entladeenergie, kleine Werte in Verbindung mit kleinen Werten für die Entladedauer und den Entladestrom entsprechen einer extrem niedrigen Entladeenergie. Bei Bearbeitung mit negativer Polarität und einer Einstellung des Parameters S-Box $\neq 0$ stimmt der eingestellte Wert für die Entladedauer nicht mehr mit dem tatsächlichen Wert während der Entladung überein. Dies hat allerdings keinen negativen Einfluss auf die Bearbeitung, da wie in Kapitel 2.2.2 erläutert die genaue Entladedauer nicht präzise bestimmt werden kann.
Einstellbereich: 1 bis 127.
Gewählte Einstellung: 75 (kleinere Werte führten zu stockender Bearbeitung).

4.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsplan

Verschleißverhalten und Oberflächenrauheit

Der Versuchsaufbau erfolgt ähnlich den Untersuchungen im PECM-Prozess ebenfalls in Frontalspaltanordnung. Auf diese Weise wird ein Seitenspalt vermieden und der Strom wird nur im frontalen Abtrag wirksam, sodass Verschleiß und Materialabtrag eindeutig bestimmt werden können, siehe Abbildung 4.25. Die zylinderförmigen Proben beider Hartmetallsorten haben einen Durchmesser von 10 mm und werden durch Schleifen auf eine Rauheit von $R_a < 0,4 \mu\text{m}$ / $R_z < 3,0 \mu\text{m}$ vorbereitet. Als Elektroden werden wie zuvor durch Drehen auf $R_a < 1,0 \mu\text{m}$ / $R_z < 4,0 \mu\text{m}$ vorbearbeitete Kupferelektroden verwendet.

Die Frontalspaltversuche werden hinsichtlich Materialabtrag, Elektrodenverschleiß und Bearbeitungszeit ausgewertet. Die Beurteilung der Bearbeitungszeit ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet, da die Spülverhältnisse und diverse Sicherheitsmechanismen zur Erhaltung der optimalen Erodierbedingungen im Spalt einen bedeutenden Einfluss haben können. Aufgrund der in dieser Anordnung reproduzierbaren Spülbedingungen soll die Bearbeitungszeit dennoch beurteilt und zur Ermittlung der Materialabtragsrate MRR (engl. material removal rate) herangezogen werden.

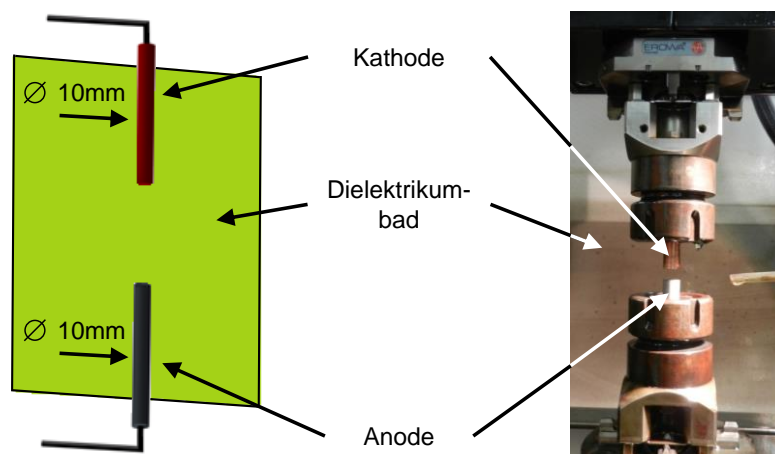


Abbildung 4.25: Versuchsaufbau der EDM-Frontalspaltversuche

Die Definition des Elektrodenverschleißes erfolgt nach [62, 103, 136, 205, 206, 207], siehe Gleichung (40).

$$EW = \frac{\Delta V_{\text{Elektrode}}}{\Delta V_{\text{Werkstück}}} = \frac{\Delta M_{\text{Elektrode}} \cdot \rho_{\text{Werkstück}}}{\Delta M_{\text{Werkstück}} \cdot \rho_{\text{Elektrode}}} \quad (40)$$

EW: Verschleiß (engl. electrode wear) [-]
 ΔV : abgetragenes Volumen [mm³]
 ΔM : abgetragene Werkstoffmasse [mg]
 ρ : Werkstoffdichte [g/mm³]

Dieser Wert muss bei der Definition der Zustellung der Werkzeugelektrode und der Parameteroptimierung berücksichtigt werden, um die gewünschte Tiefe zu erreichen. Zur Beurteilung der Geschwindigkeit des Prozesses wird der Materialabtrag pro

Minute herangezogen, siehe Gleichung (41). Der praktische Massenabtrag wird hierbei ebenfalls mittels einer Präzisionswaage Sartorius MSE2203S bestimmt.

$$\text{MRR} = \frac{\Delta M_{\text{Werkstück}}}{t_p} \quad \begin{array}{l} \text{MRR: material removal rate [mg/min]} \\ t_p: \text{Prozesszeit [min]} \end{array} \quad (41)$$

Versuchsplanung

Ein kritisches Element bei der PECM-EDM-Prozesskette ist der relativ hohe Verschleiß der Kupferwerkzeuge bei der funkenerosiven Bearbeitung von Hartmetall und die dadurch entstehende Beeinflussung der abgebildeten Geometrie. Gleichzeitig sollte das Endprodukt eine möglichst hohe Oberflächengüte bieten. Mit der statistischen Versuchsplanung ist es möglich, Modelle für das Verhalten basierend auf wenigen Versuchsdurchläufen aufzustellen. Diese Modelle werden im Anschluss genutzt, um optimierte Parameter für die Funkenerosion zu definieren, sodass ein möglichst geringer Elektrodenverschleiß und eine gute Werkstückoberfläche erreicht werden. Bei Verwendung nicht-vollfaktorieller Versuchspläne sind zwangsläufig zwischen den Versuchsreihen teilweise mehrere Faktoren auf einmal auf andere Stufen einzustellen, wodurch die Effekte der Faktoren vermengt werden und eine eindeutige Zuordnung nicht möglich ist. Dies gilt es bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Da die Entladeenergie maßgeblich den Verschleiß und die Werkstückoberfläche bestimmt, werden die Parameter Zündspannung U_D , Entladestrom I_{\max} und Impulszeit t_{on} mittels Response Surface Methodology (RSM) in einem Versuchsplan nach dem Central-Composite-Design (CCD) untersucht. Dieses Vorgehen ergänzt einen zweistufigen vollfaktoriellen Versuchsplan „Würfel“ um weitere Versuche, die auf einem „Stern“ liegen, vgl. Abbildung 4.26. Die Versuchsanzahl des CCD basierend auf einem zweistufigen Plan beträgt $n = 2^k + 2k + m$, mit k = Anzahl der Faktoren und m = Wiederholungsversuche der Zentrumseinstellungen. Diese Anzahl ist in der Regel geringer als bei einem dreistufigen Plan ($n = 3^k$), sodass weniger Versuche benötigt werden [208]. Beim CCD wird letztlich jeder Faktor auf fünf Stufen getestet, sodass die Möglichkeit zur Untersuchung nicht-linearer Zusammenhänge gegeben ist [196]. Die erzielten Ergebnisse erlauben die Erstellung eines quadratischen Beschreibungsmodells. Der Verlängerungsfaktor als Verhältnis von Stufenbreite der Sternpunkte zu Stufenbreite der Würfelpunkte beträgt hier 2,3. Tabelle 4.16 zeigt das gewählte Design mit zweifacher Wiederholung des Zentrumsversuchs. Kombination 15 kann nicht durchgeführt werden, da die maximal mögliche Zündspannung der Maschine 250 V beträgt. Das Tastverhältnis τ beeinflusst den Prozessverlauf, ein zu kleines τ bedeutet eine verminderte zeitliche Ausnutzung der verfügbaren Energie [209]. In diesen Untersuchungen wird mit einem für die Hartmetallbearbeitung mit Kupfer typischen Wert von $\tau \approx 0,3$ gearbeitet. Die Auswertung des Versuchsplans erfolgt mit Minitab 17.0.

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben wurde, hängen die abfallende Spannung und der fließende Strom von den Bedingungen im Spalt ab und sind nicht mit den

einstellbaren Werten an der Maschine gleichzusetzen. Eine Aussage bzgl. der realen Entladeenergie ist damit nicht möglich. Die vorliegende Untersuchung bezieht sich folglich auf die Einstellwerte, da nur diese beeinflusst werden können.

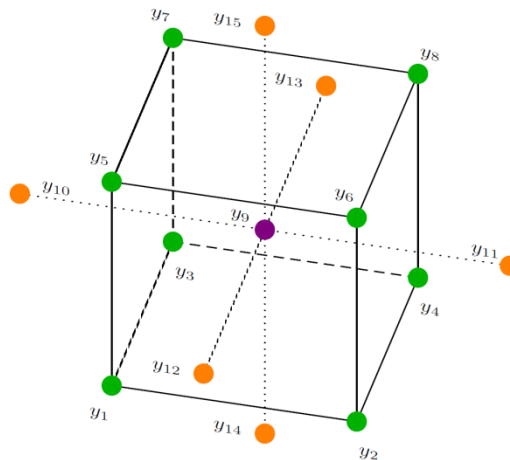


Abbildung 4.26: Central-Composite-Design nach [196]

Tabelle 4.16: EDM-Einstellparameter nach dem Central-Composite-Design

Nr.	I_{\max} [A]	U_D [V]	t_{on} [μs]	t_{off} [μs]
1	5,0	130	5,6	13,3
2	10,0	130	5,6	13,3
3	5,0	250	5,6	13,3
4	10,0	250	5,6	13,3
5	5,0	130	10,0	23,7
6	10,0	130	10,0	23,7
7	5,0	250	10,0	23,7
8	10,0	250	10,0	23,7
9	7,5	190	7,5	17,8
10	7,5	190	7,5	17,8
11	7,5	190	7,5	17,8
12	1,8	190	7,5	17,8
13	13,0	190	7,5	17,8
14	7,5	52	7,5	17,8
15	7,5	328	7,5	17,8
16	7,5	190	2,7	6,5
17	7,5	190	13,3	31,6

4.3.2 Elektrodenverschleiß, Materialabtragsrate und Oberflächenrauheit

In Tabelle 4.17 sind die Ergebnisse der funkenerosiven Bearbeitung dargestellt. Beim Vergleich der beiden Werkstoffe fällt auf, dass der Elektrodenverschleiß bei der Bearbeitung von VGH2 niedriger ausfällt und im Schnitt nur 66 % des Elektrodenverschleißes bei VG627 beträgt. Dieser Unterschied ist mit $p = 0,001$ statistisch signifikant. Gleichzeitig ist bis auf eine Ausnahme die Abtragsrate bei

VGH2 höher als VG627, im Schnitt ergibt sich ein 1,28-facher MRR-Wert. Nach [210] führt ein höherer Kobaltgehalt zu einer steigenden Materialabtragsrate. Der Kobaltgehalt beträgt bei VG627 30,0 % und bei VGH2 9,5 %. In dieser Untersuchung kann folglich zwar bestätigt werden, dass sich beide Werkstoffe unterschiedlich verhalten, jedoch nicht, dass ein höherer Kobaltgehalt zu einem signifikant erhöhten MRR-Wert führt ($p = 0,129$). Zum unterschiedlichen Abtragsverhalten beitragen kann potentiell die unterschiedliche Korngröße. Da zum Aufschmelzen oder Zerplatzenbringen der größeren WC-Körner mehr Energie aufgewendet werden muss, steht flächig gesehen weniger Energie zur Verfügung. Bei den kleineren Körnern von VGH2 verteilt sich die eingebrachte Energie gleichmäßiger und führt zu einem schnelleren Abtrag. Die entstehende Rauheit richtet sich nur nach den Eingangsparameterkombinationen und zeigt keinen statistisch signifikanten Zusammenhang mit dem Material ($p = 0,597$).

Beide Materialien unterscheiden sich statistisch gesehen nur bzgl. des Elektrodenverschleißes signifikant. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse des Hartmetalls VGH2 diskutiert, die zu VG627 gehörigen Diagramme und Modelle finden sich in Anhang C.

Tabelle 4.17: Ergebnisse der funkenerosiven Bearbeitung der Hartmetalle

Nr.	VG627			VGH2		
	EW [-]	MRR [mg/min]	R _a [µm]	EW [-]	MRR [mg/min]	R _a [µm]
1	0,68	4,53	1,49	0,34	12,92	1,37
2	0,51	9,86	1,30	0,39	13,49	1,53
3	0,43	15,49	1,73	0,32	19,35	1,58
4	0,45	14,01	1,52	0,36	18,76	1,67
5	0,71	5,46	1,59	0,34	15,45	1,60
6	0,79	7,24	1,35	0,37	18,51	1,51
7	0,36	23,88	1,86	0,34	26,17	1,57
8	0,45	14,16	1,59	0,37	19,04	1,78
9	0,41	23,84	1,73	0,28	24,46	1,68
10	0,37	24,97	1,70	0,28	24,23	1,46
11	0,37	23,41	1,64	0,28	24,32	1,58
12	0,70	4,55	1,75	0,39	10,12	1,45
13	0,40	23,23	1,58	0,34	24,63	1,65
14	1,05	1,61	1,16	0,44	3,94	1,17
15	-	-	-	-	-	-
16	0,44	14,72	1,40	0,31	19,08	1,50
17	0,35	22,71	1,77	0,32	23,83	1,56

In den folgenden Tabellen sind die Haupteffekte und die Wechselwirkungen der Parameter auf die Prozessergebnisse EW, MMR und R_a dargestellt. Statt der Wechselwirkungsdiagramme werden die Konturplots der Parameter gezeigt, da sie die Interaktion der Werte optisch besser verdeutlichen. Für die Interpretation muss die Vermengung der Effekte beachtet werden und die Tatsache, dass aufgrund des Versuchsplans die für die Grenzwerte der Parameter gewonnenen Ergebnisse nur auf Einzelwerten beruhen.

Elektrodenverschleiß

Im Haupteffektdiagramm der Parameter ist jeweils ein parabelförmiger Verlauf zu erkennen, der darauf hindeutet, dass der Elektrodenverschleiß im mittleren Parameterbereich minimal ist und zu den Rändern hin ein stärkerer Verschleiß auftritt, vgl. Abbildung 4.27. Den größten Effekt hat die Spannung, den geringsten die Impulszeit. Die Wechselwirkungen der Parameter zeigen sich als nicht-signifikant. Die signifikanten Einflüsse sind die quadratischen Anteile von Strom ($p = 0,028$) und Spannung ($p = 0,009$).

Das vollständige Modell für den Elektrodenverschleiß mit $R^2 = 0,804$ lautet:

$$\begin{aligned} EW_{\text{VGH}_2} = & 0,828 - 0,0347 \cdot I_{\text{max}} - 0,00347 \cdot U_{\text{D}} - 0,0217 \cdot t_{\text{on}} \\ & + 0,002579 \cdot I_{\text{max}}^2 + 0,000008 \cdot U_{\text{D}}^2 + 0,00095 \cdot t_{\text{on}}^2 \\ & - 0,000008 \cdot I_{\text{max}} \cdot U_{\text{D}} - 0,00010 \cdot I_{\text{max}} \cdot t_{\text{on}} + 0,000043 \cdot U_{\text{D}} \cdot t_{\text{on}} \end{aligned} \quad (42)$$

An den Konturdiagrammen ist der recht geringe Einfluss der Impulszeit zu erkennen, da sich gegenüber den entsprechenden Achsen nahezu senkrechte Konturlinien bezogen auf die Spannung bzw. den Strom ausbilden. Der relative Verschleiß nimmt mit wachsender Impulszeit zu. Das ist bedingt durch die Tatsache, dass bei längeren Impulszeiten zunehmend die im elektrischen Feld langsamer beschleunigenden Protonen auf das Werkzeug auftreffen, wodurch es zum erhöhten Verschleiß kommt.

Kleinere Spannungen führen zu kleinen Spaltweiten und schlechteren Spülbedingungen. Ebenfalls damit einhergehende Kurzschlüsse führen zu erhöhtem Verschleiß und einem sinkenden Materialabtrag. Ein kleiner Strom führt zu einem geringen Ausnutzen der Energie und damit zu einem überproportionalen Verschleiß. Ein zu großer Strom führt zu einem größeren Energieinhalt und damit zu einer starken Erwärmung der Elektrode. Der parabelförmige Verlauf von Strom und Spannung führt zu dem letzten dargestellten kreisförmigen Konturplot, wenn diese beiden Parameter gegeneinander aufgetragen werden.

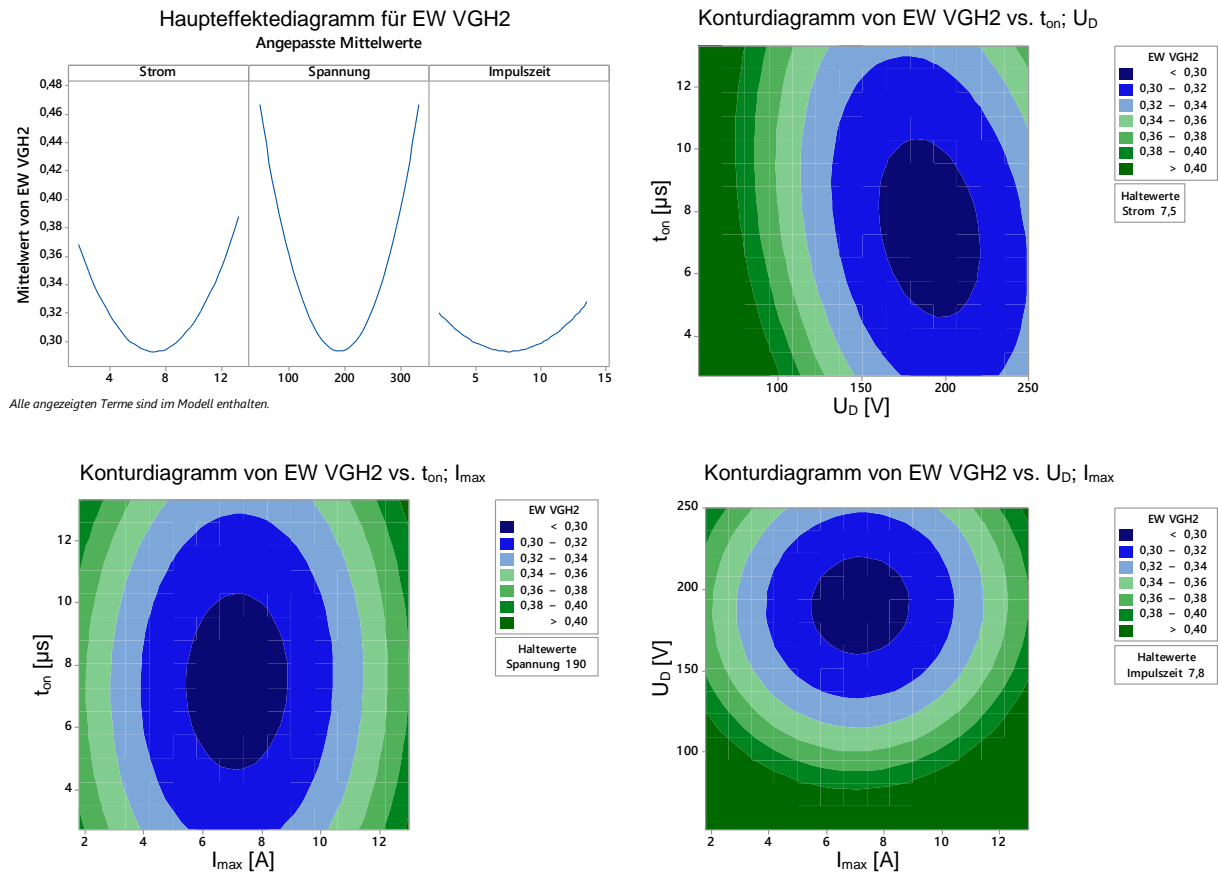


Abbildung 4.27: Haupteffekte- und Konturdiagramme zum Elektrodenverschleiß bei VGH2

Materialabtragsrate

Im Haupteffektediagramm der Parameter ist jeweils ein parabelförmiger Verlauf zu erkennen, siehe Abbildung 4.28. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Materialabtrag ein Maximum im mittleren Parameterbereich für Strom und Spannung aufweist und zu den Rändern hin abnimmt. Der Abtrag zeigt einen deutlicheren Anstieg für längere Impulszeiten. Den größten Effekt hat auch hier die Spannung, den geringsten die Impulszeit. Die Wechselwirkungen zeigen sich als nicht-signifikant. Signifikant ist der quadratische Anteil der Spannung ($p = 0,026$), gefolgt von einem leicht nicht-signifikanten Einfluss des quadratischen Anteils vom Strom ($p = 0,092$).

Das vollständige Modell für die Materialabtragsrate mit $R^2 = 0,854$ lautet:

$$\begin{aligned} \text{MRR}_{\text{VGH2}} = & - 62,3 + 6,72 \cdot I_{\text{max}} - 0,414 \cdot U_D - 3,29 \cdot t_{\text{on}} \\ & - 0,217 \cdot I_{\text{max}}^2 - 0,000794 \cdot U_D^2 - 0,103 \cdot t_{\text{on}}^2 \\ & - 0,00946 \cdot I_{\text{max}} \cdot U_D - 0,141 \cdot I_{\text{max}} \cdot t_{\text{on}} \end{aligned} \quad (43)$$

Die Abtragsrate steigt bis zu einem gewissen Punkt mit ansteigender Entladeenergie und sinkt danach wieder leicht. Bezogen auf eine längere Impulszeit kann angenommen werden, dass sich der Entladekanal weiter ausdehnt. Nach Erreichen eines optimalen Kanaldurchmessers nehmen die Energieverluste durch die Wärmeableitung in den Elektroden und im Arbeitsmedium sowie durch die Strahlung so zu, dass die Abtragsrate mit weiter steigender Impulszeit sinkt [62, 103].

Eine Erhöhung der Spannung wirkt sich deutlicher aus als eine Erhöhung der Impulszeit. Sehr hohe Spannungen führen zu großen Spaltweiten und schlechteren Zündbedingungen in Verbindung mit längeren Zündverzögerungszeiten und damit zu einem Abfall der Abtragsrate [103]. Ein zu kleiner Strom führt zu kleinen aufgeschmolzenen Volumina und damit zu einem langsamen Prozess. In den Wechselwirkungen ist zu erkennen, dass die größte Abtragsrate durch eine Kombination aus mittlerem Strom bei der höchsten Spannung sowie der längsten Impulszeit erreicht wird. Eine mögliche Erklärung zur Erhöhung der Abtragsrate mit langen Impulszeiten ist, dass während dieser Impulse mehr Energie eingetragen wird als bei kurzen Impulszeiten, was zu einer stärkeren Erwärmung führt, die auch in der Pause nicht komplett durch das Dielektrikum abgeführt wird. Folgende Funken müssen daher das Grundmaterial weniger stark erwärmen, wodurch bis zu einem gewissen Grad mehr Energie für den Aufschmelzvorgang vorliegt, woraus größere Schmelzkrater und ein erhöhter Abtrag resultieren.

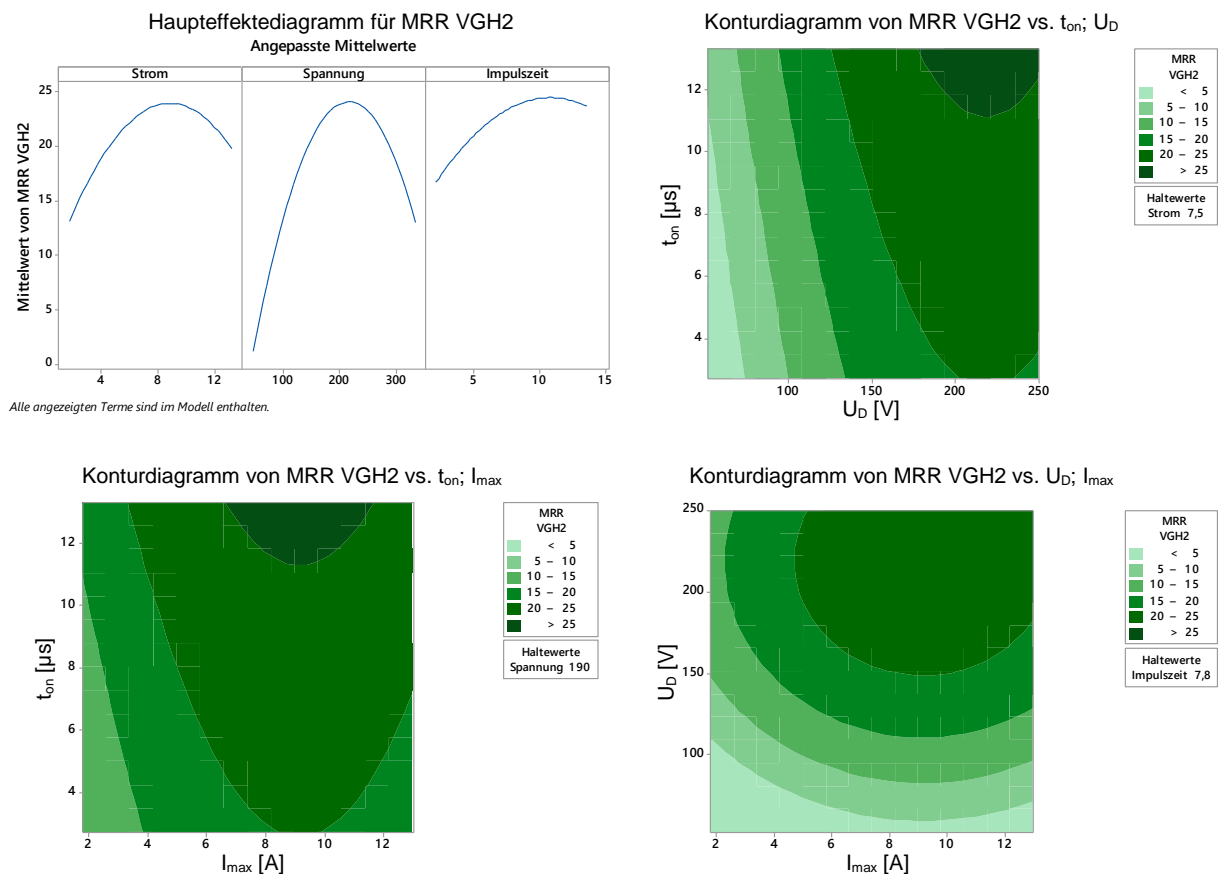


Abbildung 4.28: Haupteffekte- und Konturdiagramme zur Materialabtragsrate bei VGH2

Oberflächenrauheit

Im Haupteffektediagramm der Parameter ist zu erkennen, dass die Rauheit mit steigendem Strom ansteigt, siehe Abbildung 4.29. Spannung und Impulszeit bewirken ein Ansteigen der Rauheit und nach Durchlaufen eines Maximums wieder ein leichtes Absinken. Die Oberflächenrauheit wächst (unabhängig von der Polarität)

mit zunehmender Impulszeit [107]. Den größten Effekt hat die Spannung, den geringsten die Impulszeit. Signifikant ist der lineare Anteil der Spannung ($p = 0,041$).

Das vollständige Modell für die Oberflächenrauheit mit $R^2 = 0,811$ lautet:

$$R_{a\text{ VGH2}} = 0,470 + 0,0212 \cdot I_{\text{max}} + 0,00479 \cdot U_{\text{D}} + 0,0915 \cdot t_{\text{on}} - 0,00088 \cdot I_{\text{max}}^2 - 0,000010 \cdot U_{\text{D}}^2 - 0,00234 \cdot t_{\text{on}}^2 + 0,000177 \cdot I_{\text{max}} \cdot U_{\text{D}} - 0,00313 \cdot I_{\text{max}} \cdot t_{\text{on}} - 0,000105 \cdot U_{\text{D}} \cdot t_{\text{on}} \quad (44)$$

Es ist zu erkennen, dass ein Absenken der Spannung einen größeren Effekt hat als ein Absenken von Strom oder Impulszeit. Je kleiner die Entladeenergie insgesamt, desto glatter wird die Oberfläche. Durch die Fehlentladungen bei kleinen Spannungen wird ein Glätten der Oberfläche erreicht, da Fehlentladungen mehr ein Umschmelzen als ein Abtragen bewirken [103]. Die bei hohen Spannungen auftretenden Einzelentladungen führen zu größeren Einschlagkratern und somit zu einem Ansteigen der Rauheit. Eine Erhöhung des Stroms führt zu tieferen Einschlagkratern und damit erhöhter Rauheit, wobei die Tiefe der Krater im verwendeten Einstellungsbereich nahezu linear wächst. Dies stimmt mit Beobachtungen in der Literatur überein, vgl. [211, 212]. Die steigende Rauheit mit längeren Impulsen lässt sich ebenfalls durch die Theorie der größeren Schmelzkrater erklären. Ab einer gewissen Schmelzfläche wird die Temperaturabgabe in das Dielektrikum so groß, dass der Vorgang stagniert und weiter steigende Impulszeiten keinen Einfluss mehr haben.

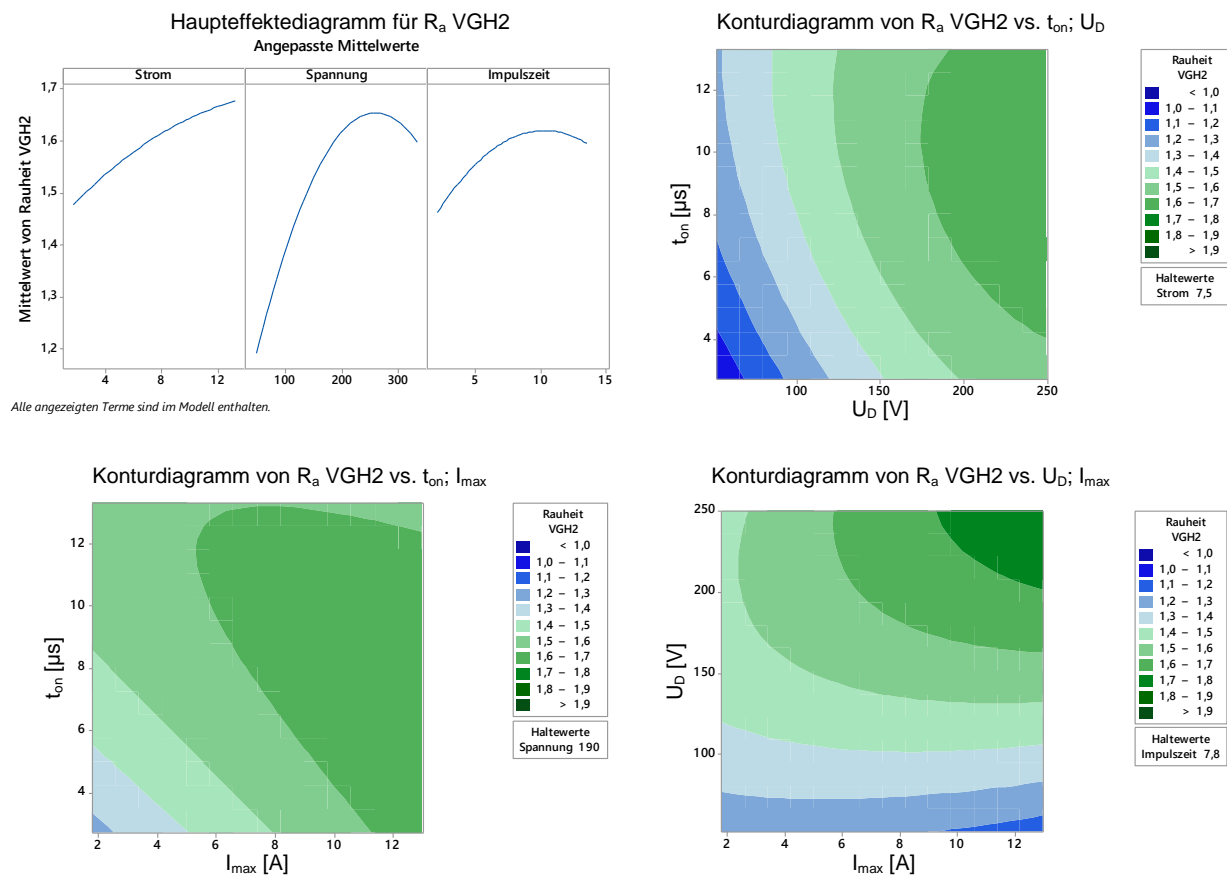


Abbildung 4.29: Haupteffekte- und Konturdiagramme zur Oberflächenrauheit bei VGH2

Auch das Ausfallen der WC-Körner bestimmt die resultierende Oberfläche. Diese können sich agglomerieren, auf der Werkstückoberfläche ablagern und zu instabilen Prozessbedingungen, Fehlentladungen und damit zu sinkender Abtragsrate sowie rauen Oberflächen führen [213].

Die erklärten Modellanteile mit $R^2 = 0,804\text{--}0,854$ zeigen, dass die Modelle insgesamt durchaus zutreffend sind, es jedoch auf den Einzelfall ankommt. Die gewonnenen Erkenntnisse decken sich weitgehend mit der Literatur, ungewöhnlich erscheint allerdings der große Einfluss der Spannung.

4.3.3 Spaltweite

Das Arbeitsergebnis ist von der Wahl der Parameter abhängig, wobei die Spaltweite entscheidend durch die angelegte Spannung beeinflusst wird. Um die Abhängigkeit zu ermitteln, wird ein Versuchsaufbau gemäß Abbildung 4.30 mit geplanten, quaderförmigen Proben verwendet. Es wird eine 10 mm x 10 mm große Elektrode 6 mm seitlich zur Außenkante des Werkstücks versetzt 3 mm tief eingesenkt. Ein Vergleich zwischen der Seitenlänge der Elektrode S_{EI} und dem Bearbeitungsergebnis B_{ist} erlaubt die Ermittlung des seitlichen Funkenspalts nach Gleichung (45). Gemessen wird die erreichte Breite der Einsenkung 0,5 mm und 4,5 mm vom Rand entfernt in einer Tiefe von 0,3 mm, um nicht im Bereich der Kantenverrundung zu messen. Der frontale Spalt wird durch mittiges Messen der erreichten und der eingestellten Eindringtiefe bei ausgeschalteter Spaltkompensation, die zu einer Beeinflussung des Arbeitsspalts führt, bestimmt, siehe Gleichung (46). Die Versuche werden für verschiedene Spannungen (120 V; 190 V; 250 V) bei ansonsten identischen Einstellungen für Strom ($I_{max} = 17\text{ A}$) und Impuls-Pausenzeit ($t_{on} = 10\text{ }\mu\text{s}$; $t_{off} = 17,8\text{ }\mu\text{s}$) durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit einem 3D-Koordinatenmessgerät Zeiss Prismo vermessen, siehe Anhang D.

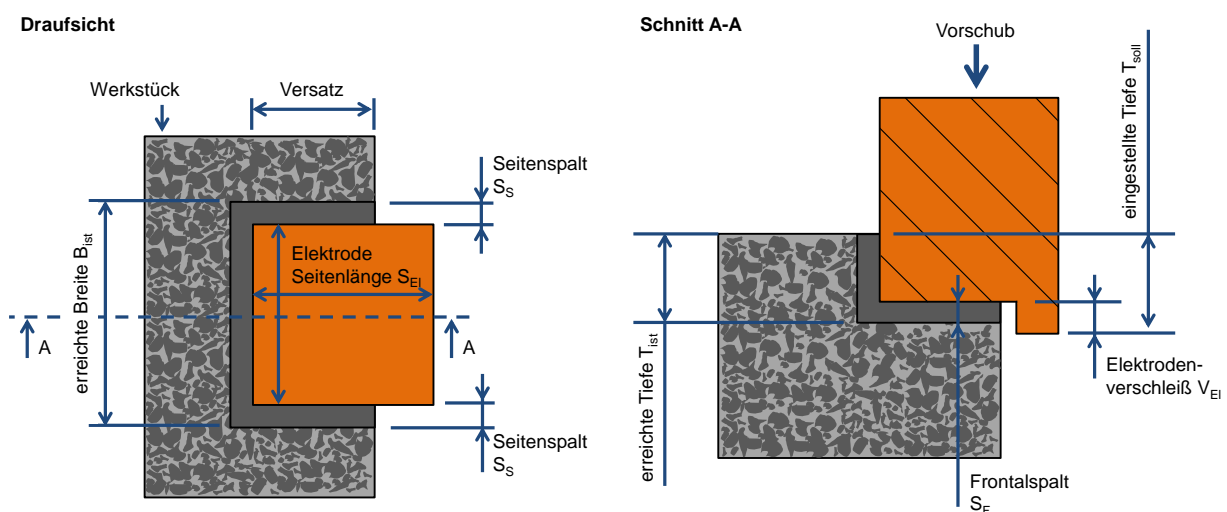


Abbildung 4.30: Versuchsaufbau der EDM-Spaltweitenversuche

$$S_s = \frac{B_{\text{ist}} - S_{\text{El}}}{2} \quad \begin{array}{l} S_s: \text{Seitenspalt [mm]} \\ B_{\text{ist}}: \text{erreichte Breite der Tasche [mm]} \\ S_{\text{EL}}: \text{Seitenlänge der Elektrode [mm]} \end{array} \quad (45)$$

$$S_F = T_{\text{ist}} - T_{\text{soll}} + V_{\text{El}} \quad \begin{array}{l} S_F: \text{Frontalspalt [mm]} \\ T_{\text{ist}}: \text{erreichte Tiefe der Tasche [mm]} \\ T_{\text{soll}}: \text{eingestellte Tiefe [mm]} \\ V_{\text{El}}: \text{Elektrodenverschleiß [mm]} \end{array} \quad (46)$$

Vor allem die Kenntnis über den Seitenspalt kann zur Auslegung der Elektrodengeometrie für den PECM-Prozess verwendet werden. Die Versuche zur Ermittlung des Seitenspalts werden ebenfalls nicht mittels Datenaufnahme kontrolliert, da eine eindeutige Zuordnung des über die frontale bzw. seitliche Fläche fließenden Stroms bei vorgegebener Potentialdifferenz nicht möglich ist. Die ermittelten Spaltweiten sind in Abbildung 4.31 dargestellt. Der Frontalspalt weist bei mittlerer Einstellung der Spannung den kleinsten Wert auf. Der parabelförmige Verlauf passt zu den Resultaten der Auswertung von Verschleiß, Abtragsrate und Rauheit im vorangegangenen Kapitel, deren Optimum ebenfalls stark von der Spannung abhängt und im mittleren Einstellungsbereich liegt. Allerdings zeigen die Fehlerindikatoren, dass die Werte für den Frontalspalt stark schwanken. Obwohl die Spaltkompensation ausgeschaltet war, wird der Frontalspalt durch weitere Parameter der Maschinenregelung oder durch physikalische Effekte beeinflusst.

Der sich ausbildende Seitenspalt wächst nach [210] mit höherem Kobaltgehalt. Dieser Sachverhalt kann nicht bestätigt werden, wie in Abbildung 4.31 rechts zu erkennen ist. Gemäß den Bestandteilen im Hartmetall müsste demnach die Sorte VGH627 eine größere Spaltweite aufweisen. Der Seitenspalt wächst mit zunehmender Spannung in linearer Weise, was der Erwartung nach dem Ohm'schen Gesetz entspricht. VGH2 weist durchgehend einen etwas größeren Seitenspalt auf und zeigt eine höhere spannungsabhängige Aufweitung als VG627.

$$\text{VGH2:} \quad \Delta S_s = 0,0003 \left[\frac{\text{mm}}{\text{V}} \right] \quad (47)$$

$$\text{VG627:} \quad \Delta S_s = 0,0002 \left[\frac{\text{mm}}{\text{V}} \right] \quad (48)$$

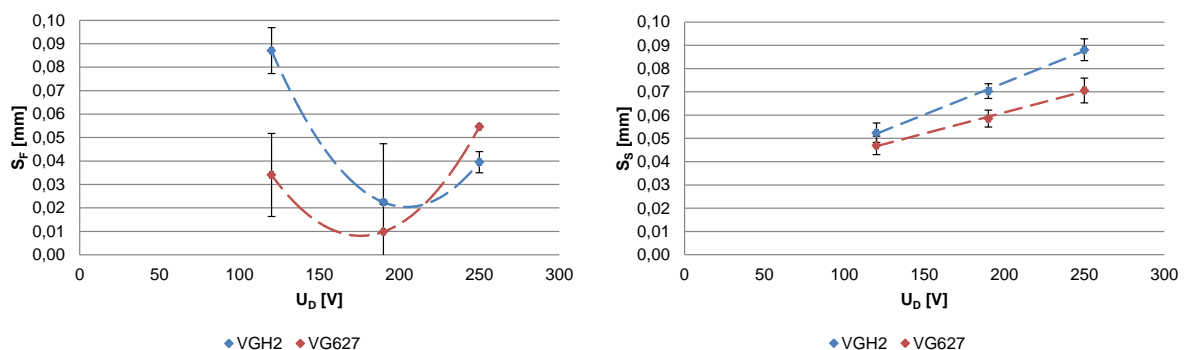


Abbildung 4.31: Weite des Frontalspalts (S_F) und des Seitenspalts (S_s) bei der Hartmetallbearbeitung

Die im Vergleich zu den nach Abbildung 2.15 erwarteten bis zu zehnmal größeren Spaltweiten sind damit zu erklären, dass lokal die Rauheitsspitzen der Werkstück-,

aber auch der Werkzeugoberfläche die minimale Spaltweite bestimmen und so zu lokal unterschiedlichen Felddichten führen. Die einfache Berechnung der theoretischen Spaltweite vernachlässigt diesen Effekt genauso wie Einflüsse von Material, Impulszeit, potentiellen Polarisierungseffekten oder Verschmutzung des Dielektrikums, welche zu einem Absinken der Durchschlagsfestigkeit führt. Eine zur Beurteilung des Seitenspalts notwendige Einsenkung, wie beispielsweise die hier verwendete Tasche, erschwert die Spülung der Bearbeitungsstelle, sodass die Pausenzeit unter Umständen nicht für einen kompletten Austausch des Dielektrikums ausreicht. Die erhöhte Leitfähigkeit führt in der Folge zu einer größeren Spaltweite. Die sich ausbildende Spaltweite wird also neben der Spannung sehr stark von den Spülbedingungen und dem Werkstückmaterial beeinflusst.

4.3.4 Oberfläche und Randzone

Während der EDM-Bearbeitung entsteht sowohl auf dem Werkstück als auch auf dem Werkzeug eine wärmebeeinflusste Zone. Sollen nun die verschlissenen Elektroden im Rahmen der Prozesskette erneut strukturiert werden, bestünde die Möglichkeit einer Beeinflussung des PECM-Verhaltens bei der Restrukturierung der Elektrode durch die zuvor wärmebeeinflusste Zone. Zum Verständnis dieses möglichen Einflusses werden die Oberflächen und Randzonen näher untersucht.

Oberfläche

Die funkenerosive Bearbeitung der Hartmetalle erfolgt bei einem maximalen Strom von $I_{\max} = 17 \text{ A}$, einer Zündspannung von $U_D = 250 \text{ V}$, einer Impulszeit von $t_{\text{on}} = 10 \text{ } \mu\text{s}$, einer Pausenzeit von $t_{\text{off}} = 17,8 \text{ } \mu\text{s}$ (maschineninterner Parametersatz 422623) und einer Zustellung von 0,5 mm.

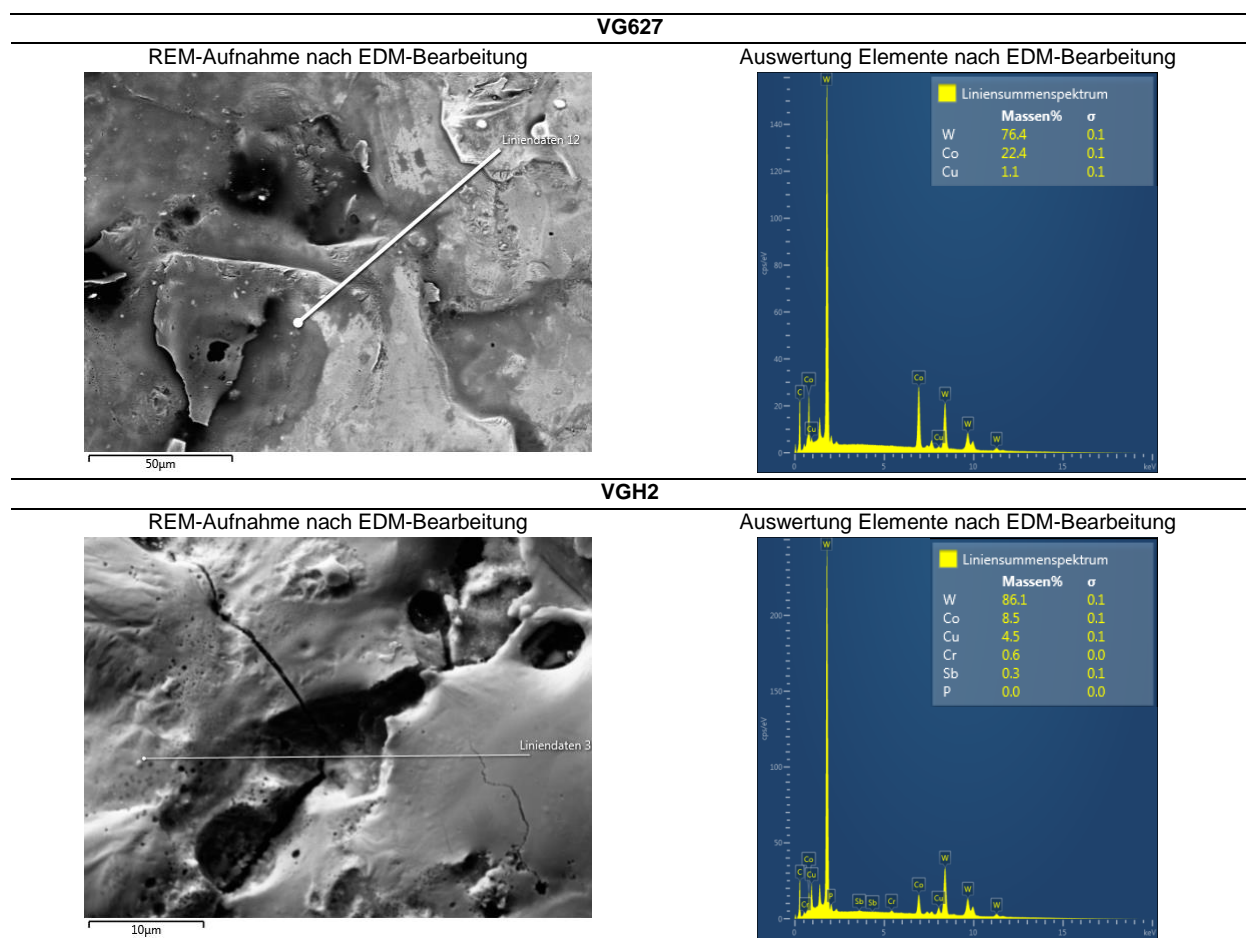
Untersucht werden sowohl die Hartmetallwerkstücke als auch die Kupferelektroden. Die Ergebnisse der Röntgenspektroskopie zeigen, dass sich während der EDM-Bearbeitung Kupfer auf der Werkstückoberfläche absetzt, welches von der Werkzeugelektrode stammt, vgl. Tabelle 4.18 und Tabelle 4.19. Es fällt auf, dass die detektierten Atomprozentanteile für Wolfram und Kobalt nach der Bearbeitung vor allem für VG627 vom Eingangszustand abweichen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die relativ großen WC-Körner des VG627 aufgrund des Wärmeschocks während der EDM-Bearbeitung platzen oder ausfallen und abgetragen werden. Die kleineren WC-Körner des VGH2 bieten im Verhältnis zu ihrem Volumen eine größere Oberfläche in der Kobalteinbettung, sodass durch schnellere Wärmeabfuhr höheren Temperaturen widerstanden werden kann. Diese These wird unterstützt durch die Möglichkeit, dass vor allem bei höheren Temperaturen ein Teil der Wolframcarbide zu W_2C und Kohlenstoff dissoziiert werden kann, siehe Gleichung (49) [178, 214], sodass die detektierten Anteile gleich bleiben.



Tabelle 4.18: Anteile der Elemente in Massen- und Atomprozenten der Hartmetalle nach EDM

	Element	Massenprozent [%]	Atommasse [u]	Atomprozent [At %]	Atomprozent [At %] Lieferzustand
VG627 nach EDM	W	76,4	183,85	51,1	70,2
	Co	22,4	58,93	46,8	29,8
	Cu	1,1	63,55	2,1	
VGH2 nach EDM	W	86,1	183,85	67,2	69,0
	Co	8,5	58,93	20,7	29,0
	Cu	4,5	63,55	10,2	
	Cr	0,6	52,00	1,7	2,0
	Rest	0,3		0,4	

Tabelle 4.19: REM- und EDX-Aufnahmen der Hartmetalle nach EDM



Die Betrachtung des Übersichtsbildes in Abbildung 4.32 zeigt deutlich die an der Oberfläche aufgeschmolzenen und abgekühlten Materialanteile sowie die sich überlagernden Krater und Risse. Die Rissbildung wird vermutlich dadurch verursacht, dass infolge der Wärmeausdehnung die Brücken zwischen den Hartstoffkörnern aufgerissen werden [107]. Es ist zu erkennen, dass die Einschläge bevorzugt entlang der Risse entstehen. Dies kann auf die lokal andere Feldstärke nach Entstehen eines Risses aufgrund von Zugeigenspannungen zurückgeführt werden, sodass die folgenden Einschläge entlang dieses Risses wandern.

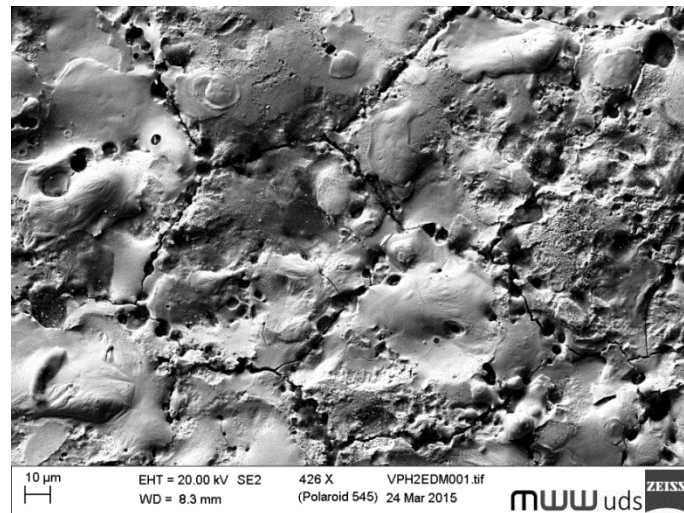


Abbildung 4.32: Rasterelektronenmikroskopische Übersichtsaufnahme einer funkenerodierten Hartmetallprobe VGH2

Während der Bearbeitung entsteht auf den Elektroden eine schwarz gefärbte Schicht (engl. black layer). Diese Schicht besteht [215] zufolge aus geackten Kohlenstoffverbindungen, die aus dem Dielektrikum stammen. Die Untersuchung der schwarzen Schicht auf den Kupferelektroden erfolgt hier in zwei Ausführungen, um zu sehen, welche Bestandteile sich auf dem Werkzeug abscheiden, siehe Tabelle 4.20. Im ersten Fall (ECu1) wurde VG627 bearbeitet und die Schicht trocken gelassen, im zweiten Fall (ECu2) wurde VGH2 bearbeitet und die schwarze Schicht durch manuelles Abreiben nach dem Prozess weitgehend entfernt. Auch auf dem Werkstück entsteht eine schwarze Schicht, die in [178] ebenfalls als Kohlenstoff identifiziert wird.

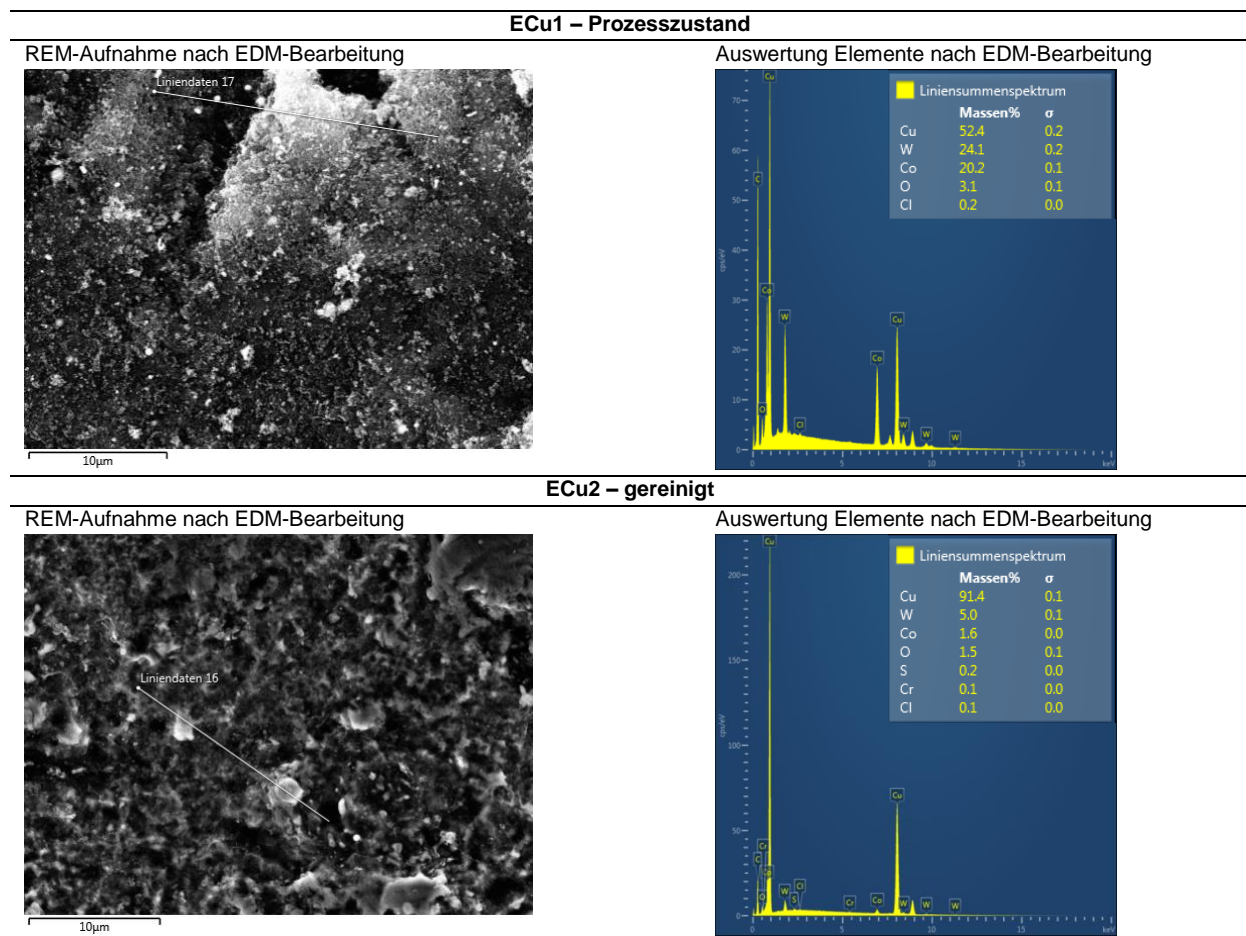
Teile des bearbeiteten Werkstoffs setzen sich am Werkzeug ab, wie durch die Detektion größerer Anteile von Wolfram und Kobalt zu erkennen ist³. Dabei überwiegt der Kobaltanteil, da das Wolfram in Form der Carbide eher mechanisch, also durch Zerplatzen und Ausschlagen, als durch Verdampfen abgetragen wird. Es ist zu erkennen, dass durch die Reinigung der Anteil an Fremdelementen stark verringert wird, diese also direkt nach dem Prozess nicht fest mit dem Elektrodenwerkstoff verbunden sind, und so fast ausschließlich Kupfer detektiert wird.

Tabelle 4.20: Anteile der Elemente in Massen- und Atomprozenten der Kupferelektroden nach EDM

	Element	Massenprozent [%]	Atommasse [u]	Atomprozent [At %]
ECu1 nach EDM von	Cu	52,4	63,55	55,1
	W	24,1	183,85	8,8
	O	3,1	16,00	12,9
VG627	Co	20,2	58,93	22,9
	Rest	0,2		0,3
ECu2 nach EDM von VGH2	Cu	91,4	63,55	90,0
	W	5,0	183,85	1,7
	O	1,5	16,00	5,9
	Co	1,6	58,93	1,7
	Rest	0,5		0,7

³ Die Detektion von Kohlenstoff ist mit dem verwendeten REM nicht möglich

Tabelle 4.21: REM- und EDX-Aufnahmen der Kupferelektroden nach EDM



Randzone

Die Dicke der wärmebeeinflussten Zone wird anhand von Schliffbildern nach der Bearbeitung eines VG627-Werkstücks mit Wolframkupferelektroden bei verschiedenen Entladeenergien ermittelt, siehe Abbildung 4.33. Die verwendeten Parametereinstellungen und damit die theoretischen Entladeenergien sind jeweils unterhalb der Bilder angegeben. Im ersten Bild ist unbearbeitetes Hartmetall im Lieferzustand dargestellt, von links nach rechts und oben nach unten steigt dann die Entladeenergie. Zu erkennen ist, dass die Dicke der sich ausbildenden Schicht von der Entladeenergie abhängt, vgl. [140]. Diese Schicht wächst im Gegensatz zur white layer, die bei der Stahlbearbeitung entsteht, nicht auf der Oberfläche auf (vgl. Abbildung 4.34), sondern die Randzone wird verändert, was an den beinhalteten Körnern zu erkennen ist. Das in [107] berichtete Wachsen der Hartstoffkörner kann optisch durch die vorliegenden Versuche nicht bestätigt werden.

Nach dem Schleifen und dem letzten Politurschritt mit einer 1 µm-Diamantsuspension wurden die Werkstoffe wie folgt geätzt:

- Hartmetall: 10g $K_3[Fe(CN)_6]$ + 10g KOH + 100ml H_2O dest. (Mukami-Lösung)
- Stahl: 97ml Ethanol + 3ml HNO_3 (3 % Nital-Lösung)
- Kupfer: 100ml Ethanol + 20ml HCl + 7g $FeCl_3$

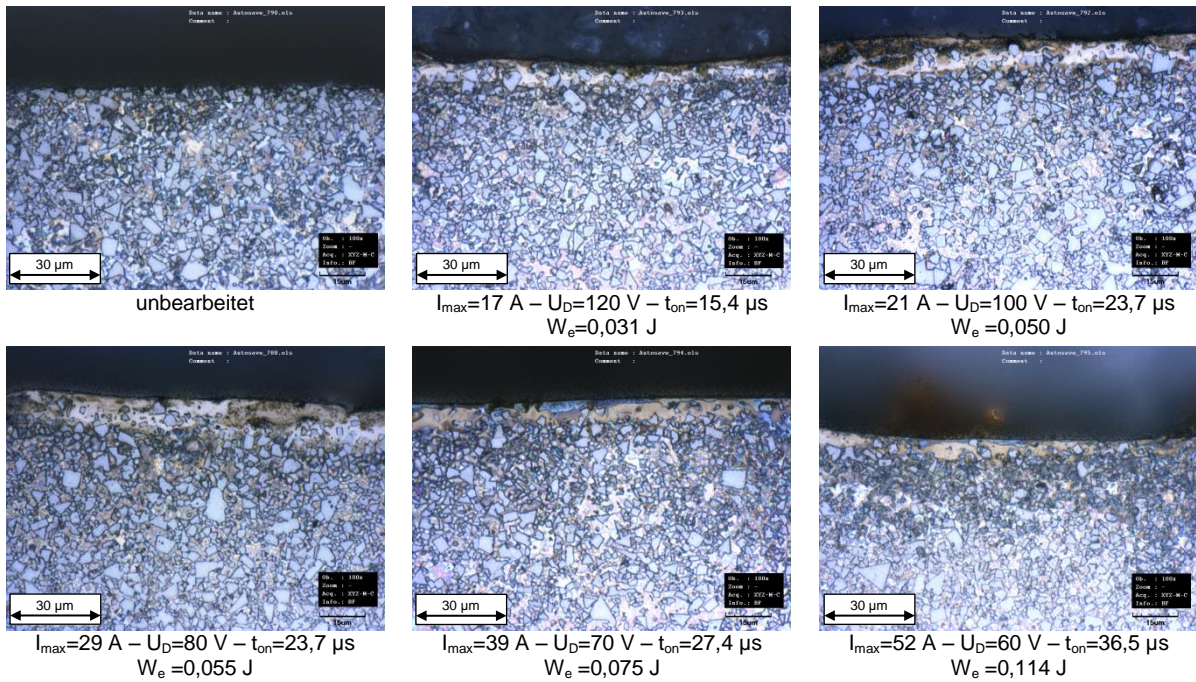


Abbildung 4.33: Randzone von funkenerosiv bearbeitetem Hartmetall VG627

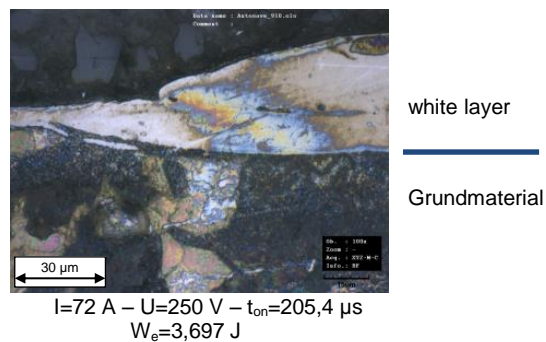
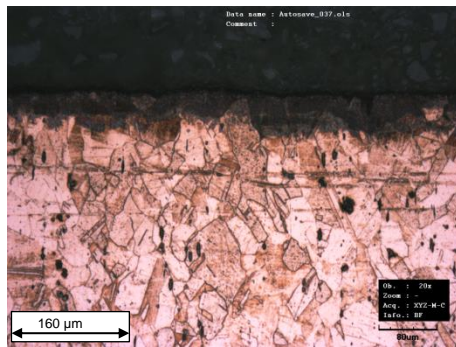


Abbildung 4.34: White layer auf Stahl 1.7131

Eine Untersuchung der Nachstellbarkeit der verwendeten Elektrolytkupfer-Werkzeuge durch PECM für die Bearbeitung von Stahl 1.7131 wurde ebenfalls in [140] durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass sich die elektrochemische Bearbeitbarkeit der eingesetzten Elektroden durch die Funkenerosion nicht ändert. Die verwendeten Kupferelektroden weisen keine entscheidende Änderung der Korngrößen vom Rand in Richtung Grundmaterial auf, siehe Abbildung 4.35. Die an die Elektrode abgegebene Energie reicht nicht aus, um entsprechende Änderungen hervorzurufen. Im Schlibbild ist ebenfalls die schwarze Schicht erkennbar, wobei diese im dargestellten Fall unnatürlich groß erscheint. Ein Grund hierfür kann in einer Unterätzung durch das in den Einbettspalt eindringende Ätzmittel liegen. Allerdings kann kein belastbarer Zusammenhang zwischen der Dicke der schwarzen Schicht (engl. black layer thickness - BLT) und der Entladeenergie (berechnet aus den eingestellten Parametern) gezogen werden, vgl. Abbildung 4.36.



$I=39\text{ A} - U=70\text{ V} - t_{\text{on}}=27,4\ \mu\text{s}$

Abbildung 4.35: Schliffbild einer Kupferelektrode nach dem EDM-Prozess

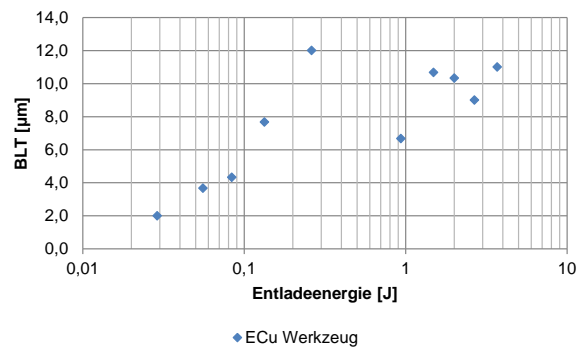


Abbildung 4.36: Dicke der schwarzen Schicht einer Kupferelektrode nach dem EDM-Prozess

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die durch EDM verursachte thermische Belastung keinen merklichen Einfluss auf die Strukturierung durch einen nachfolgenden PECM-Prozess hat und dass die Elektroden sich durch Abreiben unmittelbar nach dem Prozess gut reinigen lassen. In der Folge können verschlissene Elektroden für die Prozesskette ohne gesonderte Vorbearbeitung wieder neu strukturiert werden.

4.3.5 Einfluss der initialen Werkzeugrauheit

Als abbildendes Verfahren überträgt EDM die Werkzeugstruktur auf das Werkstück, wobei prinzipiell auch die Rauheit des Werkzeugs eine Rolle spielt. Die durch den vorangegangenen elektrochemischen Prozess vor allem im Bereich niedriger Stromdichten entstehende hohe Rauheit könnte somit das Ergebnis in Bezug auf die Oberfläche beeinflussen. Daher werden Versuche mit verschiedenen Entladeenergien am Beispiel von VGH2 durchgeführt und die Ergebnisse nach der EDM-Bearbeitung durch Elektroden mit verschiedener Rauheit verglichen. Dabei geht es nur um die Rauheit der eingesetzten Elektroden, die Rauheit der Werkstücke wird nicht variiert.

Die Kupferelektroden werden mittels PECM bei niedriger und hoher Stromdichte bearbeitet, um raue bzw. glatte Oberflächen zu erhalten (bezeichnet als rau bzw. glatt). Als Referenz für eine konventionell hergestellte Elektrode wird derselbe Versuchsablauf zusätzlich mit einer plangedrehten Elektrode durchgeführt (gedreht). Die Oberflächenrauheit des Kupferwerkzeugs wird vor dem Einsatz bzw. die der Hartmetallwerkstücke jeweils nach dem Schruppen und nach dem Schlichten gemessen. Tabelle 4.22 zeigt die verwendeten EDM-Parameter, in Abbildung 4.37 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Die Werkstücke werden der durch Schleifen vorbereiteten Charge VGH2 entnommen. Es werden jeweils vier Werkstücke hergestellt und jede Oberfläche wird zweimal vermessen, sodass für jede Elektrodenrauheit acht Messungen vorliegen, die gemittelt werden. Für jeden Versuch wird eine neue Elektrode verwendet. Die Zustelltiefe beträgt $100\ \mu\text{m}$, um ausschließlich den finalen Abtrag einer Bearbeitung zu simulieren, dabei jedoch

deutlich über der Rauheit der eingesetzten Elektroden zu liegen. Eine größere Zustellung führt zu einer zunehmenden Glättung, aber auch zum Verschleiß der Elektroden, sodass die Zustellung im letzten Schritt geometriebedingt limitiert ist.

Tabelle 4.22: EDM-Parameter zum Einfluss der Werkzeugrauheit

	I [A]	U [V]	t _{on} [μs]	t _{off} [μs]
Schruppen	17,0	250	10,00	23,70
Schlichten	1,2	60	1,31	3,20

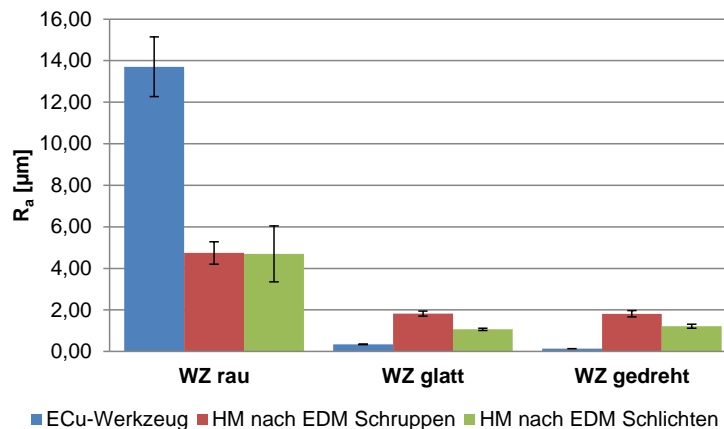


Abbildung 4.37: Einfluss der Werkzeugrauheit auf das EDM-Ergebnis

In Blau ist jeweils die Rauheit des Werkzeugs vor der Bearbeitung, in Rot die Rauheit des Werkstücks nach dem funkenerosiven Schruppen und in Grün die Rauheit des Werkstücks nach dem funkenerosiven Schlichten dargestellt. Beim rauhen Werkzeug ist die Streuung des Prozessergebnisses größer und die Ergebnisse für Schruppen und Schlichten unterscheiden sich kaum, d. h. unter Verwendung des rauhen Werkzeugs entstehen im Schrupp- und im Schlichtprozess praktisch dieselben Oberflächenrauheiten. Der Unterschied im Ergebnis zwischen glattem und gedrehtem Werkzeug ist vernachlässigbar, wobei die Schlichtoperation in diesen Fällen wie gewünscht zu einer glatteren Oberfläche führt.

Werden die roten bzw. grünen Balken miteinander verglichen, wird klar, dass die Werkzeugrauheit einen signifikanten Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis hat. So führt ein raues Werkzeug bei gleichen Bearbeitungsparametern zu einer raueren Oberfläche auf dem Werkstück als ein Werkzeug mit glatter Oberfläche. Folglich ist die von EDM erzeugte Oberfläche abhängig von den Bearbeitungsparametern und der Rauheit des eingesetzten Werkzeugs. Somit können verschiedene Rauheiten, die potentiell auf den elektrochemisch strukturierten Elektroden entstehen, einen Einfluss auf das Prozessergebnis haben und sollten so weit wie möglich vermieden werden.

Um eine möglichst homogene Oberflächenrauheit zu erreichen, kann eine zweistufige PECM-Bearbeitung förderlich sein, wie sie in [198] vorgestellt wurde, bei der nach der Strukturierung des Werkstücks ein zweiter Schritt zur Einebnung der Oberfläche angeschlossen wird.

4.3.6 Fazit und Festlegen einer Bearbeitungsstrategie

Es wurde gezeigt, dass die Entladeenergie als Kombination aus Strom, Spannung und Impulszeit das Prozessergebnis entscheidend beeinflusst, dabei jedoch jeder Parameter für sich eigene Auswirkungen hat. Die Spannung hat einen sehr großen Einfluss auf den Prozess, denn sie bestimmt nicht nur die Spaltweite, sondern auch den Elektrodenverschleiß, die Abtragsrate und die Oberfläche. Elektrodenverschleiß und Abtragsrate stehen in enger Verbindung, sodass ein hoher Verschleiß mit einem niedrigen Abtrag einhergeht und umgekehrt.

Die Strukturübertragung im funkenerosiven Prozess sollte aufgrund des hohen Verschleißes der Kupferelektroden mindestens zweistufig durchgeführt und die Parameter dahingehend festgelegt werden. Die Auswertung der mittels RSM erstellten Modelle lässt die Optimierung der Einstellparameter hinsichtlich bestimmter Kriterien zu. Diese Werte führen zu optimalen Bedingungen für den Abtrag bei gleichzeitig minimalem Verschleiß. Das bedeutet, die Spaltweite ist bezogen auf Strom und Impulszeit so optimiert, dass wenige Prozessentartungen vorkommen. In der Folge ist auch der Elektrodenverschleiß sehr gering. Bezogen auf die Oberfläche führt die geringste Entladeenergie zum besten Ergebnis.

1. Schritt: Strukturzeugung. Um die Struktur möglichst gut und in angemessener Zeit zu reproduzieren, sollte der MRR-Wert hoch sowie der Verschleiß zugleich niedrig sein. Die optimierten Parameter für VGH2 sind gemäß den erstellten Modellen in Abbildung 4.38 dargestellt.

$$I_{\max} = 7,1 \text{ A}$$

$$U_D = 190 \text{ V}$$

$$t_{\text{on}} = 7,4 \text{ } \mu\text{s}$$

2. Schritt: Oberflächenglättung. Die resultierende Oberfläche sollte möglichst glatt werden. Der Elektrodenverschleiß spielt hierbei eine unter geordnete Rolle. Die optimierten Parameter sind in Abbildung 4.39 dargestellt.

$$I_{\max} = 5,4 \text{ A}$$

$$U_D = 52 \text{ V}$$

$$t_{\text{on}} = 2,7 \text{ } \mu\text{s}$$

Je nach Strukturhöhe bzw. Bearbeitungstiefe muss der erste Schritt wiederholt werden, um eine ausreichende Strukturabbildung zu gewährleisten, die nur noch geglättet werden muss. Gegebenenfalls muss zum Abtrag der Wärmeeinflusszone (WEZ) auf dem Hartmetall mit Zwischenschritten mit abnehmender Entladeenergie gearbeitet werden, die die Schicht nach und nach abtragen, ohne eine weitere tiefgehende WEZ zu generieren. Eine dahingehende Optimierung war aber nicht Ziel der vorliegenden Untersuchung.

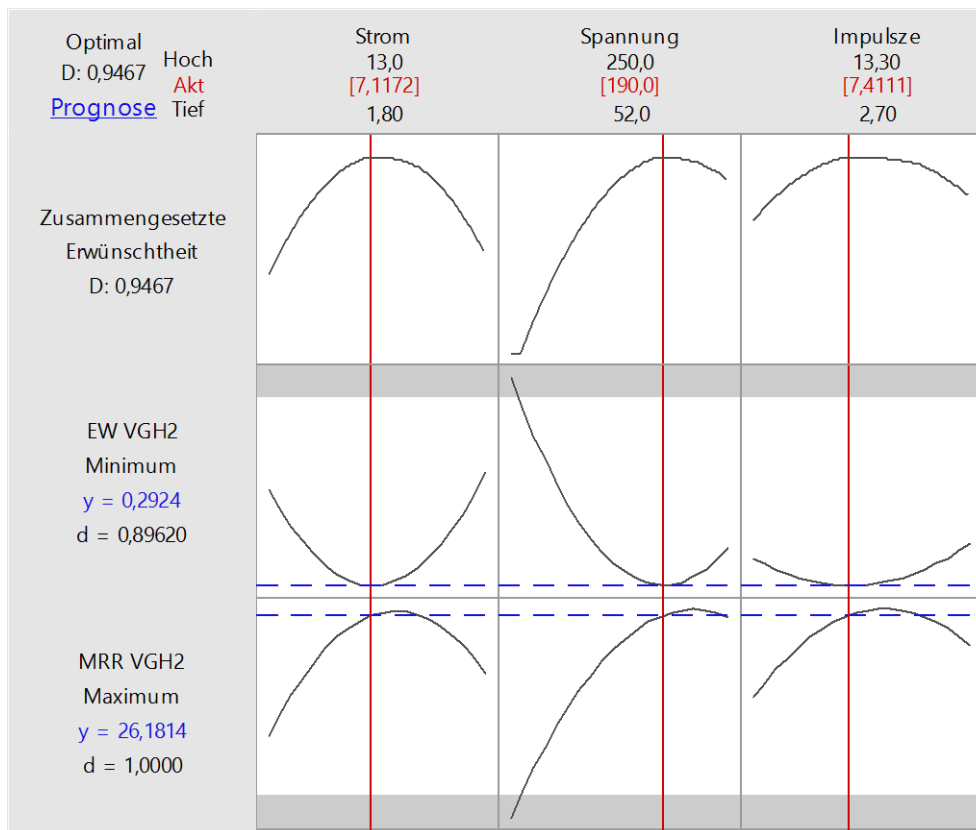


Abbildung 4.38: Optimierte Parameter für die Strukturierung von VGH2

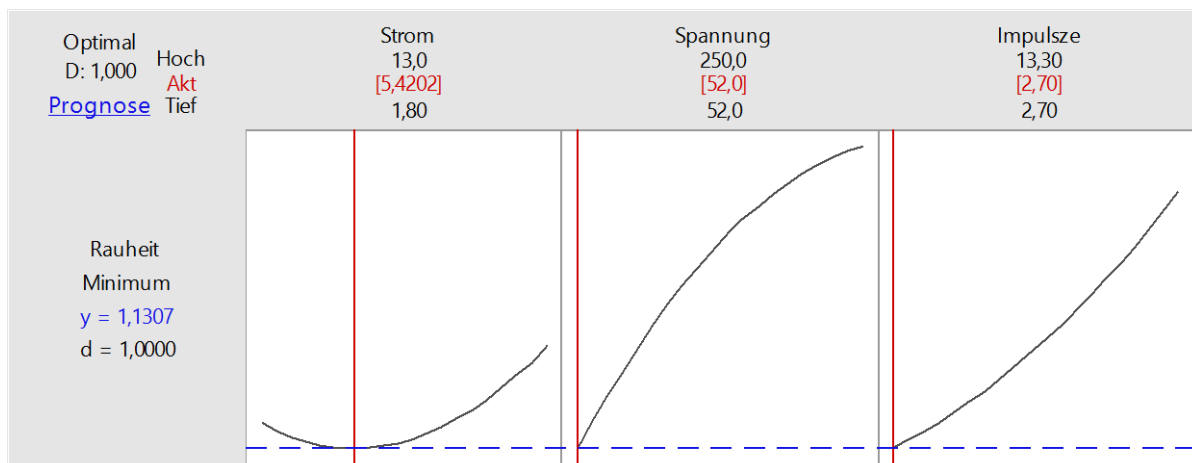


Abbildung 4.39: Optimierte Parameter für die Oberflächenglättung von VGH2

5 Aufbau der PECM-EDM-Prozesskette

Im Folgenden wird die PECM-EDM-Prozesskette mit dem Ziel der Hartmetallbearbeitung an einigen Beispielen demonstriert. Dazu werden die zur funkenerosiven Bearbeitung benötigten Kupferelektroden in einem ersten Schritt mittels PECM strukturiert und in einem zweiten Schritt als Werkzeuge in der Funkenerosion eingesetzt.

5.1 Geometrieübertragung von Grundformen

Um die Machbarkeit der Prozesskette zu demonstrieren und den Einfluss der Form zu überprüfen, werden verschiedene Strukturen auf Hartmetall übertragen. Die Wahl fällt auf einfache geometrische Formen, aus denen die meisten übergeordneten Strukturen zusammengesetzt werden können:

- Quader groß
- Quader klein
- Dreieck
- Halbrund groß
- Halbrund klein

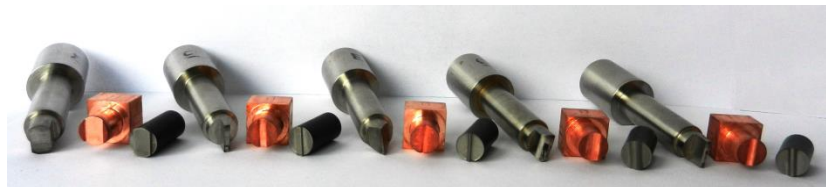


Abbildung 5.1: PECM-EDM-Prozesskette

Die Wahl verschiedener Geometriegrößen derselben Form erfolgt aus zweierlei Gründen:

1. Verwirbelungen des Elektrolyten an Kanten, z. B. durch seitliches Anspülen, können bei PECM zu lokal unterschiedlichem Abtrag führen, wie in [216] gezeigt wird. Liegen also Kanten weiter auseinander oder näher zusammen, unterscheiden sich die entstehenden Geometrien. Somit ist eine Übertragung der Ergebnisse durch Skalierung zwischen verschiedenen Geometriegrößen nicht ohne Weiteres möglich.
2. In [217] wird gezeigt, dass eine seitliche Spülung bei der Einsenkung von Strukturen einen entscheidenden Einfluss auf die Geometriebildung hat. So entsteht an der angeströmten Seite ein größerer Spalt als an der Seite, an welcher der Elektrolyt wegströmt. Die Ursache dafür wird in der Verunreinigung des Elektrolyten über den Spülweg gesehen, sodass aufgrund von abgetragenen Partikeln oder Gasblasen die Leitfähigkeit zunehmend vermindert und damit die Spaltausbildung beeinflusst wird.

Als Bewertungsgrundlage für die Güte der Übertragung wird der Faktor R (für Reproduzierbarkeit) eingeführt, der sich nach Gleichung (50) berechnet, vgl. [218]. Dieser bewertet die Abweichung der gemessenen Attribute der Endstruktur zur Initialstruktur in Prozent.

$$R = \left(1 - \left| 1 - \frac{\text{Attribut}_{\text{gemessen}}}{\text{Attribut}_{\text{master}}} \right| \right) \cdot 100 [\%] \quad (50)$$

Die Übertragung der Formen wird exemplarisch anhand des Hartmetalls VGH2 untersucht. Die Messungen werden mittels Koordinatenmessgerät, Laserscanning-Mikroskopie (Pitchweite 8 µm) und Digitalmikroskopie bei verschiedenen Vergrößerungen durchgeführt. Für jedes erfasste Geometriemerkmal werden drei Messungen durchgeführt und gemittelt. In Abbildung 5.2 sind die im PECM-Schritt verwendeten Kathoden (folgend auch als Master bezeichnet) abgebildet.

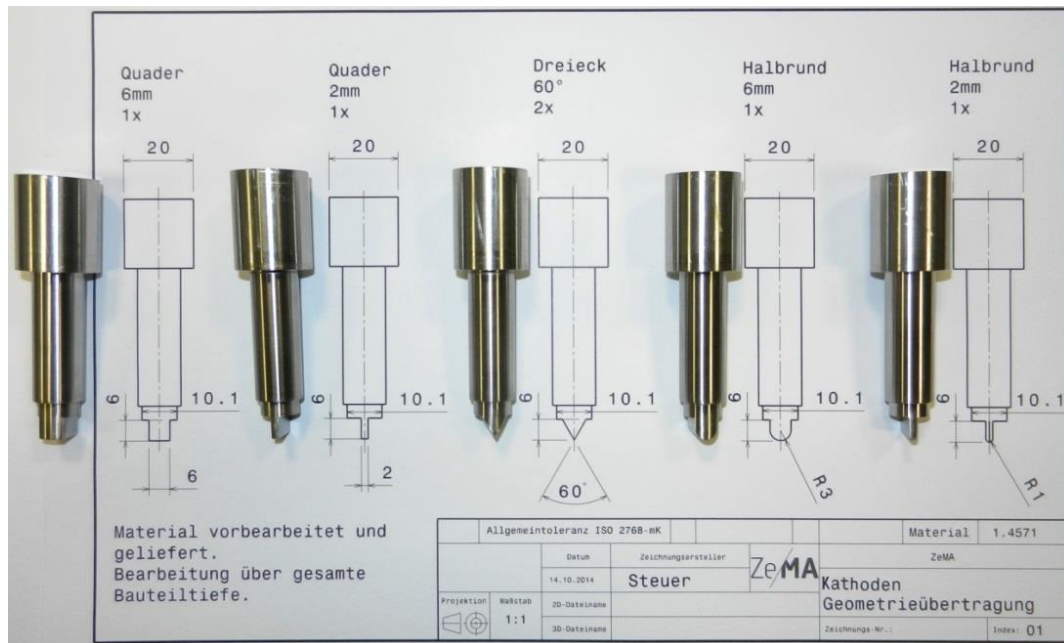


Abbildung 5.2: Kathoden zur Übertragung der Grundformen

Die Wahl der Bearbeitungsparameter erfolgt anhand der bisher gewonnenen Erkenntnisse in Abhängigkeit von der jeweiligen Geometrie und sind für PECM Tabelle 5.1 und für EDM Tabelle 5.2 zu entnehmen.

Im PECM-Schritt wird die bereits zur Untersuchung des Materialverhaltens verwendete Kammer genutzt. Um den Einfluss der Spülrichtung gering zu halten, wird die Struktur entlang der Längsrichtung gespült, damit der Elektrolyt nicht um Kanten strömen muss. Für die Funkenerosion werden an der Maschine einstellbare Stufen gewählt. Die Wahl des im Vergleich zur automatischen Optimierung niedrigeren Stroms zum Glätten der Oberfläche liegt in der damit noch glatter zu erwartenden Oberfläche begründet. Die Auslegung der Zustellung für PECM und EDM erfolgt basierend auf der Zielhöhe der Strukturen von $h = 1,0$ mm. Die große Zustellung für EDM berücksichtigt den Elektrodenverschleiß. Das Werkstück wird für jeden Arbeitsschritt neu eingemessen, da die Bearbeitung zwar in einer Aufspannung, jedoch mit wechselnden Elektroden durchgeführt wird.

Zwischen den Prozessen werden die Werkstücke gründlich durch Abwaschen mit Osmosewasser gereinigt und anschließend getrocknet, um ein Verschleppen des

Elektrolytmediums aus dem PECM-Prozess in den Dielektrikumkreislauf der EDM-Anlage zu vermeiden.

Tabelle 5.1: Parameter für die elektrochemische Strukturübertragung

Strukturierung (10 V, 200 kPa)				
	Vorschub [mm/min]	Impulszeit [ms]	Anfangsspalt [mm]	Zustellung [mm]
Quader groß	0,19	2	0,033	0,957
Quader klein	0,19	2	0,033	0,957
Dreieck	0,15	3	0,040	0,950
Halbrund groß	0,17	2	0,039	0,951
Halbrund klein	0,19	2	0,033	0,957
Oberflächenglättung (200 kPa)				
	Spannung [V]	Impulszeit [ms]	Spalt [mm]	Bearbeitungszeit [s]
Quader groß	14,72	1	0,040	3,93
Quader klein	14,72	1	0,040	3,93
Dreieck	16,25	1	0,048	3,93
Halbrund groß	16,03	1	0,047	3,93
Halbrund klein	14,72	1	0,040	3,93

Tabelle 5.2: Parameter für die funkenerosive Strukturübertragung

	Strom [A]	Spannung [V]	Impulszeit [ms]	Zustellung [mm]
Strukturzeugung	7,1	190	7,5	1,521
Oberflächenglättung	1,8	52	2,7	0,232

In Tabelle 5.3 sind die Stufen der Prozesskette abgebildet. In der ersten Zeile sind die vermessenen Stellen zur Berechnung der Reproduktion skizziert. In der zweiten Zeile sind die Master abgebildet, darunter das Ergebnis nach der PECM-Strukturierung. In der letzten Zeile sind die seitlich geschliffenen Hartmetall-Produkte zu sehen. Optisch fällt die Verrundung der Kanten nach dem PECM-Prozess auf. Dies ist ein nicht vermeidbarer Vorgang beim elektrochemischen Abtragen, der jedoch durch die Wahl eines anderen Elektrolyten vermindert werden könnte.

Die mittels Koordinatenmessgerät, optischer und Laserscanning-Mikroskopie vermessenen Ergebnisse sind in Tabelle 5.4 zu finden (die Strukturhöhe der Master wird mit 1000 μm angegeben, da dies die Zielhöhe ist). Die Oberflächenrauheit wird an zwei verschiedenen Positionen auf dem Hartmetall-Werkstück vermessen: Die Messstelle R_{a1} liegt mittig auf der Struktur, R_{a2} wurde neben der Struktur gemessen. An den Werten ist zu erkennen, dass die eigentliche Struktur eine glatte Oberfläche aufweist. Die erhöhte Rauheit der Nebenfläche resultiert aus der Problematik der Streustrahlung im PECM. Da hier unisolierte Elektroden verwendet werden, führt die im Vergleich niedrigere Stromdichte zu rauen Oberflächen. Dieses Verhalten verdeutlicht aber auch, wie hochwertig die Übertragung mittels EDM erfolgen kann. Wie an den Abbildungen deutlich wird, ist die Vermessung der seitlichen Aufweitung nicht sinnvoll möglich, da sich ausgehend von scharfen Kanten Radien ausbilden und sich somit Strukturbreite und Beginn eines Radius nicht eindeutig unterscheiden lassen.

Tabelle 5.3: Anwendung der PECM-EDM-Prozesskette für die Grundformen

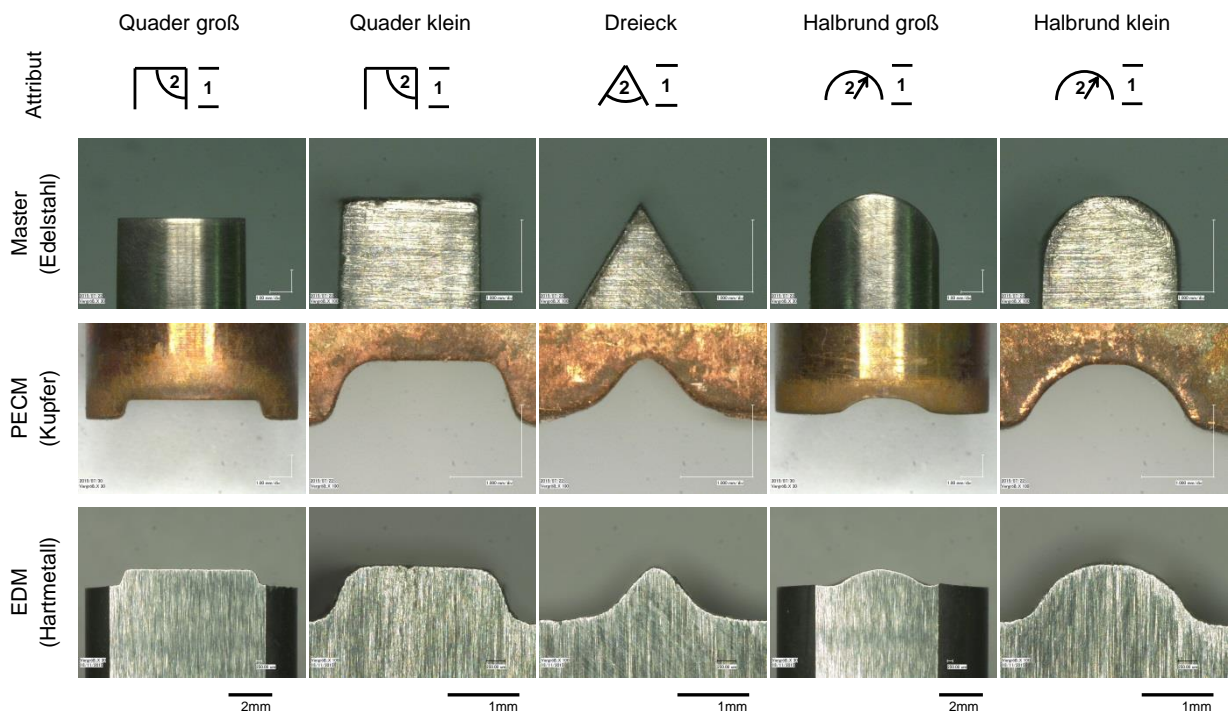


Tabelle 5.4: Übertragungsergebnisse der Grundformen

Struktur	Attribut	Master	Nach PECM	Nach EDM	R _{a1} [µm]	R _{a2} [µm]
Quader groß	1 - Strukturhöhe [µm]	1000,00	934,50	884,30	1,76	2,38
	2 - Flankenwinkel [°]	90,73	110,36	116,67		
Quader klein	1 - Strukturhöhe [µm]	1000,00	962,26	861,74	1,35	1,37
	2 - Flankenwinkel [°]	90,74	108,77	116,25		
Dreieck	1 - Strukturhöhe [µm]	1000,00	936,21	774,38	1,26	2,97
	2 - Flankenwinkel [°]	62,64	76,63	95,55		
Halbrund groß	1 - Strukturhöhe [µm]	1000,00	953,17	806,65	1,18	2,15
	2 - Radius [µm]	3022,30	3382,00	3374,00		
Halbrund klein	1 - Strukturhöhe [µm]	1000,00	991,16	904,92	0,94	2,00
	2 - Radius [µm]	1034,60	1197,33	1271,80		

Beim Vergleich mittels des Faktors R fällt auf, dass der größte Verlust im elektrochemischen Prozess im Bereich der seitlichen Aufweitung entsteht, erkennbar am größer werdenden Winkel, im funkenerosiven Prozess hingegen in der Höhe der Struktur, siehe Tabelle 5.5.

Tabelle 5.5: Übertragungsergebnisse der Einzelprozesse und über die Prozesskette

Struktur	Attribut	Einzelprozess PECM	Einzelprozess EDM	Prozesskette
		R [%]	R [%]	R [%]
Quader groß	1 - Strukturhöhe [µm]	93,45	94,63	88,43
	2 - Flankenwinkel [°]	78,36	94,29	71,41
Quader klein	1 - Strukturhöhe [µm]	96,23	89,55	86,17
	2 - Flankenwinkel [°]	80,12	93,13	71,88
Dreieck	1 - Strukturhöhe [µm]	93,62	82,71	77,44
	2 - Flankenwinkel [°]	77,67	89,79	65,19
Halbrund groß	1 - Strukturhöhe [µm]	95,32	84,63	80,67
	2 - Radius [µm]	88,65	99,75	88,36
Halbrundklein	1 - Strukturhöhe [µm]	99,12	91,30	90,49
	2 - Radius [µm]	84,27	93,78	77,07

Bei der Berechnung der Übertragungsgüte der Einzelprozesse werden die Maße des vorangegangenen Prozesses verwendet, bei der Bewertung von PECM also die Messwerte der Master und bei der Bewertung von EDM die Ergebnisse von PECM. Die letzte Spalte bewertet entsprechend die Prozesskette, also Master zu Produkt. Die Strukturhöhe kann durch weiteres Zustellen der Werkzeuge noch verbessert werden. EDM bietet trotz des Elektrodenverschleißes die bessere Abbildungsgüte, da der frontal auftretende Verschleiß durch eine Vergrößerung der Zustellung bis zu einem gewissen Grad kompensiert werden kann. Der Seitenspalt bei EDM entsteht nur durch Ausfunken über die Seite, bis eine konstante spannungsabhängige Spaltweite erreicht ist. Dagegen entwickelt sich bei PECM bis zum Unterschreiten der für die Materialauflösung notwendigen Mindeststromdichte der Seitenspalt kontinuierlich weiter. Auch hier lässt sich die Höhe durch entsprechende Zustellung sehr gut übertragen.

Unabhängig von der einzelnen Geometrie liegt die Reproduktion im Mittel bei $R = 84,64\%$ für die Höhe, $R = 69,49\%$ für die Winkel und $R = 82,72\%$ für den Radius. Ein Grund für die Übertragungsverluste liegt in der doppelten Negativ-Abbildung der Struktur. Bei einer wie hier verwendeten Außengeometrie ergibt sich durch die Abbildung im PECM eine Innengeometrie mit um die Spaltweite vergrößerten Abmaßen. Diese Geometrie wird dann wiederum in EDM abgebildet, wodurch sich wieder die gewünschte Außengeometrie ergibt, reduziert um die entsprechende bei EDM kleinere Spaltweite. Als Ausreißer fällt der Flankenwinkel des Dreiecks auf, für den in beiden Prozessen starke Übertragungsverluste zu beobachten sind. Beide Prozesse arbeiten und übertragen Strukturen unter dem Einfluss des elektrischen Feldes, daher lassen sich abgerundete Formen bzw. Kanten aufgrund gleichmäßigerer Feld- und damit Spaltausbildung besser reproduzieren. Ideal wären identische Spaltweiten bei beiden Prozessen, um eine bestmögliche Abbildung zu gewährleisten.

5.2 Geometrieübertragung feiner Strukturen

Auch relativ feine Strukturen lassen sich mittels der Prozesskette übertragen, wie die Abbildungen in Tabelle 5.6 zeigen, vgl. auch [218]. Die Güte der Übertragung hängt jedoch stark von der Struktur ab, wie die Messergebnisse und R-Werte in Tabelle 5.7 zeigen. Hier wird ein feinkörniges Hartmetall (WC-Korngröße $0,8\ \mu\text{m}$) mit $89,7\%$ WC, $10,0\%$ Co und $0,3\%$ TiC+Ta₂NbC verwendet. Im funkenerosiven Teil werden drei Elektroden zur Strukturierung verwendet, um die Abbildegenauigkeit weiter zu verbessern. Die Attribute werden mittels optischer und Laserscanning-Mikroskopie ermittelt. Die Rauheiten werden parallel zur Strukturausrichtung gemessen.

Die Berechnung des Reproduktionskennwertes R bestätigt das Ergebnis, dass sich abgerundete Formen besser reproduzieren lassen. So wird für die grobe Feilenstruktur und den Golfball ein sehr guter Wert von $R = 82,82\text{--}96,70\%$ und für

die feine Feilenstruktur und den Sägezahn ein Wert von lediglich $R = 33,33\text{--}46,07\%$ erreicht. Damit können die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Kapitel auch für diese Strukturen bestätigt werden.

Tabelle 5.6: Anwendung der PECM-EDM-Prozesskette für feine Strukturen

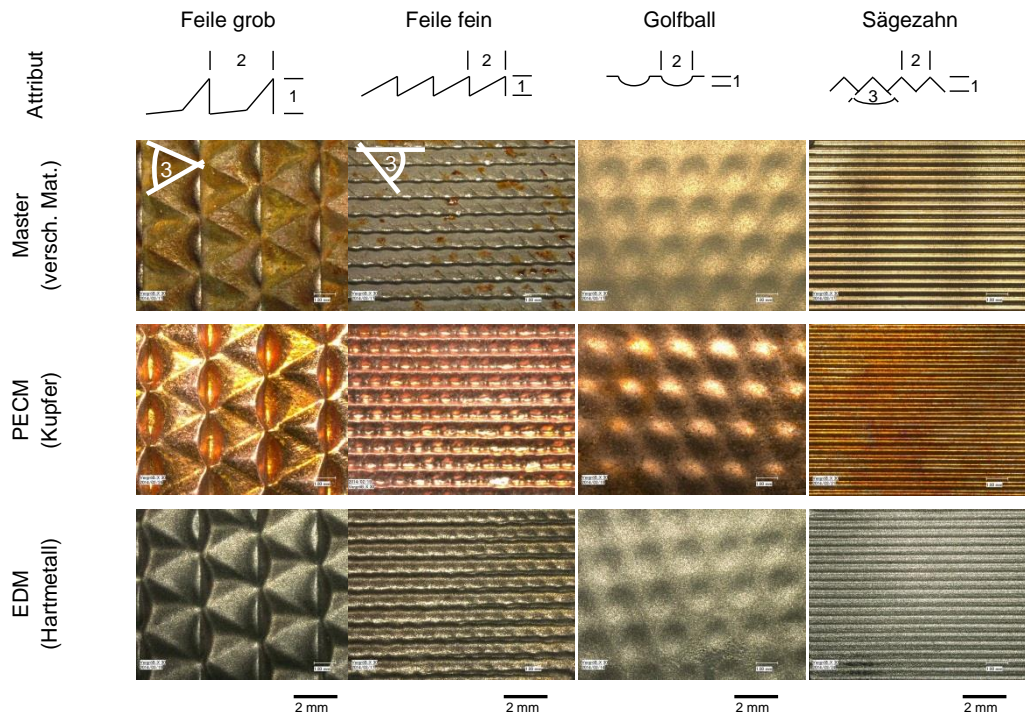


Tabelle 5.7: Übertragungsergebnisse der feinen Strukturen

Struktur	Attribut	Master	Nach PECM	Nach EDM	R [%]	R _a [μm]
Feile grob	1 - Strukturhöhe [μm]	960,00	927,34	815,58	84,96	4,07
	2 - Reihenabstand [μm]	2,80	2,80	2,80	100,00	
	3 - Strukturwinkel [°]	60,00	60,00	60,00	100,00	
Feile fein	1 - Strukturhöhe [μm]	405,00	262,85	186,57	46,07	2,45
	2 - Reihenabstand [μm]	760,00	760,00	760,00	100,00	
	3 - Strukturwinkel [μm]	60,00	60,00	60,00	100,00	
Golfball	1 - Strukturhöhe [μm]	93,33	93,29	90,25	96,70	1,60
	2 - Durchmesser [μm]	1580,75	1364,98	1309,15	82,82	
Sägezahn	1 - Strukturhöhe [μm]	120,22	77,16	46,89	39,00	0,99
	2 - Reihenabstand [μm]	400,00	400,00	400,00	100,00	
	3 - Zahnwinkel [°]	90,00	135,00	150,00	33,33	

5.3 Geometrieübertragung von Pyramidenstrukturen

Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt, kann die Prozesskette genutzt werden, um Strukturen auf Hartmetall aufzubringen, die bisher nicht möglich waren bzw. eine aufwändige Nacharbeit zur finalen Formgebung benötigten. Ein erster Ansatz zur Fertigung von Bearbeitungsleisten, die beispielsweise in ein Honwerkzeug integriert werden können, wurde in [219] vorgestellt. Auf Hartmetalleisten aus VG627 mit einer

Größe von 20 mm x 3 mm x 4,9 mm (L x B x H) wurde mithilfe der Prozesskette eine Pyramidenstruktur bestehend aus sechs Einzelpyramiden mit 60° Spitzenwinkel aufgebracht, vgl. Abbildung 5.3. Es konnten dabei Übertragungsgütern von über 87 % erreicht werden, jeweils über die sechs Pyramiden gemittelt, siehe Tabelle 5.8. Dabei wurde bei PECM mit $v_f = 0,12$ mm/min, $U_{\text{gap}} = 6,5$ V und $t_{\text{on}} = 3$ ms bei einem Anfangsspalt von $s = 40$ μm gearbeitet. Das Hartmetall wurde dreistufig durch EDM mit Einstellungen von $U_D = 250$ V, $I_{\text{max}} = 10$ A und $t_{\text{on}} = 10$ μs bearbeitet. Die real aufgetretenen Spannungen und Ströme sind wie beschrieben unbekannt.

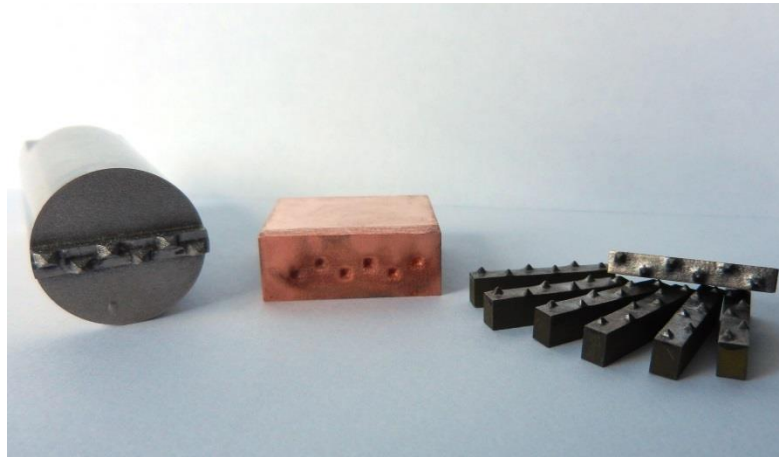


Abbildung 5.3: Mittels Prozesskette übertragene Pyramidenstruktur

Tabelle 5.8: Übertragungsergebnisse der Pyramidenstruktur

Attribut	Master	Nach PECM	Nach EDM	R [%]
1 - Strukturhöhe [μm]	1000,00	946,79	870,50	87,05
2 - Spitzenwinkel [°]	59,31	57,45	54,74	92,29

5.4 Bewertung

Der kritische Prozess in der Kette hinsichtlich der Strukturübertragung ist die PECM-Bearbeitung. Aufgrund des gleichmäßigsten elektrischen Feldes und damit des gleichmäßigsten Abtrags bei PECM und zugleich des gleichmäßigsten Verschleißes bei EDM lassen sich am besten rundliche Formen abbilden, das heißt, dass bei der Auslegung der Kathoden nach Möglichkeit auf die Verwendung von scharfen Kanten verzichtet werden sollte und stattdessen abgerundete Formen zu bevorzugen sind. Zusätzlich spielt die gesamte Größe der Struktur eine Rolle: Werden Abmessungen sehr klein, ist aufgrund der hohen Auflösungsgeschwindigkeit von Kupfer die Abbildung nur mit sehr hohen Vorschüben zu erreichen, was zu einer erhöhten Kurzschlussgefahr führt.

Im EDM-Prozess werden scharfe Kanten aufgrund des dort herrschenden höheren Verschleißes ebenfalls abgerundet, was zu einer schlechteren Reproduktion führt, allerdings kann durch den Einsatz mehrerer Elektroden recht einfach eine Verbesserung erzielt werden.

Die Wirtschaftlichkeit der Prozesskette hängt von der Stückzahl und der abzubildenden Struktur ab. Ist der Einsatz der Funkenerosion erforderlich, kann die Prozesskette bereits bei einer geringen Stückzahl Vorteile bringen, da die Fertigung der Kathode bzw. des Masters nur einmalig durchzuführen ist. Aufgrund der Verschleißfreiheit des PECM kann anschließend eine Vielzahl an Werkstücken mit dieser Kathode strukturiert werden, sodass der Verschleiß und der deshalb notwendige Einsatz mehrerer Elektroden pro Werkstück im EDM mittels einer Serienproduktion kompensiert werden kann. Je komplexer die Struktur ist, desto eher lohnt sich dabei die Anwendung der Verfahrenskombination. Auf diese Weise können auch solche Strukturen produziert werden, deren Herstellung mittels der Verfahren Schleifen oder Drahterosion nicht möglich ist.

In [220] werden PECM und EDM am Beispiel der Bearbeitung von Titanaluminid und Inconel miteinander verglichen; dabei wird herausgestellt, dass aufgrund der Werkzeugkosten EDM nur für kleine Losgrößen interessant erscheint. Mit Blick auf die vorgeschlagene PECM-EDM-Prozesskette kann in Abhängigkeit von der Geometrie durchaus eine Neubewertung sinnvoll sein.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Bearbeitung von fertig gesintertem Hartmetall stellt aus fertigungstechnischer Sicht eine Herausforderung dar und erfolgt hauptsächlich durch funkenerosives Senken und Schneiden sowie Schleifoperationen. Ein potentiell geeignetes Elektrodenmaterial für das in dieser Arbeit betrachtete Senken ist Elektrolytkupfer. Dabei tritt zwangsläufig ein Verschleiß der eingesetzten Elektrode auf, der den regelmäßigen Einsatz neuer Elektroden notwendig macht. Je nach zu übertragender Struktur ist die Herstellung der benötigten Elektroden zeit- und kostenintensiv. Diese Strukturierung kann aber durch PECM erfolgen, sodass die aufwändigen Schritte Kathodentwurf und -fertigung aufgrund der Verschleißfreiheit nur einmalig durchzuführen sind. Die elektrochemische Bearbeitung arbeitet nach dem Prinzip der anodischen Metallauflösung und ist in der Lage auch komplexe Strukturen schnell auf Kupfer zu übertragen. Um die Vorteile beider Verfahren konstruktiv zu nutzen wird eine Prozesskette beschrieben, die elektrochemisch strukturierte Elektroden für die funkenerosive Bearbeitung von Hartmetall einsetzt.

PECM

Aufgrund der fehlenden Kenntnis über passende Bearbeitungsparameter wird zunächst ausführlich das Materialverhalten von Elektrolytkupfer bei der PECM-Bearbeitung untersucht, wobei Vorschub, Spannung, Impulszeit sowie pH-Wert und Druck des Elektrolyten variiert werden. Folgende Schlüsse können im Rahmen der Untersuchung verschiedener Parameterkombinationen gezogen werden:

- Kupfer entwickelt bei Verwendung von Natriumnitrat als Elektrolyt keine stabile passivierende Schicht, sodass bereits sehr kleine Stromdichten für eine Auflösung ausreichen.
- Vorschub und Stromdichte zeigen für jede Kombination aus Spannung und Impulszeit eine lineare Abhängigkeit, sodass von einem konstanten Reaktionsmechanismus ausgegangen werden kann.
- Die Gleichgewichtsspaltweite verhält sich umgekehrt proportional zur Stromdichte. Zudem bilden sich aufgrund der hohen Auflösengeschwindigkeit im Vergleich zu Stahl bei denselben Parameterkombinationen große Spaltweiten bei der Bearbeitung aus. Diese können in der Folge eine präzise Abbildung verhindern.
- Die fehlende Passivität zeigt sich durch einen teils sehr hohen spezifischen Materialabtrag SMR vor allem im aktiven Bereich. Der spezifische Materialabtrag zeigt darüber hinaus eine Spannungsabhängigkeit, die jedoch im transpassiven Bereich nachlässt und sich bei ca. 0,34 mg/C einpendelt.

- Die Oberfläche weist zwei leicht unterscheidbare Ausprägungen auf: Durch Pitting gekennzeichnete Oberflächen für Stromdichten im aktiven Bereich bis $J \approx 0,15 \text{ A/mm}^2$ und glatte Oberflächen im transpassiven Bereich, die mit höherer Stromdichte tendenziell besser werden.
- Der pH-Wert hat einen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis. Der basische Wert pH 10,3 zeigt gegenüber pH 7,2 Vorteile durch eine geringere Spaltweite bei gleicher Stromdichte sowie eine glattere Oberfläche. Auch pH 5,5 führt zu leicht kleineren Spalten als pH 7,2, erzeugt dabei jedoch rauere Oberflächen. Rein auf die Spaltweite bezogen lässt der Unterschied mit steigender Stromdichte nach. Am vorteilhaftesten lässt sich Kupfer daher bei leicht basischem pH-Wert bearbeiten.
- Der Druck bzw. die Durchflussmenge des Elektrolyten hat einen Einfluss auf die sich ausbildende Oberflächenrauheit. Dabei zeigt sich für den niedrigsten Druck die raueste Oberfläche, welche nach Durchlaufen eines Minimums beim mittleren Druck zum höchsten Druck wieder zunimmt.
- Die bei der elektrochemischen Bearbeitung mit NaNO_3 auftretende Polarisationsspannung ist aufgrund der großen Spaltweiten nur schwer präzise zu identifizieren, zumal das Kathodenmaterial die Werte beeinflusst. Im Stromdichtebereich bis ca. $1,1 \text{ A/mm}^2$ lässt sie sich am besten über den Mittelwert charakterisieren: $U_{\text{pol}} = 5,67 \text{ V}$ für die Materialpaarung 1.4571-CW004A.
- Zur Bearbeitung von Kupfer sind kurze Impulszeiten vorteilhaft, die die Spaltaufweitung während eines einzelnen Impulses vermindern. Zudem sollte mit einem hohen Vorschub gearbeitet werden, der den Spalt klein hält. Aufgrund des Einflusses auf die Spaltweite und den spezifischen Materialabtrag bietet die Bearbeitung mit $U_{\text{gap}} = 10 \text{ V}$ die größten Vorteile. Die Anwendung von Polierimpulsen kann als Folgeschritt einer Strukturierung die Oberfläche verbessern, wobei bei der Parameterauslegung die Polarisationsspannung zu berücksichtigen ist.

Insgesamt kann für Kupfer ein Grenzbereich mit einer Stromdichte von $J = 0,2\text{--}0,3 \text{ A/mm}^2$ definiert werden, der dem Wechsel von aktiver zu transpassiver Auflösung zugeordnet werden kann. Für niedrigere Stromdichten sind die Prozessresultate instabil und die Oberflächen zeichnen sich durch teilweise sehr hohe Abtragswerte und starkes Pitting aus. Höhere Stromdichten führen zu einem konstanten Abtrag und glatteren Oberflächen. Das Prozessergebnis ist jedoch hochgradig interaktiv, d. h. die Parameter beeinflussen sich gegenseitig und bereits die Wahl eines anderen Kathodenmaterials kann zu anderen Ergebnissen führen.

Die direkte elektrochemische Bearbeitung von Hartmetall wird in den durchgeführten Untersuchungen durch die Bildung von Wolframtrioxid verhindert. Ebenso ist eine Bearbeitung von Wolfram-Kupfer, welches bei der funkenerosiven Hartmetallbearbeitung aufgrund der höheren Verschleißbeständigkeit zu präferieren wäre, nicht möglich. Nach Auflösen des Kupferanteils verbleibt die Wolframmatrix und verhindert die weitere elektrochemische Bearbeitung.

EDM

Die Untersuchungen zum funkenerosiven Bearbeitungsverhalten von zwei Sorten Hartmetall mit Elektroden aus Kupfer beschränken sich auf die Variation der energiebestimmenden Parameter Strom, Spannung und Impulszeit und werden mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung geplant und entsprechend interpretiert. Dabei ist zu beachten, dass sich aufgrund der gleichzeitigen Änderung verschiedener Parameter Effekte überlagern können. So können mit relativ wenigen Versuchsdurchläufen folgende Schlüsse gezogen werden:

- Es existiert ein entscheidender Einfluss des Werkstoffs auf das Prozessverhalten bzgl. Materialabtragsrate und Verschleißrate. Als Ursache hierfür werden der Gehalt an Wolframcarbid sowie die Korngröße vermutet, da sich die Flächenverhältnisse zwischen der hochschmelzenden Carbidphase und dem bei niedrigeren Temperaturen schmelzenden Kobalt, die sich in der Bearbeitungsfläche befinden bei beiden Hartmetallen unterscheiden.
- Der Elektrodenverschleiß durchläuft für beide Materialien ein deutliches Minimum für mittlere Werte von Strom und Spannung, sodass zu niedrige und zu hohe Werte zu erhöhtem Verschleiß führen. Für VGH2 gilt das auch für die Impulszeit. Abweichend davon ist der Einfluss der Impulszeit für VG627 vernachlässigbar.
- Bezogen auf die Materialabtragsrate verhalten sich die Materialien wieder gleich und erreichen bei mittleren Parameterwerten ein Maximum. Das Verschleißminimum und das Abtragsmaximum decken sich nicht genau, sondern sind für den Abtrag leicht zu höheren Parameterwerten hin verschoben.
- Die entstehende Oberflächenrauheit ergibt sich weitgehend unabhängig vom Material und gemäß den verwendeten Prozessparametern. Allerdings führt ein steigender Strom für VGH2 zu höheren, bei VG627 jedoch zu niedrigeren Rauheiten. Bezogen auf die Spannung werden auch hier nach Durchlaufen eines Maximums wieder leicht sinkende Rauheiten festgestellt.
- Zur Bearbeitung von Hartmetall mit Kupfer existiert somit ein Bereich optimaler Entladeenergie, in dem eine große Materialabtragsrate in Verbindung mit einem minimalen Verschleiß zu beobachten ist. Entsprechend sollte dieser Optimalbereich für Strukturierungsaufgaben genutzt werden. In einem weiteren Schritt kann dann die Oberfläche mit minimaler Entladeenergie geglättet werden, wobei der Verschleiß nur eine untergeordnete Rolle spielt.

PECM-EDM-Prozesskette

Nach Untersuchung der beteiligten Prozesse wird die PECM-EDM-Prozesskette prototypisch aufgebaut und auf verschiedene Strukturen angewendet. Da beide Prozesse im Betrieb einen Arbeitsspalt benötigen, sind die Abbildungen zwangsläufig einer Maßabweichung von der eingesetzten Struktur unterworfen. Zur Bewertung

wird ein Gütefaktor R für die Reproduzierbarkeit eingeführt, der die Abweichung der finalen zu den initialen Maßen in Form einer Prozentzahl ausgibt. Für die Prozesskette können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Beiden Verfahrensprinzipien liegt ein Stromfluss über einen Arbeitsspalt zwischen Werkzeug und Werkstück nach Anlegen einer Prozessspannung zugrunde, was bedeutet, dass beide Verfahren auch den Eigenschaften elektrischer Felder unterliegen. Elektrische Felder verstärken sich an scharfen Kanten, was bei EDM zu erhöhtem Verschleiß an diesen Stellen führt, da dort vermehrt Funken einschlagen. Für PECM bedeutet es eine erhöhte Stromdichte an scharfen Kanten. Diese Eigenschaft kommt der Kupferbearbeitung (im Gegensatz zur Stahlbearbeitung) etwas entgegen, da sich der Abtrag mit zunehmender Stromdichte leicht abschwächt. Allerdings wird dieser Vorteil durch den negativen Effekt der insgesamt hohen Auflösengeschwindigkeit des Kupfers relativiert.
- Bezogen auf die laterale Übertragung einer Struktur ist PECM aufgrund der sich während des Prozesses aufweitenden Spalte im Vergleich zu EDM als kritischer einzustufen. Insgesamt lassen sich abgerundete Formen in beiden Prozessen präziser reproduzieren, was durch die Berechnung des Gütefaktors belegt wird.
- Der im EDM-Prozess auftretende Wärmeeinfluss auf die Kupferelektroden hat keinen Einfluss auf einen nachfolgenden PECM-Prozess, sodass eine Neustrukturierung verschlissener Elektroden mit gleichen Parametern möglich ist.
- Die aufgrund unterschiedlicher Stromdichten im PECM-Prozess potentiell auf einem einzigen Kupfer-Werkstück auftretenden Rauheiten können einen Einfluss auf die im EDM-Prozess entstehende Werkstückrauheit haben. Um eine komplett einheitliche Oberflächenstruktur zu erhalten, sollte demzufolge die zum Glätten eingesetzte Elektrode an wichtigen Funktionsflächen überprüft und gegebenenfalls nachgearbeitet werden.

Es konnte anhand verschiedener Strukturen gezeigt werden, dass die mittels PECM hergestellten Kupferwerkstücke nachfolgend als Werkzeuge im funkenerosiven Prozess verwendet werden können. Somit wird der zwangsläufig auftretende Elektrodenverschleiß im EDM-Prozess durch die Möglichkeit der Serienproduktion in PECM abgemildert und es steht für jede funkenerosive Bearbeitung eine neue, identische Elektrode zur Verfügung.

6.2 Ausblick

Eine Herausforderung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr betrachtet werden konnte, ist die initiale Auslegung der Kathode. Diese kann über eine Rückwärtsabschätzung ausgehend von der gewünschten Struktur erfolgen. Unter Berücksichtigung der Spaltweite muss die Elektrode für EDM und ausgehend von dieser Elektrode unter Beachtung der Spaltweite die Auslegung für die PECM-Kathode stattfinden. Die Planung der EDM-Elektrode kann in geeigneten CAD-Programmen aufgrund der relativ konstanten Spaltweite über eine Offset-Setzung der gewünschten Geometrie erfolgen, wie am Beispiel von SolidWorks in [221] beschrieben. Die Ermittlung der benötigten Kathoden-Struktur für PECM stellt eine große Herausforderung dar, da sich der Spalt in der Nähe nicht-isolierter Teile der Kathode kontinuierlich aufweitet. Hier können Finite-Elemente-Programme helfen, die schrittweise in Abhängigkeit von der Materialauflösung die benötigte Form berechnen. Die Ermittlung und Modellbildung bzgl. der Spaltweiten in dieser Arbeit kann helfen, eine verbesserte softwareunterstützte Kathodenauslegung zu unterstützen.

Der EDM-Prozess wurde lange Zeit intensiv untersucht, was zu ausgereiften Bearbeitungsanlagen geführt hat, bei denen auf Basis der zu bearbeitenden Materialien eine Struktur gezielt und auf eine gewünschte Rauheit hin bearbeitet werden kann. Ziel weiterer Untersuchungen kann der Aufbau einer Parameterdatenbank für den PECM-Prozess sein, sodass beispielsweise nach Eingabe von Werkstoffparametern, Geometrie und gewünschter Oberflächenrauheit bevorzugte Bearbeitungsparameter vorgeschlagen werden. Der Aufbau einer Datenbank mit Werkstoffen und Bearbeitungsparametern kann als ein großer Schritt zur Marktdurchdringung der elektrochemischen Bearbeitung angesehen werden. Trotz der wachsenden Bekanntheit existieren viele noch ungenutzte Potentiale für den industriellen Einsatz.

Die schnelle Kupferauflösung führt zu Präzisionsproblemen bei der PECM-Bearbeitung. In [222] wurde durch Verwendung von ultrakurzen Impulsen im Nano- bis Mikrosekundenbereich gezeigt, dass Kupfer mit Kantenschärfen $< 1 \mu\text{m}$ bearbeitbar ist. Dabei wird die Zeitkonstante bei der Umladung der Doppelschichten ausgenutzt, um die Bearbeitung stark zu lokalisieren. Die Verwendung entsprechender Technologien könnte das Ergebnis der vorgestellten Prozesskette entscheidend verbessern und somit die Herstellung scharfkantiger Werkzeuge erlauben.

Literaturverzeichnis

- [1] K. Rajurkar, M. Sundaram, A. Malshe: Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining. *Procedia CIRP*, 6: 13-26, 2013.
- [2] H. M. Ortner, P. Ettmayer, H. Kolaska: The history of the technological progress of hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 44: 148-159, 2014.
- [3] W.-D. Schubert, E. Lassner, W. Böhlke: Cemented Carbides - A Success Story. *Tungsten - International Tungsten Industry Association (ITIA)*, 2010.
- [4] F. Klocke, A. Zeis, A. Klink, D. Veselovac: Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium- and nickel-based alloys for aero engine components. *Procedia CIRP* 6, 368-372, 2013.
- [5] A. Klink: Funkenerosives und elektrochemisches Abrichten feinkörniger Schleifwerkzeuge, S. 1. Dissertation, WZL RWTH Aachen, 2009.
- [6] U. Maradia, M. Boccadoro, I. Stirnimann, I. Beltrami, F. Kuster, K. Wegener: Die-sink EDM in meso-micro machining. *Procedia CIRP* 1, 166-171, 2012.
- [7] I. Beltrami, C. Joseph, R. Clavel, B. J.-P., Bottinelli: Micro- and nanoelectric-discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 149: 263-265, 2004.
- [8] J. F. Wilson: Practice and Theory of Electrochemical Machining, S. 3. Wiley&Sons Inc., 1971.
- [9] J. McGeough: Principles of Electrochemical Machining, S. 2. Chapman and Hall London, 1974.
- [10] T. Masuzawa: State of the Art Micromachining. *Annals of the CIRP*, 49(2): 473-488, 2000.
- [11] Aurubis AG: Einsatzbereiche für Kupfer. <http://www.aurubis.com/de/geschaeftsfelder/kupfer/die-einsatzgebiete/>, abgerufen: 03.01.2015.
- [12] W. Weißbach: Werkstoffkunde, S. 96|201. Vieweg+Teubner | GMV Fachbuchverlage GmbH, 2010.
- [13] B. Ilchner, R. Singer: Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik, 4.Aufl., S. 277|374|386|405. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [14] G. Blumenthal, D. Linke, S. Vieth: Chemie - Grundwissen für Ingenieure, S. 147|153|347. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- [15] Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V.: Werkstoffdatenblätter Cu-ETP, Cu-OFE, Cu-HCP, Cu-DHP. <https://www.kupferinstitut.de/en/persoeneberberatung/shop-verlag-downloads/downloads/werkstoffe/werkstoff-datenblaetter.html>, abgerufen: 03.01.2015.
- [16] N.N.: Schmelzpunkt des Wolframs. *Naturwissenschaften*, 46: 621, 1915.
- [17] P. Kurzweil, P. Scheipers: Chemie - Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente, 9. Auflage, S. 304. Vieweg+Teubner Verlag, 2012.

- [18] B. Plewinsky, M. Hennecke, W. Oppermann: Das Ingenieurwissen Chemie, S. 79. Springer-Verlag, 2014.
- [19] WHS Sondermetalle: Datenblatt Wolframkupfer (WCu). http://www.whs-sondermetalle.de/pdf/WCu_Wolfram-Kupfer_web.pdf, abgerufen: 03.01.2015.
- [20] Nagler Normalien GmbH: Wolframkupfer (WCu). http://www.normalien.de/pdf/de/Wolframkupfer_D.pdf, abgerufen: 03.01.2015.
- [21] W. Schatt, K.-P. Wieters, B. Kieback: Pulvermetallurgie - Technologie und Werkstoffe, S. 404|505|517. Springer-Verlag, 2007.
- [22] K. Dies: Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik, S.118. Springer-Verlag, 1967.
- [23] H. M. Ortner, P. Etmayer, H. Kolaska, I. Smid: The history of the technological progress of hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 49: 3-8, 2015.
- [24] C. Fernandes, A. Senos: Cemented carbide phase diagrams: A review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29: 405-418, 2011.
- [25] H. Kolaska: Hartmetall - gestern, heute und morgen. *Metall*, 825-832, 2007.
- [26] H. Wang, T. Webb, J. Bitler: Study of Thermal Expansion and Thermal Conductivity of Cemented Tungsten Carbide. *ICSHM 10 Extended Abstracts*, 93-94, 2014.
- [27] C. Luis, I. Puertas: Methodology for developing technological tables used in EDM processes of conductive ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 189: 301-309, 2007.
- [28] Sandvik Hard Materials: Das ist Hartmetall, S. 3. [http://www2.sandvik.com/sandvik/0130/HI/SE03411.nsf/a0de78d35676d88d412567d900294747/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/\\$FILE/ATTGAHWR/9100%20ger.pdf](http://www2.sandvik.com/sandvik/0130/HI/SE03411.nsf/a0de78d35676d88d412567d900294747/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/$FILE/ATTGAHWR/9100%20ger.pdf), abgerufen: 30.12.2014.
- [29] A. Peterson, J. Agren: Sintering shrinkage of WC–Co materials with different compositions. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 23: 258-266, 2005.
- [30] Saar-Hartmetall und Werkzeuge GmbH: Herstellung von Hartmetall. http://www.saar-hartmetall.de/produkte/hm_fertigung.html, abgerufen: 12.12.2014.
- [31] Durit Hartmetall GmbH: Hartmetallsorten - Binder. <http://www.durit.com/de/technologie/hartmetallsorten/binder.html>, abgerufen: 13.12.2014.
- [32] N.N.: Wolframcarbid. <http://www.chemie.de/lexikon/Wolframcarbid.html>, abgerufen: 12.12.2014.
- [33] M. I. Sadik: An Introduction to cutting tools and applications, S. 39|42. Elanders Sweden, 2013.
- [34] Barat Carbide GmbH: Tungsten Carbide Grades - Hartmetallsorten, S. 7. 2006.
- [35] E. Hornbogen, H. Warlimont: Metalle - Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen, S. 244|255. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [36] M. Wacinski: Flexible Herstellung von Wendeschneidplatten-Prototypen. *VDI-Z Special Werkzeug-/Formenbau*, 35-37, 2003.

- [37] J.-Z. Li, T. Wu, Z.-Y. Yu, L. Zhang, G.-Q. Chen, D.-M. Guo: Micro machining of pre-sintered ceramic green body. *Journal of Materials Processing Technology*, 212: 571-579, 2012.
- [38] P. Mehrota: Strategies to reduce environmental impact of hardmetal production. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014.
- [39] W. Weißbach: Werkstofftechnik. In: Vieweg Handbuch Maschinenbau, 18. Auflage, S. E 42. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007.
- [40] A. F. Hollemann, E. Wiberg, N. Wiberg: Lehrbuch der anorganischen Chemie, 101. Aufl., S. 852. De Gruyter, 1995.
- [41] W. König, R. Wertheim, A. Weiß: Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen: Funkenerosive Bearbeitung von Hartmetall, S.10|55|60. Westdeutscher Verlag, 1974.
- [42] U. Fischer: Fachkunde Metall. Verlag Europa-Lehrmittel, 1990.
- [43] E. Pauksch, S. Holsten, M. Linß, F. Tikal: Zerspantechnik - Prozesse, Werkzeuge, Technologien, S. 278. Vieweg+Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [44] V. Schulze: Mikrolaserstrukturierung - Kombination von Laserablation und Funkenerosion zur Herstellung dreidimensionaler mikrostrukturierter Formeinsätze. In: Abschlussbericht SFB 499, S. 127-140. Hrsg: O. Kraft, 2012.
- [45] Otto Maier GmbH: Verarbeitungsrichtlinien Edelstahl - Einsatzbereiche. http://www.weststahl.de/Information_Einsatzbereich.pdf, abgerufen: 06.01.2015.
- [46] Deutsche Edelsathlwerke: Werkstoffdatenblatt 1.4571. http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4571_de.pdf, abgerufen: 06.01.2015.
- [47] Deutsche Edelstahlwerke: Werkstoffdatenblatt 1.4301. http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4301_de.pdf, abgerufen: 06.01.2015.
- [48] Deutsche Edelstahlwerke: Werkstoffdatenblatt 1.7131. http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/Baustahl/1.7131_1.7139_de.pdf, abgerufen: 12.12.2015.
- [49] N.N.: DIN 8590: Fertigungsverfahren Abtragen. Beuth Verlag, 2003.
- [50] N.N.: DIN 8580: Fertigungsverfahren Abtragen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, 2003.
- [51] N.N.: VDI-Richtlinie 3401 - Blatt 1 (Entwurf): Elektrochemisches Abtragen. Beuth-Verlag, 2009.
- [52] M. Datta, D. Landolt: Electrochemical Machining Under Pulsed Current Conditions. *Electrochimica Acta*, 26: 899-907, 1981.
- [53] S. Ebeid, M. Hewidy, T. Taweel, A. Youssef: Towards higher accuracy for ECM hybridized with low-frequency vibrations using the response surface methodology. *Journal of Materials Processing Technology*, 149: 432-438, 2004.

- [54] H. S. Altena: Precision ECM by Process Characteristic Modelling, S.15|20|38-39|52ff. Dissertation, Glasgow Caledonian University, 2000.
- [55] T. Haisch, E. Mittemeijer, J. Schultze: Electrochemical machining of the steel 100Cr6 in aqueous NaCl and NaNO₃ solutions: microstructure of surface films formed by carbides. *Electrochimica Acta*, 47: 235-241, 2001.
- [56] M. Burger, L. Koll, E. Werner, A. Platz: Electrochemical machining characteristics and resulting surface quality of the nickel-base single-crystalline material LEK94. *Journal of Manufacturing Processes*, 14: 62-70, 2012.
- [57] PEMTec SNC: Branchen PECM-Technologie. <http://www.pemtec.de/index.php/branchen>, abgerufen: 14.02.2015.
- [58] D. Bähre, A. Rebschläger, O. Weber, P. Steuer: Reproducible, fast and adjustable surface roughening of stainless steel using pulse electrochemical machining. *Procedia CIRP* 6, 384–389, 2013.
- [59] J. Kozak, K. P. Rajurkar, Y. Makkar: Selected problems of micro-electrochemical machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 149: 426-431, 2004.
- [60] K. Rajurkar, D. Zhu, J. McGeough, J. Kozak, A. De Silva: New Developments in Electro-Chemical Machining. *Annals of the CIRP*, 48/2: 567-579, 1999.
- [61] K. Rajurkar, J. Kozak, B. Wei: Study of Pulse Electrochemical Machining Characteristics. *Annals of the CIRP*, 42/1: 231-234, 1993.
- [62] F. Klocke, W. König: Fertigungsverfahren 3 - Abtragen, Generieren, Lasermaterialbearbeitung, S. 3|5|6|15|16|38|64|77|133|134|136|137. Springer-Verlag, 2007.
- [63] N.N.: maschine + werkzeug, S.72. Henrich Publikationen Gmbh, Gilching, November 2013.
- [64] M. Weck, C. Brecher: Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbereiche, 6. Aufl., S. 265|266|268. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [65] W. Degner, C. Böttger: Handbuch Feinbearbeitung, S. 289|310|343. VEB Verlag Technik, 1979.
- [66] A. E. DeBarr, D. Oliver: Electrochemical Machining, S. 21|110ff. MacDonald & Co. Ltd., 1968.
- [67] W. König: Elektrochemisches Abtragen, S. 266|271. In: G. Spur, T. Stöferle: Handbuch der Fertigungstechnik Band 4/1 Abtragen Beschichten. Carl Hanser Verlag München Wien, 1987.
- [68] H.-P. Lindenlauf: Werkstoff- und elektrolytspezifische Einflüsse auf die Elektrochemische Senkbarkeit ausgewählter Stähle und Nickellegierungen, S.6-8|40-41|104. Dissertation, RWTH Aachen, 1977.
- [69] K. J. Vetter: Elektrochemische Kinetik. Springer Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1961.
- [70] W. Forker, H. Wicht: ECM Elektrochemische Metallbearbeitung. In: ECM - Elektrochemische Metallbearbeitung und EC-Kombinationsverfahren, S.72. GRIN Verlag, 2008.
- [71] R. Förster: Untersuchung des Potentials elektrochemischer Senkbearbeitung mit oszillierender Werkzeugelektrode für Strukturierungsaufgaben der Mikrosystemtechnik, S. 13|14|16. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, 2004.

- [72] J. Bannard: Electrochemical Machining. *Journal of Applied Electrochemistry*, 7: 1-29, 1977.
- [73] L. Pohlmann: Materialien zur Vorlesung PC III: Elektrochemie. Anwendungen: Passivierung, biologische Nervenleitung. Freie Universität Berlin, Sommersemester 2005.
- [74] S. Moser: Mikrostrukturierung von Metallen durch elektrochemischen Abtrag mit gepulstem Strom (PECM), S.7. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2004.
- [75] A. Ernst: Untersuchung und Vergleich der Geometrieentwicklung bei der gepulsten elektrochemischen Bearbeitung von Kupfer und Stahl. Bachelorarbeit, Universität des Saarlandes, 2015.
- [76] D. Pahl: Über die Abbildegengauigkeit beim elektrochemischen Senken, S.27. Dissertation, RWTH Aachen, 1969.
- [77] R. Cole, Y. Hopenfeld: An investigation of electrolytic jet polishing at high current densities. *Journal of Engineering for Industry*, 85: 395-401, 1963.
- [78] D. Landolt, R. H. Muller, C. W. Tobias: High Rate Anodic Dissolution of Copper. *Journal of the Electrochemical Society*, 1384-1390, 1969.
- [79] M. Datta, D. Landolt: Surface Brightening during High Rate Nickel Dissolution in Nitrate Electrolytes. *Journal of the Electrochemical Society*, 122: 1466-1472, 1975.
- [80] M. Datta, D. Landolt: On the role of mass transport in high rate dissolution of iron and nickel in ECM electrolytes - I. Chloride Solutions. *Electrochimica Acta*, 25: 1255-1262, 1979.
- [81] M. Datta, D. Landolt: On the role of mass transport in high rate dissolution of iron and nickel in ECM electrolytes - II. Chlorate and Nitrate Solutions. *Electrochimica Acta*, 25: 1263-1271, 1979.
- [82] R.-D. Grimm, D. Landolt: Salt films formed during mass transport controlled dissolution of iron-chromium alloys in concentrated chloride media. *Corrosion Science*, 36: 1847-1868, 1994.
- [83] T. R. Munninghoff: Mechanismen der anodischen Auflösung von Metallen und Legierungen bei extrem hohen Stromdichten, S. 28. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2012.
- [84] M. Matlosz, S. Magaino, D. Landolt: Impedance Analysis of a Model Mechanism for Acceptor-Limited Electropolishing. *Journal of the Electrochemical Society*, 141: 410-418, 1994.
- [85] S. Glarum, J. Marshall: The Anodic Dissolution of Copper into Phosphoric Acid. *Journal of the Electrochemical Society*, 132: 2872-2878, 1985.
- [86] M. Lohrengel, I. Klüppel, C. Rosenkranz, H. Bettermann, J. Schultze: Microscopic investigations of electrochemical machining of Fe in NaNO₃. *Electrochimica Acta*, 48: 3203-3211, 2003.
- [87] C. Rosenkranz: Elektrochemische Prozesse an Eisenoberflächen bei extremen anodischen Stromdichten, S. 117. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2005.
- [88] C. Rosenkranz, M. Lohrengel, J. Schultze: The surface structure during pulsed ECM of iron in NaNO₃. *Electrochimica Acta*, 50: 2009-2016, 2005.
- [89] M. Datta, L. Romankiw, D. Vigliotti, R. von Gutfeld: Jet and Laser-Jet Electrochemical Micromachining of Nickel and Steel. *Journal of the Electrochemical Society*, 136: 2251-2256, 1989.

- [90] W. Natsu, T. Ikeda, M. Kunieda: Generating complicated surface with electrolyte jet machining. *Precision Engineering*, 31: 33-39, 2007.
- [91] S. Kai, H. Sai, M. Kunieda, H. Izumi: Study on Electrolyte Jet Cutting. *Procedia CIRP* 1, 627-632, 2012.
- [92] T. Kawanaka, S. Kato, M. Kunieda: Selective surface texturing using electrolyte jet machining. *Procedia CIRP* 13, 345-349, 2014.
- [93] M. Hackert-Oschätzchen, A. Martin, G. Meichsner, A. Schubert: Evaluation of Gap Control Strategies in Jet Electrochemical Machining on Defined Shape Deviations. *Proceedings of the International Symposium on Electrochemical Machining Technology INSECT 2014*, 23-35, 2014.
- [94] J. Mitchell-Smith, J. Murray, M. Kunieda, A. Clare: Electrolyte Jet Machining for Surface Texturing of Inconel 718. *Proceedings of the International Symposium on Electrochemical Machining Technology INSECT 2014*, 111-118, 2014.
- [95] A. Bäumel: Beanspruchung durch chemische Einwirkung - Theoretische Studien. *Beitrag auf dem IV. Kongress der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl*, S. 4, 1968.
- [96] G. Pahlitzsch, E. Dreesmann: Einfluss des Werkstoffgefüges beim elektrochemischen Abtragen. *Annals of the CIRP*, 22/1: 65-66, 1973.
- [97] T. Haisch, E. J. Mittemeijer: Electrochemical Machining: The Role of Steel Microstructure in High-Rate Anodic Dissolution. *JOM The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 54: 38-41, 2002.
- [98] O. Weber, H. Natter, A. Rebschläger, D. Bähre: Surface quality and process behavior during Precise Electrochemical Machining of cast iron. *Proceedings of the International Symposium on ElectroChemical Machining Technology INSECT 2011*, 41-46, 2011.
- [99] O. Weber, H. Natter, A. Rebschläger, D. Bähre: Analytical characterization of the dissolution behavior of cast iron by electrochemical methods. *Proceedings of the International Symposium on Electrochemical Machining Technology INSECT 2012*, 41-55, 2012.
- [100] O. Weber, R. Kollmannsperger, D. Bähre: Simulation of the Current Density Distribution and the Material Removal Behavior on the Graphite/Iron-Matrix Interface in Cast Iron under Pulse Electrochemical Machining Conditions. *Proceedings of the COMSOL Conference*, 2012.
- [101] C. Zhou, E. Taylor, J. Sun, L. Gebhart, E. Stortz, R. Renz: Electrochemical Machining of Hard Passive Alloys with Pulse Reverse Current. *Transactions of NAMRI/SME*, XXV: 147-159, 1997.
- [102] A. Zaytsev, I. Agafonov, N. Gimaev, A. Moukhoutdinov, A. Belogorsky: Precise pulse electrochemical machining by bipolar current Aspects of effective technological application. *Journal of Materials Processing Technology*, 149: 419-425, 2004.
- [103] W. König: Abtragen mit Funken, S. 61-63|69-73|90. In: G. Spur, T. Stöferle: Handbuch der Fertigungstechnik Band 4/1 Abtragen Beschichten. Carl Hanser Verlag, 1987.
- [104] N.N.: VDI-Richtlinie 3400: Elektroerosive Bearbeitung - Begriffe, Verfahren, Anwendung. VDI-Verlag / Beuth-Verlag, 1975.
- [105] B. M. Schumacher: After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed. *Journal of Materials Processing Technology*, 149: 376-381, 2004.

- [106] S. Hinduja, M. Kunieda: Modelling of ECM and EDM processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62: 775-797, 2013.
- [107] AgieCharmilles SA: Handbuch FORM20/FORM30, S. C0-3|C7-28,31,34,36,38. 2010.
- [108] E. Uhlmann, S. Piltz, U. Doll: Machining of micro/miniature dies and moulds by electrical discharge machining - Recent development. *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 488-493, 2005.
- [109] K. Ho, S. Newman: State of the art electrical discharge machining (EDM). *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43: 1287-1300, 2003.
- [110] H. Juhr, R. Haas, K. Künanz: Methods to rationalize the generation of parameter technologies in sinking EDM. *Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC*, 407-415, 2011.
- [111] K. Liu, B. Lauwers, D. Reynaerts: Process capabilities of Micro-EDM and its applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47: 11-19, 2010.
- [112] H.-P. Schulze: Energetic Consideration of the Spark Erosion Using Different Process Energy Sources and Pulse-Unit - Gap Conditions. *Key Engineering Materials*, 651-653: 701-706, 2015.
- [113] Y. P. Raizer: Gas Discharge Physics, S.334ff. Springer-Verlag, 1991.
- [114] J. M. Meek, J. D. Craggs: Electrical Breakdown of Gases, S. 252ff. Clarendon Press Oxford, 1953.
- [115] H.-P. Schulze, L. Slatineanu, M. Coteata: Factors Acting on the Tool Wear at Various Dimensional Structures during the Electro-Discharge Machining. *Proceedings of the 14th Intern. Conference on Material Forming - ESAFORM 14*, 1344-1349, 2011.
- [116] G. Wollenberg, H.-P. Schulze, T. Pape, M. Läuter: Moderne Generatortechnik für die funkenerosive Bearbeitung. Vortrag auf der 4. Aachener Fachtagung Funkenerosive Bearbeitung, 1999.
- [117] M. Kunieda, B. Lauwers, K. Rajurkar, B. Schumacher: Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54/2: 64-87, 2005.
- [118] T. Kitamura, M. Kunieda, K. Abe: High-speed imaging of EDM gap phenomena using transparent electrodes. *Procedia CIRP* 6, 314-319, 2013.
- [119] A. Karden: Funkenerosive Senkbearbeitung mit leistungssteigernden Elektrodenwerkstoffen und Arbeitsmedien, S.5|147. Dissertation, WZL RWTH Aachen, 2000.
- [120] A. K. Khanra, L. Pathak, M. Godkhindi: Microanalysis of debris formed during electrical discharge machining (EDM). *Journal of Materials Science*, 42: 872-877, 2007.
- [121] D. DiBitonto, P. Eubank, M. Patel, M. Barrufet: Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model. *Journal of Applied Physics*, 66: 4095-4103, 1989.
- [122] M. Patel, M. Barrufet, P. Eubank, D. DiBitonto: Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model. *Journal of Applied Physics*, 66: 4104-4111, 1989.

- [123] S. Das, M. Klotz, F. Klocke: EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses. *Journal of Materials Processing Technology*, 142: 434-451, 2003.
- [124] S. Yeo, W. Kurnia, P. Tan: Critical assessment and numerical comparison of electro-thermal models in EDM. *Journal of materials processing technology*, 203: 241-251, 2008.
- [125] oelheld GmbH: Wissenswertes zur Senkerosion, S. 10|12|17. 2011.
- [126] W. Natsu, S. Ojima, T. Kobayashi, M. Kunieda: Temperature Distribution Measurement in EDM ARC Plasma Using Spectroscopy. *JSME International Journal Series C*, 47: 384-390, 2004.
- [127] N. Mohri, M. Suzuki, M. Furuya, N. Saito, A. Kobayashi: Electrode Wear Process in Electrical Discharge Machining. *Annals of the CIRP*, 44/1: 165-168, 1995.
- [128] Machinability Data Center: Machining Data Handbook, 3rd Edition, Volume 2, S. 12-38. 1980.
- [129] A. Ozgedik, C. Cogun: An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27: 488-500, 2006.
- [130] L. Lim, L. Lee, Y. Wong, H. Lu: Solidification microstructure of electrodischarge machined surfaces of tool steel. *Material Science and Technology*, 7: 239-248, 1991.
- [131] J. D. Marafona, A. Araújo: Influence of workpiece hardness on EDM performance. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49: 744-748, 2009.
- [132] H. Singh, D. Shukla: Optimizing electric discharge machining parameters for tungsten-carbide utilizing thermo-mathematical modelling. *International Journal of Thermal Sciences*, 59: 161-175, 2012.
- [133] M. Zahiruddin, M. Kunieda: Energy Distribution Ration into Micro EDM Electrodes. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 4: 1095-1106, 2010.
- [134] H. Singh: Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55: 5053-5064, 2012.
- [135] B. Bhattacharyya, S. Gangopadhyay, B. Sarkar: Modelling and analysis of EDM job surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 189: 169-177, 2007.
- [136] I. Puertas, C. Luis, Á. L.: Analysis of the influence of EDM parameters on surface quality, MRR and EW of WC-Co. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154: 1026-1032, 2004.
- [137] S. Lee, X. Li: Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide. *Journal of Materials Processing Technology*, 115: 344-358, 2001.
- [138] M. Kiyak, O. Cakır: Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 191: 141-144, 2007.
- [139] K. M. Shu, H. R. Shih, G. Tu: Electrical discharge abrasive drilling of hard materials using a metal matrix composite electrode. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29: 678-687, 2006.
- [140] P. Steuer, A. Rebschläger, O. Weber, D. Bähre: The heat-affected zone in EDM and its influence on a following PECM process. *Procedia CIRP* 13, 276-281, 2014.

- [141] J. Kruth, L. Stevens, L. Foyen, B. Lauwers: Study of the White Layer of a Surface Machined by Die-Sinking Electro-Discharge Machining. *Annals of the CIRP*, 44: 169-172, 1995.
- [142] A. Zryd: Die Oberfläche: Schlüsselement bei der funkenerosiven Formbearbeitung. *Verband Deutscher Werkzeug- und Formenbauer - VDWF aktuell 02-02*, 2002.
- [143] B. Ekmekci: Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM). *Applied Surface Science*, 253: 9234-9240, 2007.
- [144] U. Busak, J. Krüger: Verschleiß beim funkenerosiven Senken. In: *Fertigungstechnik und Betrieb*, S. 229ff. 1989.
- [145] H. Müller: Untersuchung zur Herstellung und zum Einsatz galvanogeformter Erodier Elektroden. Dissertation, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Springer-Verlag, 1983.
- [146] J. McGeough, M. Leu, K. Rajurkar, A. De Silva, Q. Liu: Electroforming Process and Application to Micro/Macro Manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50/2: 499-514, 2001.
- [147] M. Weinmann, O. Weber, D. Bähre, W. Munief, M. Saumer, H. Natter: Photolithography – Electroforming - Pulse Electrochemical Machining: An Innovative Process Chain for the high Precision and Reproducible Manufacturing of Complex Microstructures. *International Journal of Electrochemical Science*, 9: 3917-3927, 2014.
- [148] H. Natter, M. Weinmann, W. Munief, O. Weber, D. Bähre, M. Saumer: PhoGaTool: A new Process Chain for Manufacturing of ECM Tools. *Proceedings of the International Symposium on Electrochemical Machining Technology INSECT 2014*, 147-154, 2014.
- [149] K. Takahata, N. Shibaiki, H. Guckel: High-aspect-ratio WC-Co microstructure produced by the combination of LIGA and micro-EDM. *Microsystem Technologies*, 6: 175-178, 2000.
- [150] J. Davis (Editor): *ASM Speciality Handbook Copper and Copper Alloys*, S. 274. ASM International, 2001.
- [151] D. R. Lide (Editor): *Electrochemical Series*, In: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, S. 8-24. 2005.
- [152] K. P. Rataj: Elektrochemische Charakterisierung technisch relevanter anodischer Oxidschichten bei niedrigen und höchsten Stromdichten. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2013.
- [153] D. Landolt, R. Muller, C. Tobias: Anode Potentials in High-Rate Dissolution of Copper. *Journal of the Electrochemical Society*, 118: 40-46, 1971.
- [154] M. Schneider, S. Schroth, N. Schubert, A. Michaelis: In-situ investigation of the surface-topography during anodic dissolution of copper under near-ECM conditions. *Materials and Corrosion*, 63: 96-104, 2012.
- [155] D. Landolt, R. Muller, C. Tobias: Crystallographic Factors in High-Rate Anodic Dissolution of Copper. *Journal of the Electrochemical Society*, 118: 39-40, 1971.
- [156] D. Tromans, R.-H. Sun: Anodic Polarization Behavior of Copper in Aqueous Chloride/Benzotriazole Solutions. *Journal of the Electrochemical Society*, 138: 3235-3244, 1991.

- [157] M. Antonijevic, S. Alagic, M. Petrovic, M. Radovanovic, A. Stamenkovic: The Influence of pH on Electrochemical Behavior of Copper in Presence of Chloride Ions. *International Journal of Electrochemical Science*, 4: 516-524, 2009.
- [158] K. Kinoshita, D. Landolt, R. Muller, C. Tobias: Stoichiometry of Anodic Copper Dissolution at High Current Densities. *Journal of the Electrochemical Society*, 117: 1246-1251, 1970.
- [159] M. Schneider, S. Schroth, S. Richter, S. Höhn, A. Michaelis: In-situ investigation of the interplay between microstructure and anodic copper dissolution under near-ECM conditions – Part 1: The active state. *Electrochimica Acta*, 56: 7628-7636, 2011.
- [160] M. Schneider, S. Schroth, S. Richter, S. Höhn, A. Michaelis: In-situ investigation of the interplay between microstructure and anodic copper dissolution under near-ECM conditions – Part 2: The transpassive state. *Electrochimica Acta*, 70: 76-83, 2012.
- [161] N. Takeno: Atlas of Eh-pH diagrams - Intercomparison of thermodynamic databases, S.86. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005.
- [162] H. P. Leckie: The Anodic Polarization Behavior of Copper. *Journal of the Electrochemical Society*, 117: 1478-1483, 1971.
- [163] H.-H. Strehblow, B. Titze: The investigation of the passive behaviour of copper in weakly acid and alkaline solutions and the examination of the passive film by ESCA and ISS. *Electrochimica Acta*, 25: 839-850, 1980.
- [164] P. Keller: Elektrochemische und oberflächenanalytische Untersuchungen zur anodischen Deckschichtbildung auf Zinn und Kupfer/Zinn-Legierungen, S.29. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2006.
- [165] P. Miranda, J. Imonigie, A. Moll: Chemical Mechanical Planarization for Cu Through-Wafer Interconnects. *Journal of The Electrochemical Society*, 153: G211-G217, 2006.
- [166] M. J. Setzer: Werkstoffe des Bauwesens. https://www.uni-due.de/ibpm/Scripte/Studenten_Elektrochemie.pdf, abgerufen: 03.01.2015.
- [167] A. Davydov, V. Shaldaev, A. Malofeeva, I. Savotin: Electrochemical dissolution of tungsten under pulsed conditions. *Journal of Applied Electrochemistry*, 27: 351-354, 1997.
- [168] N. Schubert, M. Schneider, A. Michaelis: ECM of tungsten carbide in ammoniacal solution - investigation of anodic dissolution. *Proceedings of the International Symposium on Electrochemical Machining Technology INSECT 2012*, 57-65, 2012.
- [169] DFG Gepris Datenbank: Projektbeschreibung "Wechselwirkung zwischen Gefüge und elektrochemischem Verhalten von carbidkeramischen". <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/188726952>, abgerufen: 24.11.2015.
- [170] DFG Gepris Datenbank: Projektbeschreibung "Gestaltung von Prozessen und Werkzeugen zur EC-Herstellung von 3D-Geometrien in carbidbasierten Werkstoffen". <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/188727387>, abgerufen: 24.11.2015.
- [171] B. Walther: Produktanalyse beim Electrochemical Machining (ECM) von Ti-basierten Hartmetallen. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2008.
- [172] F. Kellner, H. Hildebrand, S. Virtanen: Effect of WC grain size on the corrosion behavior of WC-Co based hardmetals in alkaline solutions. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 27: 806-812, 2009.

- [173] S. Hochstrasser-Kurz: Mechanistic Study of the Corrosion Reactions on WC-Co Hardmetal in Aqueous Solution - An Investigation by Electrochemical Methods and Elemental Solution Analysis, S. 154. Dissertation, ETH Zürich, 2006.
- [174] M. Lohrengel, K. Rataj, N. Schubert, M. Schneider, S. Höhn, A. Michaelis, M. Hackert-Oschätzchen, A. Martin, A. Schubert: Electrochemical machining of hard metals – WC/Co as example. *Powder Metallurgy*, 57: 21-30, 2014.
- [175] N. Schubert, M. Schneider, A. Michaelis: Electrochemical Machining of cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 47: 54-60, 2014.
- [176] Forschungszentrum Karlsruhe GmbH: Verfahren zur elektrochemischen Abtragung von Refraktärmetallen oder -legierungen und Lösung zur Durchführung dieses Verfahrens. Offenlegungsschrift, Deutsches Patent- und Markenamt, 2006.
- [177] A. Abdullah, M. R. Shabgard, A. Ivanov: Effect of ultrasonic-assisted EDM on the surface integrity of cemented tungsten carbide (WC-Co). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41: 268-280, 2009.
- [178] A. Gadalla, W. Tsai: Machining of WC-Co Composites. *Materials & Manufacturing Processes*, 4: 411-423, 1989.
- [179] M. Jahan, Y. Wong, M. Rahman: A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor an RC-type pulse generator. *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 1706-1716, 2009.
- [180] A. Gadalla, W. Tsai: Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide-Cobalt Composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 72: 1396-1401, 1989.
- [181] S. Tomadi, M. Hassan, Z. Hamedon, R. Daud, A. Khalid: Analysis of the Influence of EDM Parameters on Surface Quality, Material Removal Rate and Electrode Wear of Tungsten Carbide. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 1803-1808, 2009.
- [182] Y.-C. Lin, L.-R. Hwang, C.-H. Cheng, P.-L. Su: Effects of electrical discharge energy on machining performance and bending strength of cemented tungsten carbides. *Journal of Materials Processing Technology*, 206: 491-499, 2008.
- [183] H.-T. Lee, F.-C. Hsu, T.-Y. Tai: Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode. *Materials Science and Engineering*, 364: 346-356, 2004.
- [184] M. A. Lajis, H. Radzi, A. Amin: The Implementation of Taguchi Method on EDM Process of Tungsten Carbide. *European Journal of Scientific Research*, 26: 609-617, 2009.
- [185] R. Mahdavinejad, A. Mahdavinejad: ED machining of WC-Co. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163: 637-643, 2005.
- [186] S. H. Lee, X. Li: Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide. *Journal of Materials Processing Technology*, 139: 315-321, 2003.
- [187] S. Chen, Q. Hsu: Studies on electric-discharge machining of non-contact seal face grooves. *Journal of Materials Processing Technology*, 140: 363-367, 2003.
- [188] H. Lee, T. Tai: Relationship between EDM parameters and surface crack formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 142: 676-683, 2003.

- [189] I. Puertas, C. Luis: A study on the machining parameters optimisation of electrical discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144: 521-526, 2003.
- [190] A. Mahamat, A. Rani, P. Husain: Machining of Cemented Tungsten Carbide using EDM. *Journal of Applied Sciences*, 10: 1784-1790, 2011.
- [191] N.N.: EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. In: *MarSurf. Oberflächen-Kenngrößen*. Mahr GmbH, 2008.
- [192] A. Rebschläger, O. Weber, B. Heitkamp: Benefits and Drawbacks Using Plastic Materials Produced by Additive Manufacturing Technologies in the Electrochemical Environment. *Proceedings of the 9th International Symposium on Electrochemical Machining Technology INSECT 2013*, 45-51, 2013.
- [193] M. F. Zäh: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien*, S.13. Carl Hanser Verlag, 2006.
- [194] N.N.: EN ISO 4288: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit. In: *Marsurf. Oberflächen-Kenngrößen*. Mahr GmbH, 2008.
- [195] Mintab Inc.: *Hilfe-Dateien Minitab 17, Abschnitte: Statistik - Standardverfahren, Statistik - Nichtparametrische Tests, Statistik - Versuchsplanung*. 2014.
- [196] K. Siebertz, D. van Bebber, T. Hochkirchen: *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*, S.38|71. Springer-Verlag, 2010.
- [197] BioLogic: *Electrochemistry instruments*, S.8. <http://www.biologic.info/assets/brochures/20140328%20-%20EC-Lab%20products.pdf>, abgerufen: 22.07.2015.
- [198] P. Steuer, A. Rebschläger, A. Ernst, D. Bähre: Process design in Pulse Electrochemical Machining based on material specific data - 1.4301 and electrolytic copper as an example. *Key Engineering Materials*, 651-653: 732-737, 2015.
- [199] P. Steuer, A. Ernst, D. Bähre: Removal efficiency and gap evolution of electrolytic copper in Pulse Electrochemical Machining. *Proceedings of the 10th International Symposium on Electrochemical Machining Technology INSECT 2014*, 157-165, 2014.
- [200] S. Schroth: *Optische In-situ-Beobachtung des anodischen Auflösungsverhaltens von Kupfer unter ECM-nahen Bedingungen*, S. 92|108. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2013.
- [201] T. Frey, M. Bossert: *Signal- und Systemtheorie*, S. 237. Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [202] K. Janschek: *Systementwurf mechatronischer Systeme*, S. 610. Springer-Verlag, 2010.
- [203] J.-R. Ohm, H. D. Lüke: *Signalübertragung - Grundlagen der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme*, S. 78. Springer-Verlag, 2007.
- [204] N.N.: *Datenblatt Current Transducer HTA 100..1000-s*. <http://www.lem.com/docs/products/hta%20100%201000-s%20e.pdf>, abgerufen: 10.07.2015.

- [205] E. Weller (Editor): *Nontraditional Machining Processes*, S. 169. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1984.
- [206] A. Torres, I. Puertas, C. Luis: Modelling of surface finish, electrode wear and material removal rate in electrical discharge machining of hard-to-machine alloys. *Precision Engineering*, 40: 33-45, 2015.
- [207] S. Sano, K. Suzuki, W. Pan, M. Iwai: Forming fine V-Grooves on a Tungsten Carbide Workpiece with a PCD Electrode by EDM. *Key Engineering Materials*, 329: 631-636, 2007.
- [208] R. L. Mason, R. F. Gunst, J. L. Hess: *Statistical Design and Analysis of Experiments*, Second Edition, S. 583. Wiley-Interscience, 2003.
- [209] E. Barz: *Strategien für die selbsttätige Optimierung des funkenerosiven*. Dissertation, RWTH Aachen, 1976.
- [210] S. Chetverikov, N. Foteev: Electrospark machining of the cutting elements of sintered carbide blankung and piercing dies. In: *Electro spark machining of metals*, Vol. 2, S. 85ff. 1964.
- [211] Y. Chen, S. Mahdivian: Analysis of electro-discharge machining process and its comparison with experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 104: 150-157, 2000.
- [212] S. Joshi, S. Pande: Development of an intelligent process model for EDM. *International Journal of Manufacturing Technology*, 45: 300-317, 2009.
- [213] A. Abdullah, M. R. Shabgard: Effect of ultrasonic vibration of tool on electrical discharge machining of cemented tungsten carbide (WC-Co). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38: 1137-1147, 2008.
- [214] G. S. Upadhyaya: *Cemented Tungsten Carbides - Production, Properties, and Testing*, S. 8. Noyes Publications, 1998.
- [215] J. Marafona: Black layer characterisation and electrode wear ratio on electrical discharge machining (EDM). *Journal of Materials Processing Technology*, 184: 27-31, 2007.
- [216] D. Deconinck, J. Deconinck: A temperature dependent multi-ion transport and reaction model for numerical simulation of the EDM process. *Proceedings of the International Symposium on Electrochemical Machining Technology INSECT 2012*, 79-89, 2012.
- [217] K.-U. Fink: *Analyse der geometrischen Formgebung des gepulsten elektrochemischen Abtragens auf Basis experimentell erfasster Video- und Bilddaten*, S. 59ff. Masterarbeit, Universität des Saarlandes, 2014.
- [218] P. Steuer, O. Weber, D. Bähre: Structuring of wear-affected copper electrodes for Electrical Discharge Machining using Pulse Electrochemical Machining. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 52: 85-89, 2015.
- [219] A. Müller: *Anwendung einer Kombination elektrochemischer und funkenerosiver Prozesse zur Herstellung von Hartmetallstrukturen*. Diplomarbeit, Universität des Saarlandes, 2015.
- [220] F. Klocke, M. Zeis, A. Klink, D. Veselovac: Technological and Economical Comparison of Roughing Strategies via Milling, EDM and ECM for Titanium- and Nickel-based Blisks. *Procedia CIRP* 2, 98-101, 2012.

-
- [221] U. Emmerich: SolidWorks - Spritzgießwerkzeuge effektiv konstruieren, S. 151ff.. Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [222] V. Kirchner: Elektrochemische Mikrostrukturierung mit ultrakurzen Spannungspulsen, S.37 ff.. Dissertation, Freie Universität Berlin, 2001.
- [223] H. Bruus: Theoretical microfluidics - Lecture notes, S. 31. MIC - Department of Micro and Nanotechnology, Technical University of Denmark, 2006.
- [224] H. Pruscha: Statistisches Methodenbuch, S. 7. Springer-Verlag, 2006.

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Δh	Aufmaß	[mm]
Δm	Massenabtrag	[g]
A	Elektrodenfläche	[mm ²]
A	Ampere	
Amp	Amplitude des Vibrators	
An	Anode, positiv gepolte Elektrode	
ANOVA	Analysis of variance (dt. Varianzanalyse)	
B_{ist}	erreichte Spaltbreite	[mm]
BLT	Black layer thickness (dt. Dicke der schwarzen Schicht)	[μ m]
C	Coulomb	
C	Kohlenstoff	
CCD	Central-Composite-Design	
Co	Kobalt	
Cu	Kupfer	
Cu-ETP	Electrolytic tough-pitch copper	
DoE	Design of Experiments	
ds	Spaltweitenelement	[mm]
dt.	deutsch	
dt	Zeitelement	[μ s] (EDM) [s] (PECM)
dV	Volumenelement	[mm ³]
E	Elektrische Feldstärke	[V/mm]
ECM	Electrochemical machining (dt. elektrochemisches Abtragen)	
EDM	Electrical discharge machining (dt. Funkenerosion)	
$E_{Durchschlag}$	Durchschlagsfeldstärke	[kV/mm]
Elysieren	Verfahren des elektrochemischen Abtragens ECM	
engl.	englisch	
EW	Electrode wear (dt. Elektrodenverschleiß)	
f	Frequenz	[Hz]
F	Faraday'sche Konstante (= 96485,3365)	[As/mol]
h	Höhe des abgetragenen Volumens	[mm]
HV	Vickershärte	
Hz	Hertz	[1/s]
i	Laufindex der Elemente	
I	Prozessstrom	[A]
I_e	Entladestrom	[A]
\bar{I}_e	Mittlerer Entladestrom	[A]
I_{max}	maximaler Entladestrom	[A]
I_{PEM}	von der Maschine ausgegebener Stromwert	[A]
I_{real}	realer Stromwert	[A]
ISO	International Organization for Standardization	
J	Stromdichte	[A/mm ²]
J_K	Korrosionsstromdichte	[A/mm ²]
J_{polier}	Polierstromdichte	[A/mm ²]
K	Kelvin	

Ka	Kathode, negativ gepolte Elektrode	
M	Molare Masse	[g/mol]
Me	Metall	
m _{prak}	Praktischer Massenabtrag	[g]
MRR	Material Removal Rate (dt. Materialabtragsrate)	[mg/min]
m _{theo}	Theoretischer Massenabtrag	[g]
OT	oberer Totpunkt der Vibratorbewegung	
p	p-Wert (Statistik)	
P	Phase	[%]
PECM	Pulse electrochemical machining (dt. gepulstes elektrochemisches Abtragen)	
p _{El}	Elektrolytdruck	[kPa]
pH	pH-Wert	[-]
p _i	Massenprozentanteil	[%]
R	Reproduzierbarkeit	[%]
R ²	Bestimmtheitsmaß	
R _a	Mittenrauwert	[μm]
REM	Rasterelektronenmikroskop	
R _{max}	Maximale Rautiefe	[μm]
RSM	Response Surface Methodology	
R _z	Rautiefe	[μm]
s	Spaltweite	[mm]
s	Sekunde	
S	Siemens	
s ₀	Anfangsspaltweite	[mm]
S _{El}	Seitenlänge der Elektrode	[mm]
S _F	Frontalspalt	[mm]
s _{mech}	mechanische Spaltweite aufgrund der Vibratorbewegung	[mm]
SMR	Specific material removal (dt. spezifischer Materialabtrag)	[mg/C]
spez.	spezifisch	
S _s	Seitenspalt	[mm]
T	Temperatur	[°C], [K]
t _B	Bearbeitungszeit des Prozesses	[s]
t _{BD}	Breakdownzeit	[μs]
t _d	Zündverzögerungszeit	[μs]
t _e	Entladedauer	[μs]
t _{fU}	Abfallzeit der Spannung (engl. fall)	[μs]
T _{ist}	erreichte Tiefe	[mm]
t _{off}	Pausenzeit – Zeit der Periode ohne Bearbeitung	[μs] (EDM) [ms] (PECM)
t _{on}	Impulszeit – Zeit der Periode mit Bearbeitung	[μs] (EDM) [ms] (PECM)
t _p	Prozesszeit – Bearbeitungszeit des Prozesses	[min] (EDM) [s] (PECM)
t _{Per}	Periodendauer	[μs]
t _{rU}	Anstiegszeit der Spannung (engl. rise)	[μs]
T _{soll}	eingestellte Tiefe	[mm]
u	Atommasse (1 u = 1,660538921·10 ⁻²⁷)	[kg]
U _D	Zündspannung	[V]

U_e	Entladespannung	[V]
$\overline{U_e}$	Mittlere Entladespannung	[V]
U_{el}	Spannungsabfall über den Elektrolyten	[V]
U_{gap}	Prozessspannung	[V]
U_{pol}	Polarisationsspannung	[V]
UT	unterer Totpunkt der Vibratorbewegung	
V	Volumen	[mm ³]
v_a	Materialauflösegeschwindigkeit	[mm/min]
V_{EI}	Elektrodenverschleiß	
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]
V_{prak}	praktischer Volumenabtrag	[mm ³]
V_{sp}	Spezifisches Abtragsvolumen	[mm ³ /C]
V_{theo}	theoretischer Volumenabtrag	[mm ³]
W	Watt	
W	Wolfram	
WC	Wolframcarbid	
WCu	Wolframkupfer	
W_e	Entladeenergie	[J]
WEZ	Wärmeeinflusszone	
WS	Werkstück	
WZ	Werkzeug	
z	Valenzzahl/Elektrochemische Wertigkeitsänderung	
α	Irrtumswahrscheinlichkeit	[%]
β	während t_{on} vom Vibrator überstrichener Winkel	[°]
γ	Winkelverschiebung aufgrund der Phasenverschiebung	[°]
η	Wirkungsgrad	[%]
ρ	Werkstoffdichte	[g/mm ³]
ρ_{leg}	Dichte der Legierung	[g/mm ³]
σ	Spezifische Leitfähigkeit	[S/mm]
τ	Zeitlicher Nutzungsgrad/Tastverhältnis	
φ	Anodenpotential	[V]

Anhang A: Durchflussbetrachtungen des PECM-Versuchsaufbaus

Je nach Parametereinstellung werden auf den Werkstücken halbmondförmige Bereiche sichtbar, die durch nicht-optimale Spülbedingungen entstehen, siehe Abbildung A.1 und A.2. Die Abschätzung des Durchflusses nach Hagen-Poiseuille für einen rechteckigen Querschnitt und unter der Annahme einer stationären, laminaren Strömung, vgl. Gleichung (51) [223], offenbart den Grund und zeigt, dass die Impulspause nicht für einen kompletten Elektrolytaustausch ausreicht. Dies führt zu einer Verschmutzung des Bereichs gegenüber der Einspülseite und erklärt die teilweise gemessenen ansteigenden Rauheiten bei hoher Stromdichte bzw. kleinen Spaltweiten. Der Gleichgewichtsspalt ergibt sich gemäß den Parametereinstellungen und wird während des Bearbeitungsimpulses wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben maximal um Δs_{mech} vergrößert.

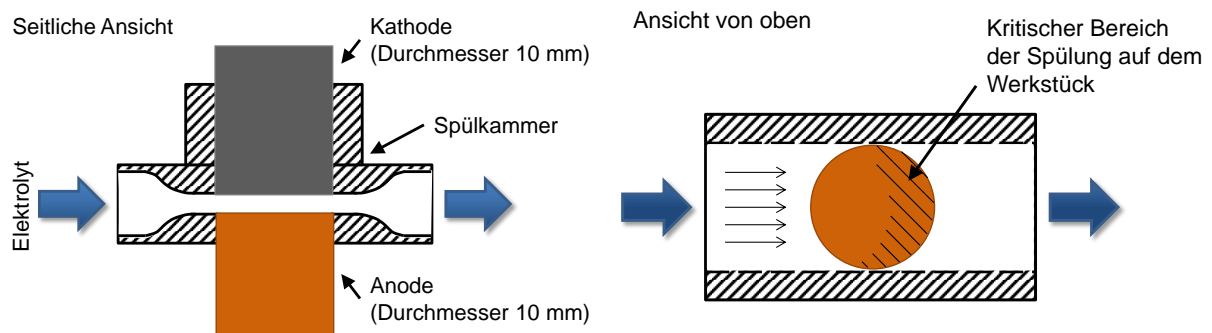


Abbildung A.1: Kritischer Spülungsbereich der verwendeten Spülkammer



Abbildung A.2: Foto der Verschmutzung auf einem Kupfer-Werkstück

$$\dot{V} = \frac{h^3 \cdot b \cdot \Delta p}{12 \cdot \eta \cdot l} \cdot \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^5} \cdot \frac{192}{\pi^5} \cdot \frac{h}{b} \cdot \tanh\left(n \cdot \pi \cdot \frac{b}{2 \cdot h}\right) \right] \quad (51)$$

Die Ergebnisse der Berechnung in Abbildung A.3 zeigen den theoretischen Elektrolytaustausch auf Basis des Volumenstroms und des tatsächlich zu durchströmenden Volumens unter Berücksichtigung der Phase während des Bearbeitungsimpulses und der Bearbeitungspause unter folgenden Annahmen:

- Kanalbreite: $b = 10 \text{ mm}$
- Kanallänge: $l = 10 \text{ mm}$
- Druckdifferenz: $\Delta p = 200 \text{ kPa}$
- Iteration: $n = 1$
- Spaltweite: $s = 50 \text{ }\mu\text{m}$
- Elektrolyttemperatur: $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Phase: $P = 80 \text{ }\%$
- Amplitude: $\text{Amp} = 183,5 \text{ }\mu\text{m}$

Eine weitere Vereinfachung ist die Annahme von reinem Wasser, woraus die Viskosität der Flüssigkeit zu $\eta = 1$ folgt. Während der Impulszeit ergibt sich die Kanalhöhe aus dem Gleichgewichtsspalt und der mechanischen Spaltweite Δs_{mech} . Die Kanalhöhe in der Impulspause ergibt sich entsprechend zu: $h = 2 \cdot \text{Amp} \cdot \Delta s_{\text{mech}} + s$.

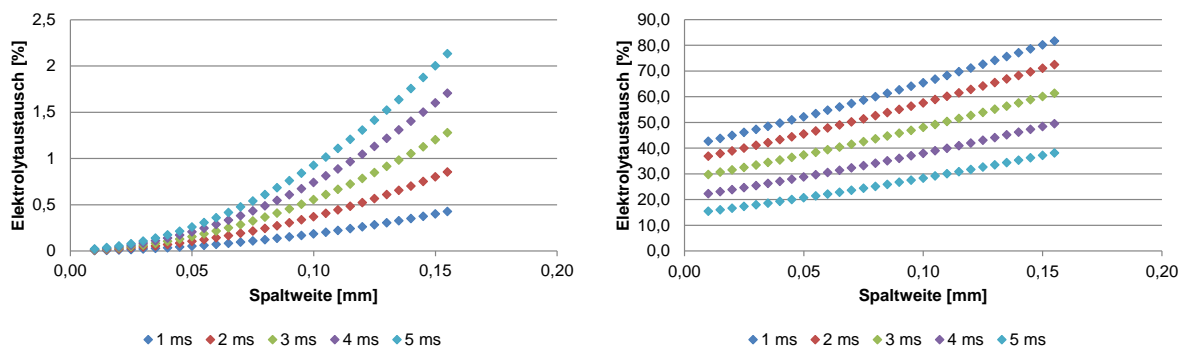


Abbildung A.3: Elektrolytaustausch
während des Bearbeitungsimpulses während der Bearbeitungspause

Es wird deutlich, dass während des eigentlichen Bearbeitungsimpulses so gut wie kein Elektrolytaustausch stattfindet. Je kürzer die Impulszeit ist, desto größer ist die zur Verfügung stehende Pausenzeit für den Elektrolytaustausch, da die Frequenz fest eingestellt ist. Ein vollständiger Elektrolytaustausch bei der verwendeten Geometrie ist demnach nur bei sehr großen Gleichgewichtsspalten möglich.

Die Größe des kritischen Bereichs hängt von der Frequenz und der Impulszeit ab, die die momentane Kanalhöhe neben dem Gleichgewichtsspalt bestimmen. Eine Verringerung der Frequenz führt zu einem gleichmäßigeren Spalt, reduziert jedoch die Bearbeitungsgeschwindigkeit.

Aufgrund der Fertigungstoleranzen von Spülkammer und Werkstück können Leckagen auftreten. Bei der Berechnung wird allerdings von einer vollkommenen Durchströmung des Spülkanals mit dem Elektrolyten ausgegangen.

Anhang B: Ergebnisse der Frontalspaltversuche

Hier sind ausgewählte Ergebnisse der Frontalspaltversuche für die verschiedenen Vorschübe, Spannungen, Impulszeiten und pH-Werte aufgeführt, und zwar beschränkt auf die Versuche bei einer Phase von $P = 80\%$, einem eingestellten Druck von $p = 200\text{ kPa}$ und bis zu einem Vorschub von $v_f = 0,22\text{ mm/min}$. Darüber hinaus wurden viele Messwerte für weitere Vorschübe, Drücke und Phasenlagen gewonnen, die in die Auswertung eingeflossen sind.

pH 5,5		7 V				10 V				13 V			
v_f	t_{on}	J	SMR	s	R_a	J	SMR	s	R_a	J	SMR	s	R_a
0,01	2	0,027	0,759	0,514	12,158	0,053	0,453	0,752	10,207	0,094	0,317	0,948	10,927
0,02		0,040	0,732	0,234	11,791	0,079	0,445	0,467	11,042	0,127	0,312	0,611	4,574
0,03		0,101	0,479	0,128	1,336	0,124	0,385	0,300	1,107	0,160	0,322	0,447	0,303
0,04		0,144	0,433	0,076	0,419	0,171	0,377	0,218	0,440	0,213	0,322	0,320	0,371
0,05													
0,07		0,274	0,391	0,034	0,365	0,313	0,350	0,102	0,629	0,320	0,338	0,187	0,487
0,10		0,408	0,378	0,006	0,669	0,446	0,347	0,052	1,071	0,465	0,337	0,105	0,331
0,13						0,575	0,347	0,036	1,111	0,601	0,334	0,059	0,358
0,16						0,710	0,344	0,032	2,782	0,740	0,333	0,047	0,272
0,19						0,835	0,342	0,032	2,315	0,865	0,332	0,041	0,404
0,22										1,007	0,333	0,039	0,470

pH 7,2		7 V				10 V				13 V			
v_f	t_{on}	J	SMR	s	R_a	J	SMR	s	R_a	J	SMR	s	R_a
0,01	1	0,061	0,744	0,228	14,017	0,104	0,532	0,375		0,147	0,391	0,529	
0,02		0,159	0,454	0,107	5,058	0,173	0,404	0,172	13,605				
0,03		0,234	0,429	0,068	4,572	0,247	0,391	0,128	0,901				
0,04		0,310	0,417	0,049		0,344	0,383	0,113		0,357	0,358	0,168	
0,05		0,382	0,395	0,018	1,112	0,435	0,362	0,053	0,845				
0,07		0,552	0,390	0,020		0,605	0,368	0,042		0,630	0,354	0,071	
0,10		0,836	0,388	0,016		0,866	0,369	0,030		0,890	0,354	0,048	
0,13						1,176	0,359	0,027		1,188	0,337	0,034	
0,16										1,406	0,351	0,032	
0,19													
0,22													
0,01	2	0,033	0,845	0,513	15,184	0,069	0,414	0,698	11,139	0,099	0,370	0,775	3,643
0,02		0,061	0,570	0,264	13,417	0,084	0,424	0,517	5,267				
0,03		0,102	0,483	0,144	2,180	0,119	0,394	0,315	1,645				
0,04		0,145	0,449	0,108	0,391	0,167	0,374	0,247	0,586	0,210	0,352	0,318	0,585
0,05		0,184	0,425	0,077	0,424	0,198	0,381	0,185	0,672				
0,07		0,236	0,434	0,066	0,590	0,294	0,366	0,132	0,497	0,331	0,351	0,185	0,484
0,10		0,400	0,392	0,035	0,462	0,436	0,353	0,082	0,502	0,459	0,356	0,126	0,492
0,13		0,550	0,376	0,023	0,854	0,566	0,348	0,052	0,427	0,566	0,337	0,065	0,460
0,16		0,685	0,364	0,021	1,074	0,719	0,349	0,040	0,616	0,720	0,353	0,063	0,682
0,19		0,822	0,366	0,019	1,442	0,854	0,345	0,042	0,404	0,870	0,344	0,050	0,636
0,22						0,987	0,344	0,035	0,604	0,995	0,345	0,045	0,549

pH 7,2		7 V				10 V				13 V							
v_f	t_{on}	J	SMR	s	R_a	J	SMR	s	R_a	J	SMR	s	R_a				
0,01	3	0,026	0,715	0,551	17,027	0,060	0,384	0,732	4,634	0,087	0,343	0,914	3,304				
0,02		0,037	0,661	0,384	13,041	0,069	0,432	0,711									
0,03		0,068	0,525	0,248	5,717	0,086	0,398	0,508									
0,04		0,079	0,524	0,234	1,446	0,130	0,364	0,342	0,655					0,172	0,344	0,407	0,676
0,05		0,121	0,444	0,151	0,856	0,144	0,375	0,277									
0,07		0,159	0,461	0,111	0,799	0,210	0,357	0,205	0,496					0,247	0,344	0,263	0,499
0,10		0,268	0,400	0,043	1,480	0,290	0,347	0,132	0,418					0,318	0,345	0,188	0,455
0,13		0,363	0,388	0,034	1,879	0,390	0,346	0,089	0,373					0,392	0,338	0,139	0,425
0,16		0,462	0,376	0,027	1,692	0,479	0,344	0,064	0,365					0,495	0,341	0,109	0,524
0,19		0,548	0,361	0,021	1,487	0,572	0,345	0,050	0,343					0,574	0,344	0,091	0,631
0,22		0,640	0,363	0,019	1,791	0,666	0,344	0,045	0,622					0,674	0,340	0,072	0,719
0,01		4	0,023	0,749	0,616	8,862	0,054	0,382	0,870					3,275	0,066	0,309	1,257
0,02	0,031		0,662	0,483	14,001	0,060	0,398	0,775									
0,03	0,040		0,637	0,367	9,576	0,084	0,374	0,517									
0,04	0,047		0,693	0,321	1,011	0,127	0,356	0,375	0,735	0,126	0,324	0,614	1,005				
0,05	0,090		0,460	0,193	1,079	0,180	0,349	0,240									
0,07	0,110		0,503	0,169	0,652	0,234	0,342	0,165	0,504	0,175	0,350	0,434	0,729				
0,10	0,186		0,424	0,059	0,489	0,318	0,345	0,115	0,412	0,254	0,337	0,261	0,534				
0,13	0,250		0,397	0,047	0,404	0,373	0,340	0,099	0,376	0,309	0,340	0,194	0,457				
0,16	0,336		0,392	0,039	0,508	0,431	0,340	0,078	0,350	0,388	0,332	0,145	0,443				
0,19	0,399		0,374	0,024	0,503	0,503	0,337	0,062	0,514	0,453	0,345	0,117	0,380				
0,22	0,478		0,369	0,022	0,568	0,578	0,342		0,607	0,522	0,343	0,096	0,330				
0,01	5		0,020	0,748	0,869						0,077	0,248	1,322				
0,02		0,027	0,617	0,557	16,329												
0,03		0,036	0,616	0,352	10,260												
0,04		0,060	0,527	0,290		0,070	0,405	0,533		0,118				0,304	0,737		
0,05		0,065	0,487	0,187	0,885												
0,07		0,103	0,479	0,174		0,122	0,389	0,312		0,168				0,319	0,455		
0,10		0,157	0,424	0,111		0,170	0,385	0,214		0,213				0,337	0,329		
0,13		0,200	0,423	0,068		0,215	0,378	0,164		0,257				0,333	0,257		
0,16		0,258	0,402	0,053		0,276	0,360	0,121		0,292				0,337	0,213		
0,19		0,319	0,386	0,040		0,320	0,374	0,104		0,367				0,309	0,158		
0,22		0,369	0,368	0,031		0,395	0,351	0,084		0,417				0,326	0,127		

pH 10,3		7 V				10 V				13 V				
v_f	t_{on}	J	SMR	s	R_a	J	SMR	s	R_a	J	SMR	s	R_a	
0,01	1	0,045	0,769	0,132	14,557	0,089	0,453	0,333	11,061	0,126	0,364	0,483	10,826	
0,02		0,130	0,500	0,022		0,164	0,381	0,097		0,180	0,357	0,256		
0,03		0,228	0,406	0,024		0,264	0,349	0,054		0,313	0,332	0,127		
0,04		0,320	0,398	0,030	0,552	0,335	0,368	0,079	0,504	0,374	0,336	0,068	0,380	
0,05														
0,07						0,619	0,350	0,040	0,497	0,634	0,342	0,075	0,519	
0,10						0,885	0,355	0,028	1,055	0,894	0,345	0,039	0,330	
0,13						1,166	0,350	0,025	0,618	1,182	0,334	0,034	0,945	
0,16										1,465	0,340	0,032	1,078	
0,19										1,773	0,336	0,029		
0,22										2,003	0,340	0,030		

pH 10,3		7 V				10 V				13 V			
v_i	t_{on}	J	SMR	s	R_a	J	SMR	s	R_a	J	SMR	s	R_a
0,01	2	0,026	0,732	0,414	9,900	0,071	0,390	0,462	8,454	0,096	0,326	0,811	3,840
0,02		0,044	0,687	0,132		0,093	0,393	0,366		0,118	0,329	0,611	
0,03		0,104	0,459	0,090		0,129	0,367	0,191		0,162	0,317	0,329	
0,04		0,151	0,423	0,108	0,451	0,168	0,374	0,213	0,301	0,203	0,327	0,232	0,377
0,05													
0,07		0,267	0,389	0,043	0,742	0,307		0,117	0,443	0,322	0,340	0,163	0,297
0,10		0,414	0,378	0,029	0,776	0,432	0,348	0,064	0,711	0,462	0,333	0,117	0,332
0,13		0,546	0,362	0,013	0,507	0,588	0,350	0,044	0,313	0,601	0,330	0,074	0,237
0,16						0,708	0,346	0,039	0,453	0,730	0,332	0,053	0,324
0,19						0,841	0,347	0,033	0,474	0,861	0,335	0,048	0,238
0,22						0,989		0,030	0,466	0,995	0,338	0,044	0,186
0,01	3	0,024	0,620	0,463	8,515	0,058	0,378	0,699	6,874	0,085	0,304	1,082	3,507
0,02		0,039	0,633	0,244		0,062	0,418	0,619		0,105	0,354	0,800	
0,03		0,059	0,535	0,147		0,084	0,391	0,454		0,119	0,313	0,678	
0,04		0,090	0,457	0,134	0,625	0,112	0,360	0,374	0,442	0,155	0,314	0,454	0,355
0,05													
0,07		0,182	0,402	0,097	0,421	0,207	0,346	0,202	0,296	0,234	0,345	0,276	0,273
0,10		0,266	0,384	0,052	0,546	0,305	0,339	0,124	0,445	0,320	0,327	0,184	0,338
0,13		0,357	0,366	0,038	0,279	0,395	0,336	0,081	0,485	0,405	0,325	0,122	0,321
0,16		0,461	0,334	0,029	0,388	0,476	0,339	0,058	0,346	0,508	0,322	0,083	0,282
0,19		0,543	0,357	0,026	0,507	0,567	0,340	0,043	0,291	0,596	0,325	0,062	0,322
0,22						0,656	0,339	0,039	0,300	0,691	0,326	0,058	0,271
0,01	4	0,023	0,608	0,648	7,622	0,040	0,400	1,041	8,192	0,075	0,252	1,280	2,504
0,02		0,028	0,676	0,472		0,045	0,449	0,830		0,084	0,280	1,088	
0,03		0,034	0,647	0,286		0,066	0,408	0,602		0,097	0,295	0,919	
0,04		0,059	0,546	0,230	0,584	0,091	0,363	0,456	0,673	0,121	0,299	0,660	0,668
0,05													
0,07		0,126	0,435	0,140	0,491	0,131	0,357	0,277	0,336	0,170	0,307	0,407	0,346
0,10		0,197	0,391	0,083	0,583	0,179	0,348	0,181	0,379	0,244	0,333	0,255	0,296
0,13		0,274	0,385	0,050	0,445	0,291	0,337	0,133	0,468	0,317	0,319	0,178	0,345
0,16		0,338	0,367	0,039	0,314	0,369	0,338	0,086	0,431	0,387	0,315	0,122	0,326
0,19		0,409	0,355	0,033	0,598	0,434	0,335	0,065	0,439	0,458	0,325	0,098	0,294
0,22		0,483	0,358	0,025	0,461	0,507	0,336	0,050	0,283	0,520	0,324	0,072	0,288
0,01	5	0,021	0,530	0,856	9,715	0,039			8,315	0,074	0,244	1,383	5,302
0,02		0,025	0,601	0,570	8,022	0,038	0,395	0,995		0,081	0,252	1,113	
0,03		0,034	0,611	0,352	3,356	0,051	0,406	0,777		0,089	0,265	1,036	
0,04		0,040	0,598	0,296	2,118	0,077	0,358	0,576	0,805	0,106	0,299	0,828	0,818
0,05													
0,07		0,099	0,447	0,170	0,542	0,132	0,354	0,338	0,421	0,153	0,312	0,475	0,343
0,10		0,156	0,400	0,058	0,592	0,183	0,349	0,212	0,553	0,200	0,312	0,335	0,295
0,13		0,211	0,377	0,042	0,438	0,238	0,344	0,161	0,385	0,254	0,307	0,244	0,328
0,16		0,260	0,371	0,036	0,950	0,293	0,335	0,120	0,449	0,315	0,314	0,195	0,353
0,19		0,315	0,361	0,028	0,579	0,347	0,337	0,082	0,408	0,372	0,322	0,154	0,321
0,22		0,378	0,355	0,024	1,164	0,398	0,337	0,059	0,336	0,425	0,312	0,116	0,276

Anhang C: Auswertung der EDM-Materialabtragsversuche VG627

Einfluss von Strom, Spannung und Impulszeit auf den Elektrodenverschleiß

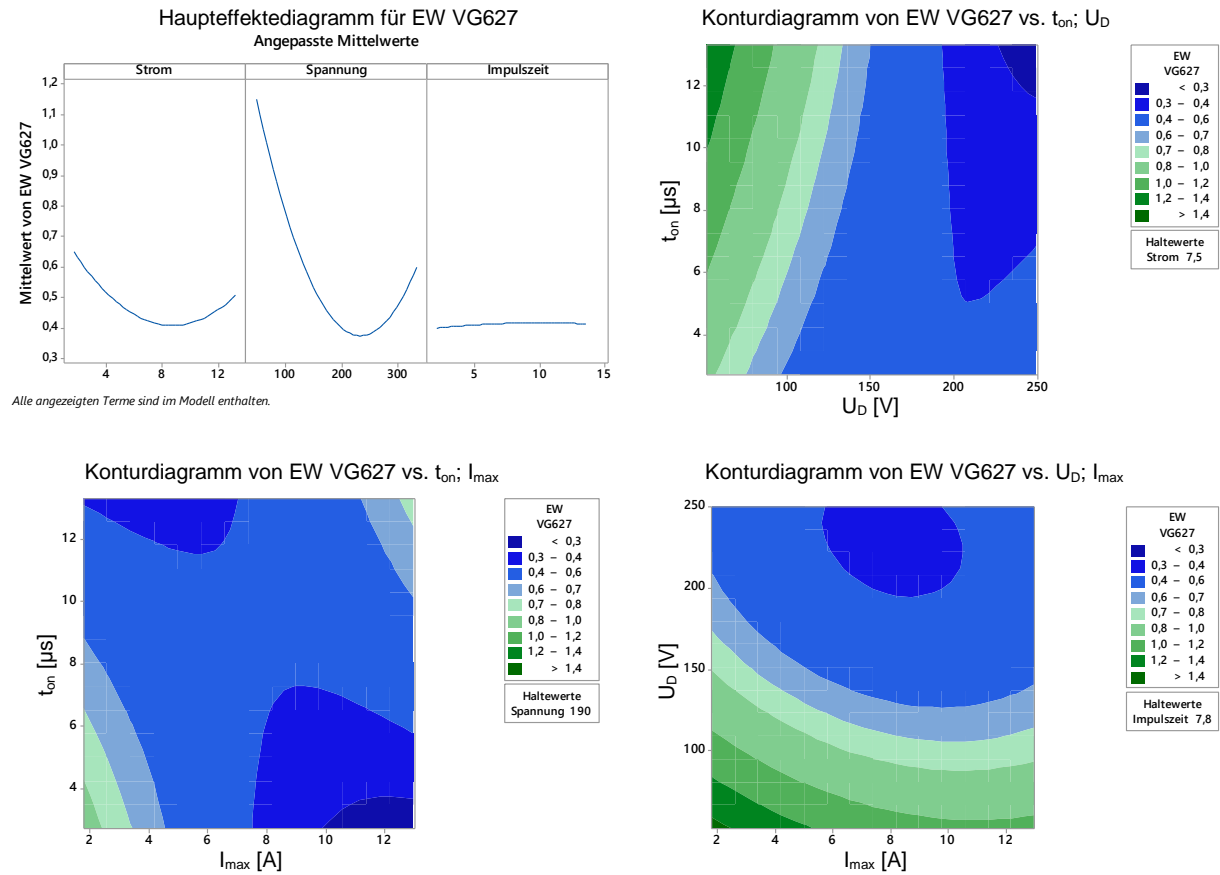


Abbildung C.1: Haupteffekte- und Konturdiagramme zum Elektrodenverschleiß bei VG627

Modell zum Elektrodenverschleiß

$$\begin{aligned}
 EW_{VG627} = & 2,096 - 0,1806 \cdot I_{max} - 0,00875 \cdot U_D + 0,0128 \cdot t_{on} \\
 & + 0,00492 \cdot I_{max}^2 + 0,000022 \cdot U_D^2 - 0,00027 \cdot t_{on}^2 \\
 & + 0,000164 \cdot I_{max} \cdot U_D + 0,00810 \cdot I_{max} \cdot t_{on} - 0,000358 \cdot U_D \cdot t_{on}
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 0,9225$$

Einfluss von Strom, Spannung und Impulszeit auf die Materialabtragsrate

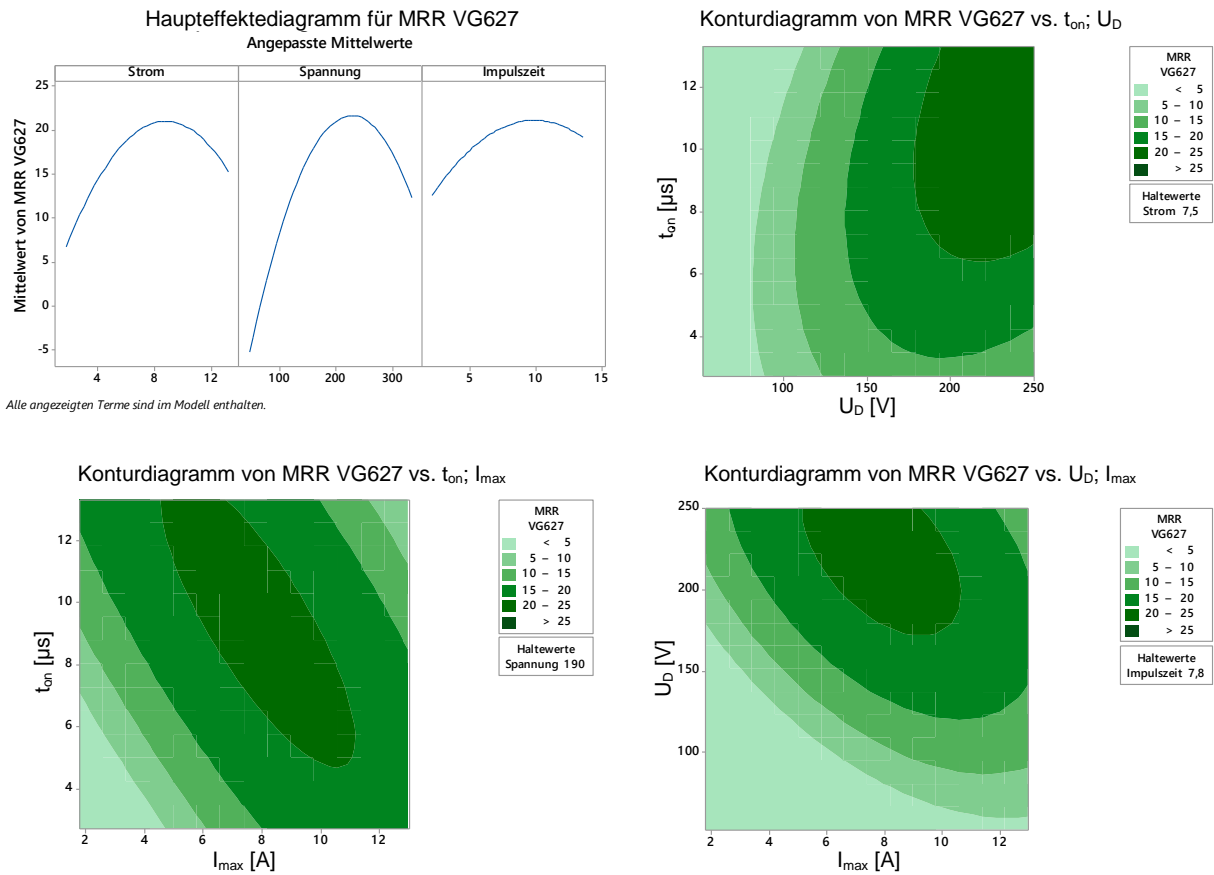


Abbildung C.2: Haupteffekte- und Konturdiagramme zur Materialabtragsrate bei VG627

Modell zur Materialabtragsrate

$$\begin{aligned} \text{MRR}_{\text{VG627}} = & -80,0 + 10,52 \cdot I_{\text{max}} + 0,40 \cdot U_D + 3,13 \cdot t_{\text{on}} \\ & - 0,289 \cdot I_{\text{max}}^2 - 0,000821 \cdot U_D^2 - 0,142 \cdot t_{\text{on}}^2 \\ & - 0,0153 \cdot I_{\text{max}} \cdot U_D - 0,327 \cdot I_{\text{max}} \cdot t_{\text{on}} + 0,0111 \cdot U_D \cdot t_{\text{on}} \end{aligned}$$

$$R^2 = 0,7278$$

Einfluss von Strom, Spannung und Impulszeit auf die Oberflächenrauheit R_a

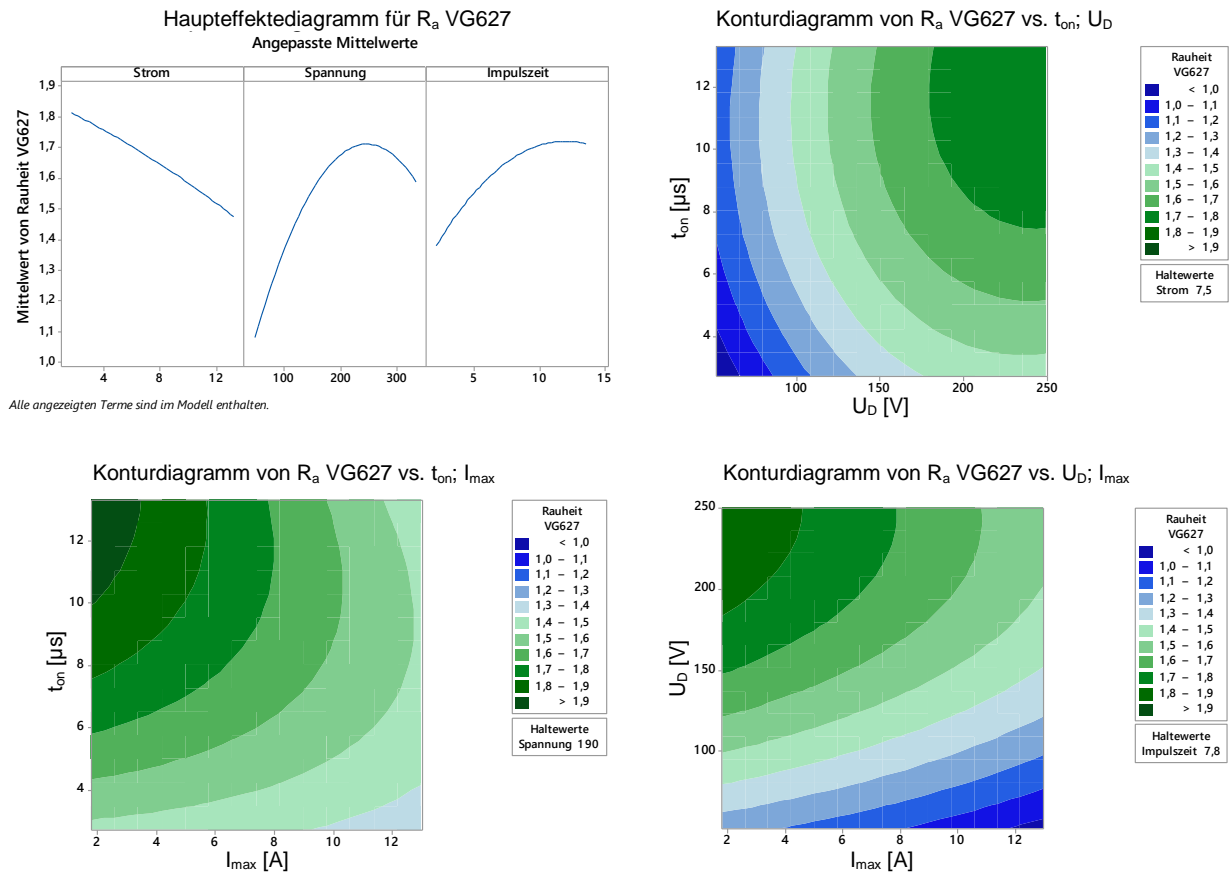


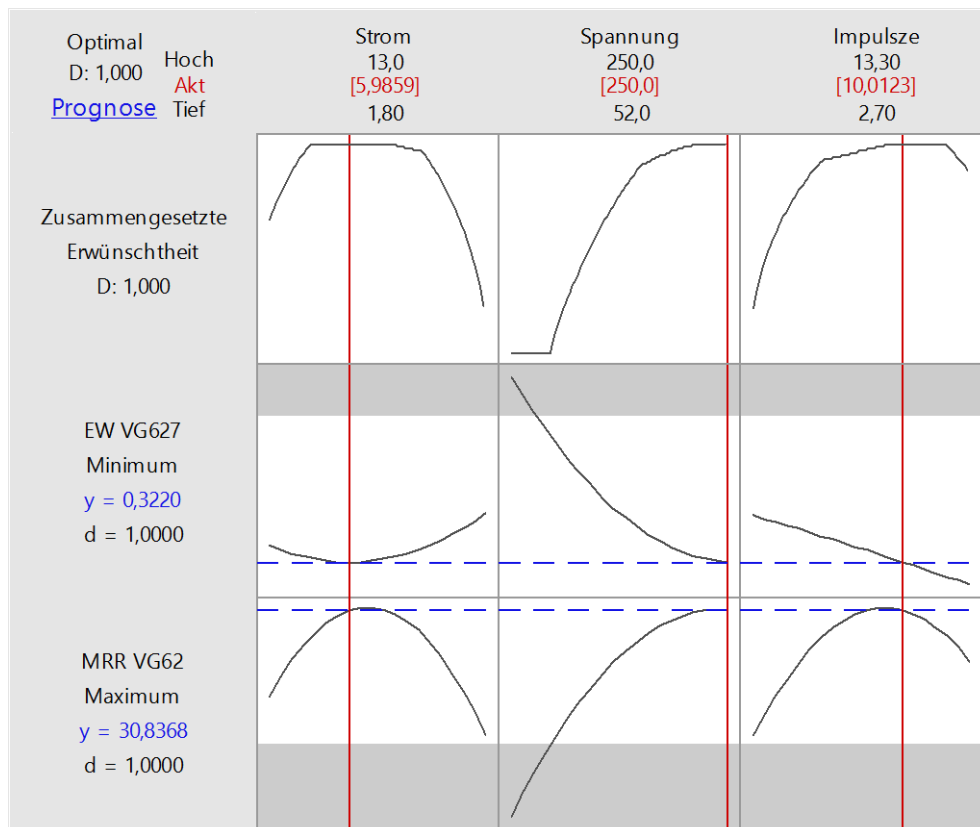
Abbildung C.3: Haupteffekte- und Konturdiagramme zur Oberflächenrauheit bei VG627

Modell zur Oberflächenrauheit R_a

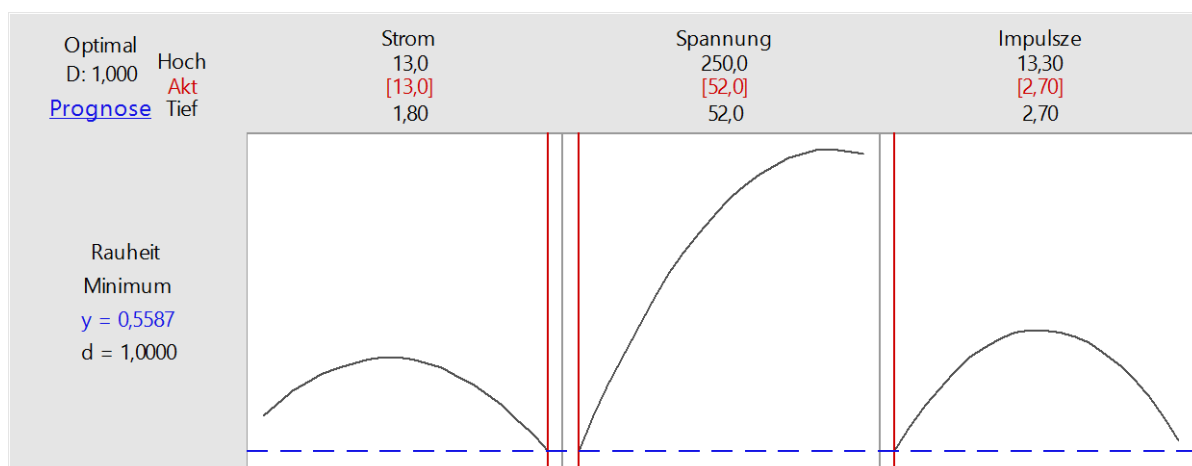
$$R_{a \text{ VG627}} = 0,339 + 0,0124 \cdot I_{\max} + 0,00760 \cdot U_D + 0,0988 \cdot t_{on} - 0,00054 \cdot I_{\max}^2 - 0,000016 \cdot U_D^2 - 0,00354 \cdot t_{on}^2 - 0,000036 \cdot I_{\max} \cdot U_D - 0,00346 \cdot I_{\max} \cdot t_{on} + 0,000059 \cdot U_D \cdot t_{on}$$

$$R^2 = 0,9042$$

Parameteroptimierung zur Strukturierung



Parameteroptimierung zur Oberflächenglättung



Anhang D: Anlagentechnik

Elektrochemische Senkanlage PEMCenter 8000

- Hersteller: PEMTec SNC France
- Elektrolyt: Natriumnitrat NaNO_3
- Füllmenge: ca. 2000 Liter
- Elektrolyttemperatur: $T = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
- NaNO_3 -Konzentration: 75 g/L (technisch pur, einstellbar) entsprechend:
- Elektrolytleitfähigkeit: $\sigma = 71 \pm 1 \text{ mS/cm}$
- Vibratoramplitude: $A = 183,5 \text{ } \mu\text{m}$
- Max. Verfahrweg: $z = 170 \text{ mm}$
- Vorschubgeschwindigkeit: 0,001–5 mm/min
- $I_{\text{max}} = 8000 \text{ A}$ (gepulst)
- $U_{\text{max}} = 18,7 \text{ V}$
- Tastspannung $U_{\text{Tast}} = 2,7 \text{ V}$ mit Strombegrenzung auf $I_{\text{Tast}} \leq 120 \text{ mA}$ pro Generator
(\rightarrow max. $I_{\text{Tast}} = 480 \text{ mA}$)



Abbildung D.1: PEMCenter am ZeMA

Korrekturkurve für die vom PEMCenter ausgegebenen Stromwerte:

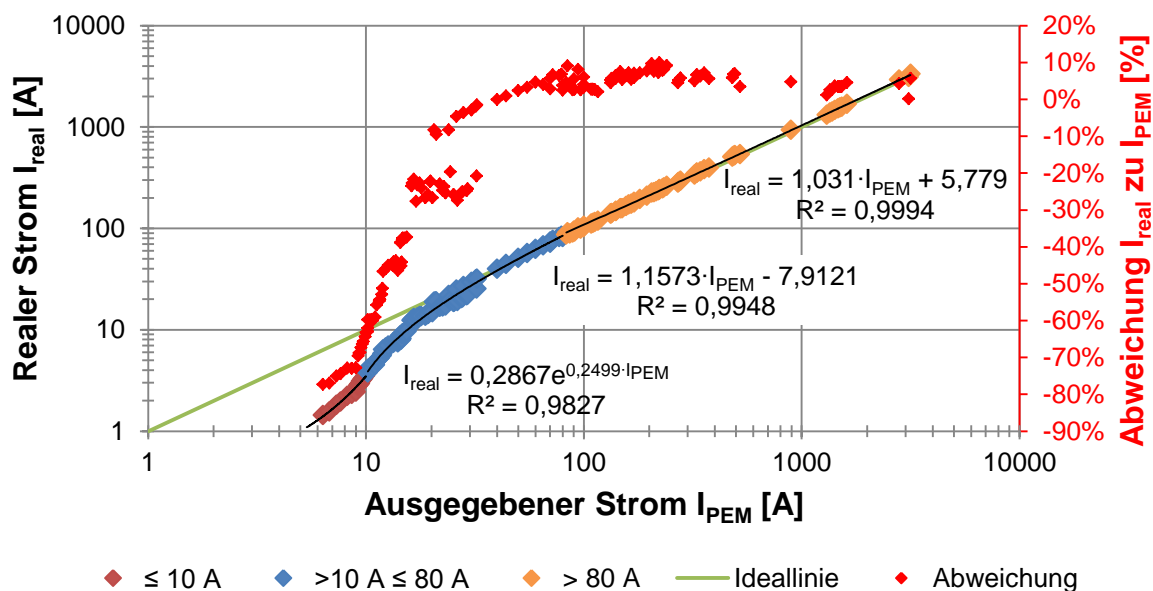


Abbildung D.2: Darstellung der realen zu den ausgegebenen Stromhöhen der PEM-Anlage und der verwendeten abschnittswisen Regressionen

Funkerosive Senkanlage Form20

- Hersteller: +GF+ AgieCharmilles (jetzt GF Machining Solutions)
- Dielektrikum: Oelheld IonoPlus IME-MH
- Füllmenge: ca. 270 Liter
- Dielektrikumtemperatur: $T = 20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Leitfähigkeit: ca. $\sigma = 2 \cdot 10^{-14} \text{ S/cm}$
- Max. Verfahrswege: $x = 350 \text{ mm}$, $y = 250 \text{ mm}$, $z = 250 \text{ mm}$
- $I_{\text{max}} = 72 \text{ A}$
- $U_{\text{max}} = 250 \text{ V}$



Abbildung D.3: Form20 am ZeMA

Digitalmikroskop VHX-500 F

- Hersteller: Keyence
- Portables System
- Vergrößerung bis 200-fach

Laserscanning Mikroskop LEXT OLS

- Hersteller: Olympus
- Konfokales 3D- Laserscanning
- Motorisierter Kreuztisch und z-Antrieb inkl. Schwingungsdämpfung
- Objektive 5–100-fach
- max. Auflösung: 120 nm (horizontal) / 10 nm (vertikal)
- Lichtquelle: Diodenlaser mit 408 nm Wellenlänge

3D-Koordinatenmessgerät Prismo

- Hersteller: Zeiss
- Universaltaster für Maß-, Form- und Lagetoleranz
- Genauigkeit: $1,8 \mu\text{m} + L/300$
- Messbereich: 700x900x500 mm

Perthometer MarSurf XR/XT 20

- Hersteller: Mahr
- Messprinzip nach Tastschnittverfahren
- max. Taststrecke: 120 mm

Präzisionswaage MSE2203S

- Hersteller: Sartorius
- Auflösung: $d = 0,001 \text{ g}$
- Wägebereich: bis 2000 g

Stromwandler HTA 100-s

- Hersteller: LEM
- Nominalstrom: $IPN = 100 \text{ A}$
- Ausgang: $U = \pm 4 \text{ V @ } \pm 1 \text{ PN}$
- Spannungsversorgung: $\pm 15 \text{ V}$
- Genauigkeit: $\pm 1 \text{ } \%$
- Bandbreite: DC..50 kHz
- Sprungantwort zu 90 % IPN: $< 3 \mu\text{s}$

Differenzastkopf TT SI 9110

- Hersteller: Testec
- Bandbreite: 100 MHz
- $U_{\max} = 1400 \text{ V}$ @ Tastverhältnis: 1000:1
- $U_{\max} = 140 \text{ V}$ @ Tastverhältnis: 100:1

Rasterelektronenmikroskop Sigma

- Hersteller: Zeiss
- Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop
- Detektor für energiedispersive Röntgenspektroskopie
- Beschleunigungsspannung: 0,2–30 kV
- Vergrößerung: 10x–1.000.000x

Anhang E: Rauheitskennwerte

Rauheitskennwerte nach EN ISO 4287 [191].

Mittenrauwert R_a ist der arithmetische Mittelwert der Beträge aller Profilwerte des Rauheitsprofils:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

Einzelrautiefe R_{zi} ist die Summe aus der Höhe der größten Profilspitze und der Tiefe des größten Profiltals des Rauheitsprofils innerhalb einer Einzelmessstrecke l_r .

Rautiefe R_z ist der arithmetische Mittelwert der Einzelrautiefen R_{zi} aufeinanderfolgender Einzelmessstrecken:

$$R_z = \frac{1}{n} \cdot (R_{z1} + R_{z2} + \dots + R_{zn})$$

Maximale Rautiefe R_{max} ist die größte Einzelrautiefe innerhalb der Gesamtmessstrecke.

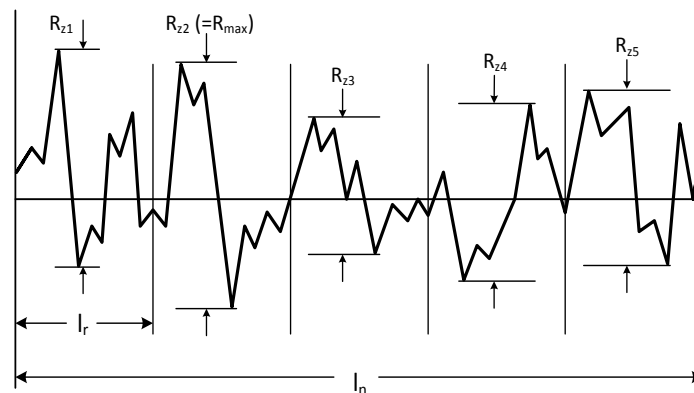


Abbildung E.1: Darstellung der Rauheitskennwerte an einem Rauheitsprofil

Die Wahl der Einzelmessstrecke für aperiodische Profile richtet sich nach der zu messenden Rauheit und ist Tabelle E.1 zu entnehmen, ergänzt um die insgesamt benötigte Taststrecke l . Die Messstrecke l_n setzt sich aus fünf Einzelmessstrecken zusammen, die insgesamt benötigte Taststrecke setzt sich aus l_n sowie einer Vorlauf- und Nachlaufstrecke, die jeweils die Länge l_r besitzen, zusammen. Damit ergibt sich eine benötigte Abtaststrecke von:

$$l = l_r + l_n + l_r = 7 \cdot l_r$$

Tabelle E.1: Wahl der Grenzwellenlänge nach EN ISO 4288 [194]

Ra [μm]	Grenzwellenlänge (Cutoff) λ_c [mm]	Einzel- / Gesamtmessstrecke l_r/l_n [mm]	Taststrecke l [mm]
bis 0,02	0,08	0,08 / 0,4	0,56
> 0,02 bis 0,1	0,25	0,25 / 1,25	1,75
> 0,1 bis 2	0,8	0,8 / 4	5,6
> 2 bis 10	2,5	2,5 / 12,5	17,5
> 10 bis 80	8	8 / 40	56