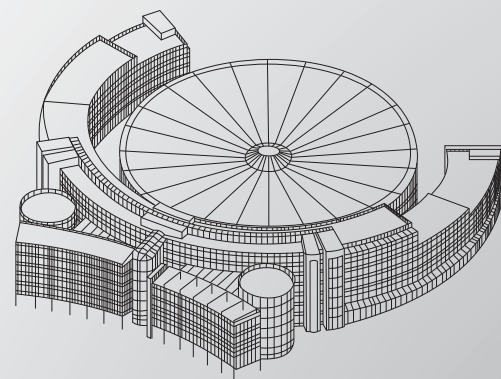
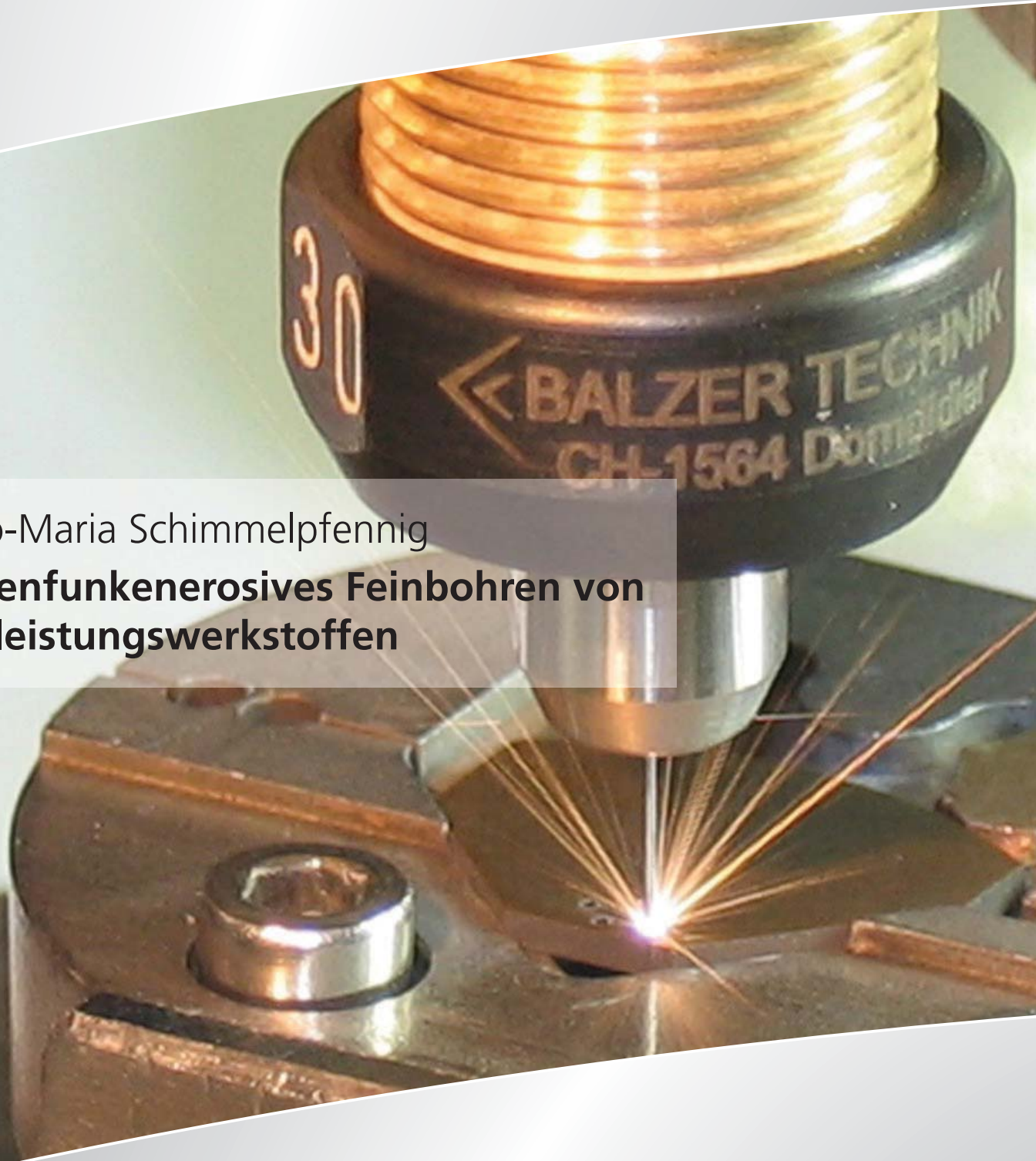


BERICHTE AUS DEM PRODUKTIONSTECHNISCHEN ZENTRUM BERLIN



Tassilo-Maria Schimmelpfennig
**Trockenfunkenerosives Feinbohren von
Hochleistungswerkstoffen**



BERICHTE AUS DEM PRODUKTIONSTECHNISCHEN ZENTRUM BERLIN

Tassilo-Maria Schimmelpfennig

Trockenfunkenerosives Feinbohren von Hochleistungswerkstoffen

Herausgeber:

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. E. Uhlmann

Prof. Dr.-Ing. H. Kohl

Prof. Dr.-Ing. R. Jochem

Prof. Dr.-Ing. J. Krüger

Prof. Dr.-Ing. M. Rethmeier

Prof. Dr.-Ing. G. Seliger

Prof. Dr.-Ing. R. Stark

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstraße 8-9
10587 Berlin
Telefon 030 39006-0
Fax 030 39110-37
E-Mail info@ipk.fraunhofer.de
URL www.ipk.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über www.dnb.de abrufbar.
ISBN (Print): 978-3-8396-1060-2

D 83

Zugl.: Berlin, TU, Diss., 2016

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2016
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Fax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Trockenfunkenerosives Feinbohren von Hochleistungswerkstoffen

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur Tassilo-Maria Schimmelpfennig
aus Berlin

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Henning J. Meyer

Gutachter: Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18. Mai 2016

Berlin 2016

D83

Für Johanna-Elisabeth

Vorwort des Herausgebers

Der wachsende internationale Wettbewerb für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau sowie das kontinuierliche Streben nach mehr Leistung und Zuverlässigkeit in der Produktion verlangen eine stetige Anpassung und Optimierung bestehender Fertigungstechnologien. Insbesondere die Fertigungsverfahren der Mikroproduktionstechnik zur Herstellung hochbeanspruchter und präziser Komponenten für mikrosystemtechnische Anwendungen sind aufgrund ihres zunehmenden Bedarfs betroffen.

Die Mikrofunktenerosion ist ein industriell etabliertes Verfahren zur Herstellung präziser Mikrobohrungen mit Bohrungsdurchmessern von $100 \mu\text{m} \leq d_B \leq 300 \mu\text{m}$ in hochharten und spröden Werkstoffen. Trotz modernster Maschinen- und Generatortechnik stellt ein steigendes Aspektverhältnis, insbesondere in sprödharten Werkstoffen, aufgrund unzureichender Spülbedingungen an der Wirkstelle eine Herausforderung dar. Folgen sind, bedingt durch das mit Abtragpartikeln kontaminierte Dielektrikum im Arbeitsspalt, Kurzschlüsse und Fehlentladungen, die Prozessinstabilitäten sowie Formabweichungen der Bohrungsgeometrie bewirken.

Zur Verbesserung der Spülbedingungen sind in den vergangenen Jahren neue Ansätze untersucht worden, welche die Verwendung niederviskoser Arbeitsmedien wie zerstäubte Flüssigkeiten oder die reine Trockenfunktenerosion mit Gasen als Dielektrikum verfolgen. Dem industriellen Einsatz dieser innovativen Ansätze stehen unzureichend erforschte und beschriebene Wirkungszusammenhänge der Trockenfunktenerosion, insbesondere zwischen Prozessstellgrößen, Prozessgas und Werkstückwerkstoff, entgegen.

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Entwicklung, Analyse sowie der Anwendung einer neuartigen Technologie - das trockenfunktenerosive Feinbohren für die Bearbeitung keramischer Werkstoffe. Es werden grundlegende technologische Fragestellungen zum prozesssicheren Einsatz der Trockenfunktenerosion am Beispiel spezifischer Keramiken erörtert. Im Hinblick auf einen abtrag- und verschleißoptimierten funktenerosiven Feinbohrprozess erfolgt die systematische Erarbeitung von Prozesstechnologien. Diese mündet durch den Einsatz prozessfördernder Gase in die Bereitstellung von abtragorientierten Schrapp- und verschleißorientierten Prozesstechnologien, die dem konventionellen funktenerosiven Feinbohrprozess überlegen sind.

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK.

Herrn Professor Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, dem Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK sowie des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF der Technischen Universität Berlin, danke ich für die Unterstützung und Betreuung dieser Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT und dem Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie für das Interesse an meiner Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. Hennig J. Meyer, dem Leiter des Fachgebiets Konstruktion von Maschinensystemen am Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik der Technischen Universität Berlin, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Herrn Dr.-Ing. Dirk Oberschmidt danke ich für die wertvollen Anregungen in unseren fachlichen Diskussionen und für die Durchsicht des Manuskripts. Allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern der Abteilung Mikroproduktionstechnik, mit denen ich intensiv zusammengearbeitet habe, danke für die sehr gute Arbeitsatmosphäre und die stets spannende Zeit. Hervorheben möchte ich dabei die Herren Dr.-Ing. Armin Löwenstein, David Carlos Domingos, Dr.-Ing. Niels Raue, Dr.-Ing. Christian Gabriel, Dr.-Ing. Frederik Mahr und im Besonderen Herrn Dr.-Ing. Malte Langmack. Des Weiteren danke ich all meinen über die Jahre an dieser Arbeit beteiligten studentischen Hilfskräften, ausdrücklich Frau Johanna Tell und den Herren Andreas Kesler, Amir Ghodratabaki, Mohamed Khalil Ben Khalifa sowie den derzeitigen wissenschaftlichen Mitarbeitern Frau Cora-Sophia Wolf und Herrn Sami Yabroudi.

In Liebe widme ich diese Arbeit meiner Frau Johanna-Elisabeth – *für deine uneingeschränkte Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und weit darüber hinaus danke ich dir von Herzen.*

Berlin, im Juli 2016

Tassilo-Maria Schimmelpfennig

Inhaltsverzeichnis

0	Kurz- und Formelzeichen.....	III
1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse	3
2.1	Physikalische Grundlagen der Funkenerosion.....	3
2.1.1	Zeitlicher Ablauf einer einzelnen Funkenentladung	3
2.1.2	Generatortypen	6
2.1.3	Prozesskenngößen	9
2.2	Mikrofunkenerosion	11
2.2.1	Verfahrensvarianten.....	11
2.2.2	Elektrodenwerkstoffe.....	13
2.2.3	Dielektrika	14
2.2.4	Spülmechanismen.....	16
2.3	Trockenfunkenerosion	18
2.4	Hochleistungskeramiken	20
2.4.1	Eigenschaften	20
2.4.2	Funkenerosive Bearbeitung	22
2.5	Fazit und Bewertung des Kenntnisstands.....	24
3	Ziele und Vorgehen	26
4	Randbedingungen für das trockenfunkenerosive Feinbohren	28
4.1	Maschinentechnik.....	28
4.1.1	Versuchsanlage	28
4.1.2	Modifikation der Versuchsanlage	29
4.2	Werkstück- und Elektrodenwerkstoffe, Dielektrika	30
4.2.1	Werkstückwerkstoff	30
4.2.2	Elektrodenwerkstoff.....	34
4.2.3	Dielektrika für die Trockenfunkenerosion	34
5	Einzelentladungen	38
5.1	Vorgehensweise.....	38
5.2	Einfluss der Prozessstellgrößen auf die Kraterausbildung	40
6	Einfluss von Prozessstellgrößen auf die Prozesskenngößen und das Arbeitsergebnis	50
6.1	Effektanalyse der Prozessstellgrößen.....	50
6.1.1	Voruntersuchungen.....	50
6.1.2	Versuchsvorbereitung	52
6.1.3	Bohrungsqualität und Prozessverhalten	54
6.2	Elektrische Prozessstellgrößen.....	60
6.2.1	Einschaltdauer	62
6.2.2	Ausschaltdauer	63
6.2.3	Spüldruck.....	65
6.2.4	Leerlaufspannung	67
6.2.5	Ladestrom.....	69
6.3	Regelungsspezifische Prozessstellgrößen	71
6.3.1	Servoverstärkung des Antriebs	72
6.3.2	Spaltweitenkomprimierung.....	74

6.4	Festlegung Parameterkombination	76
7	Ausprägung der Abtragpartikel	78
7.1	Vorgehensweise	78
7.2	Werkstückwerkstoff $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$	78
7.3	Werkstückwerkstoff TiB_2	80
7.4	Werkstoffspezifische Abtragmechanismen	82
8	Einfluss prozessfördernder Gase auf die Prozesskenngrößen und das Arbeitsergebnis	84
8.1	Einfluss von Argon.....	84
8.2	Einfluss von Helium	89
8.3	Einfluss von Sauerstoff	95
8.4	Einfluss von Stickstoff.....	102
9	Optimierte Prozesstechnologien	109
9.1	Prozesstechnologie für Argon.....	109
9.2	Prozesstechnologie für Helium	112
9.3	Prozesstechnologie für Sauerstoff	115
9.4	Prozesstechnologie für Stickstoff.....	120
9.5	Prozesstechnologie für deionisiertes Wasser	124
10	Zusammenfassung	128
11	Literaturverzeichnis	134

0 Kurz- und Formelzeichen

Abkürzungen	Bezeichnung
Compression	Spaltweitenkomprimierung
EDM	Electrical-Discharge-Machining
Gain	Servoverstärkung des Antriebsystems
HV	Härte nach Vickers
Sialon	Siliziumnitrid-Aluminiumoxid-Mischkristall
WIG	Wolframinertgas

Chemische Formelzeichen

AlN	Aluminiumnitrid
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
BaO	Bariumoxid
BN	Bornitrid
Fe ₂ O ₃	Eisenoxid
K ₂ O	Kaliumoxid
La ₂ O ₃	Lanthanoxid
MgO	Manganoxid
MoSi ₂	Molybdändisilizid
Si ₃ N ₄	Siliziumnitrid
SiC	Siliziumcarbid
SiCw	Siliziumcarbid-Nadelkristall (Whisker)
SiSiC	Siliziuminfiltriertes Siliziumcarbid
SiO ₂	Siliziumoxid
TaC	Tantalcarbid
TiB ₂	Titanborid
TiC	Titancarbid
TiCN	Titancarbonitrid
TiN	Titannitrid
TiO ₂	Titanoxid
Ti ₃ SiC ₂	Titan-Siliziumcarbid
V ₂ O ₃	Vanadiumoxid
WC	Wolframcarbid

Y₂O₃ Yttriumoxid
 ZrO₂ Zirkoniumoxid

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a _{el}	µm	Elektrodenzustellung
b _{st}	µm	Strukturbreite
C _e	F	Kondensatorkapazität
C _m	J ² /m ⁴ s	Erosionswiderstandsindex
c _p	J/kgK	Spezifische Wärmekapazität
C _{stör}	F	Störkapazität
d _{BA}	µm	Bohrungsdurchmesser am Austritt
d _{BE}	µm	Bohrungsdurchmesser am Eintritt
d _{Bo}	µm	oberer Bohrungsdurchmesser
d _{Bu}	µm	unterer Bohrungsdurchmesser
d _{el}	µm	Elektroden Durchmesser
d _{eli}	µm	Elektrodeninnendurchmesser
d _{Kr}	µm	Durchmesser der Einzelentladungskrater
d _p	µm	Durchmesser Abtragpartikel
d _K	µm	Durchmesser Entladekrater
d _v	µm	Äquivalenter Korndurchmesser
E	GPa	Elastizitätsmodul
E _{An}	keV	Anregungsenergie
E _B	eV	Dissoziationsenergie
E _D	kV/mm	Durchschlagfestigkeit
E _{el}	V/m	elektrische Feldstärke
E _I	eV	Ionisierungsenergie
f _e	Hz	Entladefrequenz
f _O	Hz	Oszillationsfrequenz
f _p	Hz	Impulsfrequenz
I	cps	Intensität
i	A	elektrischer Strom
i _L	A	Ladestrom des Kondensators
h	mm	Werkstückstärke

h_s	kJ/kg	Schmelzwärme
h_v	kJ/kg	Verdampfungswärme
\hat{i}	A	Spitzenstrom
i_e	A	Entladestrom
\bar{i}_e	A	mittlere Entladestrom
k	-	Faktorenstufen
l_b	mm	Bohrungslänge
l_k	μm	Kratertiefe
l_R	μm	Risslänge
n	-	Anzahl der Faktoren
m	-	Anzahl der reduzierten Faktoren
p_0	bar	Umgebungsdruck
p_s	bar	Spüldruck
$p_{s\text{max}}$	bar	maximaler Spüldruck
R_a	μm	Arithmetischer Mittenrauwert der Profilordinate
R_e	Ω	Widerstand des Entladekreises
R_l	Ω	Widerstand des Ladekreises
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
L_e	Ωs	Induktivität des Entladekreises
L_l	Ωs	Induktivität des Ladekreises
s	μm	Spaltweite
s_D	-	Standardabweichung
s_L	μm	Funkenspaltweite
s_{Lf}	μm	Frontale Funkenspaltweite
t_0	μs	Pausendauer
t_i	μs	Impulsdauer
t_L	μs	Ladedauer des Kondensators
t_{off}	μs	Ausschaltdauer
t_{on}	μs	Einschaltdauer
t_p	μs	Periodendauer
T	K	Temperatur
T_{PL}	K	Plasmatemperatur
T_s	K	Schmelztemperatur

T_{SC}	K	erweiterte Schmelztemperatur
T_{VC}	K	Verdampfungstemperatur
u	V	Spannung an der Entladestelle
u_d	V	Durchschlagspannung
u_e	V	Entladespannung
\bar{u}_e	V	mittlerer Entladespannung
u_L	V	Ladespannung
u_0	V	Leerlaufspannung des Hauptkreises
u_z	V	Leerlaufspannung des Zündkreises
V_K	μm^3	Volumen Einzelentladungskrater
V_{Ku}	μm^3	unteres Volumen Einzelentladungskrater
V_{Ko}	μm^3	oberes Volumen Einzelentladungskrater
V_W	mm^3/min	Abtragrate
W_e	J	Entladeenergie
α	K^{-1}	Wärmeausdehnungskoeffizient
β_D	MPa	Druckfestigkeit
ΔT	K	Temperaturdifferenz
κ	S/cm	elektrische Leitfähigkeit
λ_W	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Kg/m^3	Dichte
ρ_{el}	Ωcm	spezifischer elektrischer Widerstand
R	N/mm^2	mechanische Festigkeit
τ	-	Tastverhältnis
ν	m^2/s	Viskosität
η	Ns/m^2	dynamische Viskosität
ϑ	%	relativer Elektrodenverschleiß

1 Einleitung

MCKINSEY & COMPANY [MCK14] und der VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU (VDMA) [STA15a] prognostizieren für den deutschen Maschinenbau als zukünftige Schlüsseltechnologien die Automatisierungstechnik, Mikrosystemtechnik und Werkstoffwissenschaft. Dies ist, neben dem wachsenden internationalen Wettbewerb für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau sowie dem kontinuierlichen Streben nach mehr Leistung und Zuverlässigkeit in der Produktion, auf die bevorstehende vierte industrielle Revolution zurückzuführen. Durch die Visionen von Industrie 4.0 werden für den deutschen Maschinen und Anlagenbau bis 2025 eine konstante Steigerung der Produktivität von 30 % und somit eine Bruttowertschöpfung von 23,04 Mrd. € erwartet [BAU14].

Maschinen- und Anlagenhersteller nutzen die Vorteile des Standorts Deutschland und reagieren auf die bevorstehenden Trends durch Produkt- und Prozessinnovationen. Dies beinhaltet den Einsatz neuartiger Hochleistungswerkstoffe mit überlegenen Eigenschaften sowie die Weiterentwicklung von Fertigungsverfahren für deren Bearbeitung. Des Weiteren sind Fertigungsprozesse, welche durch die fortschreitende Automatisierung nicht mehr eingesetzt werden können, den angestrebten Anforderungen anzupassen. Insbesondere sind hiervon Fertigungstechnologien der Mikroproduktionstechnik zur Herstellung hochbeanspruchter und präziser Komponenten für mikrosystemtechnische Anwendungen aufgrund ihres zunehmenden Bedarfs betroffen [BAU14, MCK14].

Die Lasertechnik, welche begründet in ihrem Wirkprinzip mit geringem Aufwand in automatisierte Systeme integriert werden kann, beispielsweise über die Robotertechnik, profitiert als abtragendes Fertigungsverfahren von der industriellen Fortentwicklung. Ferner wurde mit der Lasertechnik eine nahezu konstante Steigerung des weltweiten Umsatzes von 2006 mit 5,9 Mrd. USD. auf 9,8 Mrd. USD. 2015 erzielt [STA15b]. Hingegen ist die Einbindung der Funkenerosion in automatisierte Systeme aufgrund des flüssigen Dielektrikums problematisch. Beispielsweise ist der Einsatz zusätzlicher Reinigungsmodule innerhalb einer automatisierten Prozesskette zum Entfernen von Dielektrikumsrückständen auf dem Werkstück erforderlich. Demnach weist die Funkenerosion gegenüber der Lasertechnik für technologieübergreifende Automatisierungslösungen verfahrensbedingte Defizite auf, welche durch eine Weiterentwicklung des Fertigungsverfahrens zu kompensieren sind.

Die Funkenerosion ist etabliert bei der Herstellung präziser Mikrobohrungen in hochharte Werkstoffe. Dabei werden für industrielle Anwendungen Bohrungsdurchmesser $100 \mu\text{m} \leq d_b \leq 300 \mu\text{m}$ und Aspektverhältnisse ≤ 10 prozesssicher gefertigt. Hauptanwendungen sind die Herstellung von Common-Rail-Einspritzsystemen, die Fertigung von Spinn-düsen für die Textilindustrie, Düsen für Tintenstrahlköpfe und Farbmittel sowie Startlochbohrungen für die Mikrodrahterosion [DIV04, GAR11, KLI08, LAN15, NÖT01, PIL07].

Ein wesentlicher Vorteil der Funkenerosion gegenüber der Laserbearbeitung bei der Herstellung von Mikrobohrungen sind die hohen zu realisierenden Aspektverhältnisse ≤ 50 . Dennoch stellt ein steigendes Aspektverhältnis, insbesondere in sprödharten Werkstoffen aufgrund unzureichender Spülbedingungen an der Wirkstelle, eine Herausforderung dar. Folgen des mit Abtragpartikeln kontaminierten Dielektrikums im Arbeitsspalt sind Kurzschlüsse und Fehlentladungen, welche Prozessinstabilitäten sowie Formabweichungen an der Bohrungsgeometrie bewirken. Ansatz zur Verbesserung der Spülbedingungen ist beispielsweise die

vorschubüberlagerte Elektrodenbewegung, diese kommt bereits zum Einsatz für industrielle Anwendungen [KLC07, LAN15, NÖT01, PIL07].

In den vergangenen Jahren wurden vereinzelt Ergebnisse zu Untersuchungen veröffentlicht, welche den Ansatz zur Verbesserung der Spülbedingungen über die Verwendung niederviskoser Arbeitsmedien verfolgen. Dabei kommen als Dielektrikum Gase oder in Gas zerstäubte Flüssigkeiten, die der Wirkstelle mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten zugeführt werden, zum Einsatz. [FUR00, KAO07, KUN97, KUN01, KUN03, KUN04, ROT14, SKR10, TAO08, YU04,].

Neben einem effizienteren Abtransport der Abtragpartikel aus dem Arbeitsspalt, welcher zur Erhöhung der Prozessstabilität sowie zur Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ führt, können Maschinenkomponenten wie das Bearbeitungsbecken eingespart werden. Hierdurch entsteht ein uneingeschränkter Arbeitsraum, der eine funkenerosive Bohrbearbeitung in vorher nicht realisierbaren Positionen zulässt und somit Automatisierungslösungen, beispielsweise in Verbindung mit einem in der Fertigungskette integrierten Roboter, ermöglicht [UHL12].

Zur industriellen Einsetzbarkeit der Trockenfunkenerosion sind aufgrund unzureichender Prozesstechniken Entwicklungsarbeiten erforderlich, welche die Verbesserung dieser Technologie fördern. Der Beitrag der vorliegenden Arbeit ist dabei die Entwicklung und Bereitstellung von Prozesstechniken zum funkenerosiven Feinbohren industriell wichtiger keramischer Werkstoffe. Diese werden zunehmend in Bereichen eingesetzt, in denen hohe Verschleißfestigkeit, Temperatur-, Oxidations- und Wärmewechselbeständigkeit erforderlich sowie die Anwendung metallischer Werkstoffe nicht mehr geeignet bzw. ausreichend sind.

Zur wissenschaftlichen Erarbeitung der Prozesstechniken erfolgt in Kapitel 2 eine Auswertung des derzeitigen Stands der Technik hinsichtlich fertigungs- und werkstoffspezifischer Fragestellungen. Daraus abgeleitet werden im Kapitel 3 das Primärziel der Arbeit definiert und die erforderlichen Teilziele festgelegt. Die Betrachtung von Einzelentladungen in Kapitel 5 bildet die Grundlage zur Erarbeitung eines Verständnisses über den Einfluss der Prozessstellgrößen auf das Arbeitsergebnis, welches in Kapitel 6 durch technologische Untersuchungen vertieft wird. Anschließend erfolgt in Kapitel 7 die Identifikation der Abhängigkeit werkstoffspezifischer Abtragmechanismen von verschiedenen Prozesseinstellgrößen anhand einer Untersuchung der entstehenden Abtragpartikel. Abschließend kommt es in Kapitel 8 und Kapitel 9, mittels der erarbeiteten Erkenntnisse, zur systematischen Entwicklung sowie Optimierung von Prozesstechniken. Hierfür werden das Prozessverhalten unterschiedlicher Gase, zur Evaluierung einer neuartigen Technologie – das trockenfunkenerosive Feinbohren für die Bearbeitung keramischer Werkstoffe, untersucht sowie Parametereinstellungen für die Schrupp- und Schlichtbearbeitung bereitgestellt.

2 Stand der Erkenntnisse

Die Funkenerosion (engl. Electrical Discharge Machining - EDM) ist nach DIN 8590 ein thermisch abtragendes Fertigungsverfahren. Das Abtragen von Werkstoffteilchen erfolgt durch Wärme und resultierende Kräfte, welche durch aufeinander folgende Funkenentladungen zwischen der elektrisch leitfähigen Werkzeug- und Werkstückelektrode entstehen [DIN8590]. Dabei entsteht eine Abformung der Werkzeuggeometrie in das Werkstück. Die Entladungen finden instationär oder quasistationär, zeitlich voneinander getrennt, innerhalb eines Arbeitsspaltens der mit Dielektrikum gespült wird, statt. Hierfür werden Mineral- und Syntheseölprodukte auf der Basis von Kohlenwasserstoffverbindungen, deionisiertes Wasser oder Gase eingesetzt [KUN97, VDI3400].

LAZARENKO UND ZOLOTYCH [LAZ44] beschreiben erstmals die durch die thermische Energie einer elektrischen Entladung auftretenden Abtragvorgänge. Dabei handelt es sich um lokale Aufschmelz-, Verdampfungs- und Ausschleudervorgänge des Werkzeugelektroden- und Werkstückwerkstoffs an den Fußpunkten des entstehenden Entladekanals [KLC02, LAZ44, LAZ47, MAS00, NÖT01, THO02, ZOL55, ZOL71].

Der thermische Einfluss der Funkenentladungen wird charakterisiert durch kugelförmige Abtragpartikel, die teilweise Hohlräume beinhalten. Diese weisen auf Verdampfungsvorgänge hin. Des Weiteren führt die funkenerosive Bearbeitung zu einer Gefügeveränderung sowie zur Bildung von Mikrorissen und Zugeigenspannungen in der Schmelzzone der Werkstückoberfläche [HAB04, KLC07, THO07].

Ein wesentlicher Vorteil der Funkenerosion ist die kontaktfreie Bearbeitung, unabhängig von Härte und Festigkeit des Werkstoffs, welche das Verfahren für die Mikroproduktionstechnik prädestiniert.

2.1 Physikalische Grundlagen der Funkenerosion

2.1.1 Zeitlicher Ablauf einer einzelnen Funkenentladung

Eine Funkenentladung bewirkt einen Werkstoffabtrag in Form von Verdampfungs- und Aufschmelzungsvorgängen sowie das Verdrängen und Herausschleudern von Material in Folge des zusammenbrechenden Entladekanals. Der Ablauf eines Entladungsvorgangs lässt sich, wenn auch nicht unter einer eindeutigen zeitlichen Trennung, in drei Phasen unterteilen:

- Aufbauphase,
- Entladephase und
- Abbruchphase [KLC07, WAS92, SCH93].

Bild 2-1 zeigt den Strom- und Spannungsverlauf einer einzelnen Funkenentladung sowie die Zuordnung der Aufbau-, Entlade- und Abbruchphase.

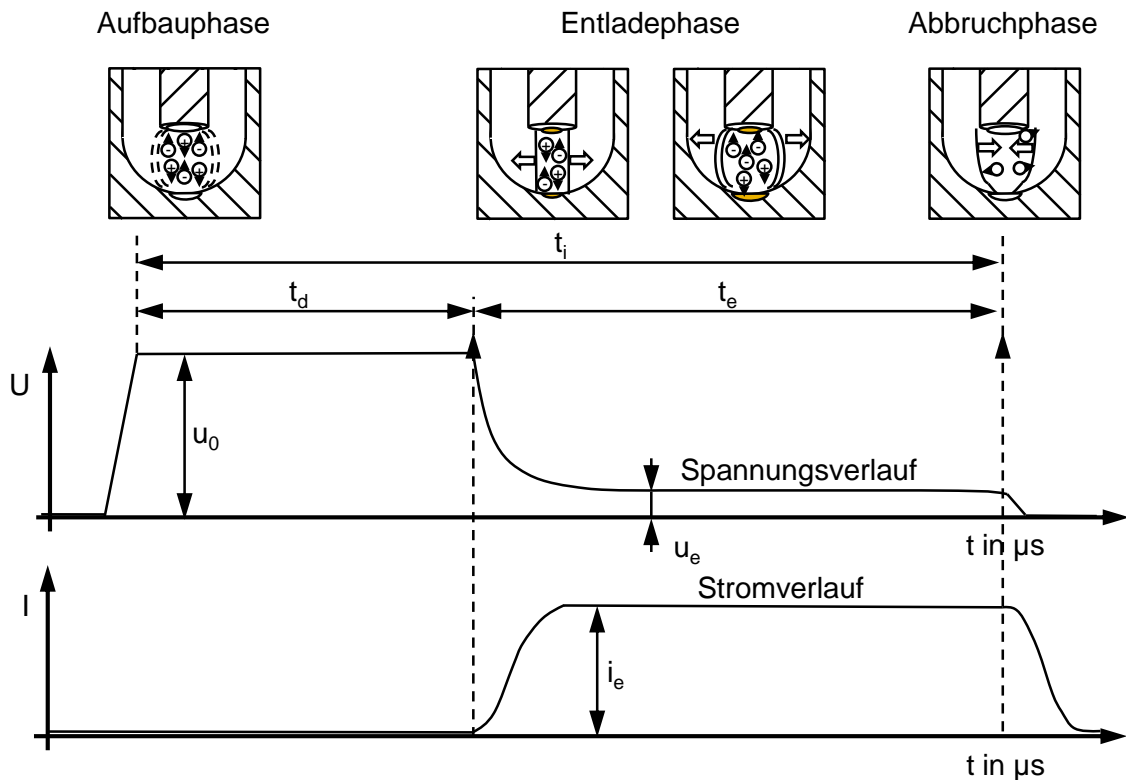


Bild 2-1: Strom- und Spannungsverlauf einer Funkenentladung [KLC07]

Aufbauphase

Zu Beginn der Aufbauphase wird die Leerlaufspannung u_0 , eine elektrische Spannung, zwischen der Werkzeugelektrode und dem Werkstück angelegt. Es folgt die Ionisierung des Arbeitsspalts s_L , zurückzuführen auf *Feld- und Thermoemission*. Die *Feldemission* setzt die Beschleunigung freier Elektronen voraus, die durch kosmische Strahlungen vorhanden sind sowie bei auftretenden Feldstärken $E > 10^9 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ aus der Kathode emittiert werden [HOR73, NÖT01, SCH93, WAS92]. Zusätzlich erfolgt die *Thermoemission*, hervorgerufen durch die hohe Wärmeenergie der Elektronen, diese weisen die erforderliche Austrittsarbeit auf [PIL07]. Die emittierten Elektronen bilden einen Elektronenstrom, welcher ausgehend von der Kathode zur Anode über das elektrische Feld beschleunigt wird. Dieser Effekt wird als *negativer Streamer* bezeichnet. Mit einer geringen zeitlichen Verzögerung folgt der *positive Streamer*, ein aus positiv geladenen Teilchen bestehender Ionenstrom, dessen Bewegungsrichtung entgegen des Elektronenstroms zur Kathode ist [LAN15].

Treffen die durch das elektrische Feld beschleunigten Elektronen auf neutrale Dielektrikumsteilchen, bewirkt die kinetische Energie das Herauslösen eines Elektrons aus der Atomschale. Folglich entsteht eine Ionisation des neutralen Teilchens und dessen Wandlung in ein positives Ion. Dieser Effekt wird als *Stoßionisation* bezeichnet [KÜP90]. Aufgrund der lawinenartigen Entwicklung der Stoßionisation, bei der weitere positive und negative Ladungsträger gebildet werden, kommt es zu einer lokalen Erwärmung des Dielektrikums. Dies führt zu Verdampfungsvorgängen des flüssigen Dielektrikums, wodurch eine lokale Reduzierung der Dichte und somit eine Erhöhung der mittleren freien Weglänge realisiert wird. Demzufolge nehmen die Elektronen eine höhere Energie durch das elektrische Feld auf und es entsteht kurz vor dem Durchbruch ein Gasvolumen, in dem es zur Bildung sowie Ausbreitung

eines Plasmakanals kommt. Der beschriebene Vorgang wird, zurückzuführen auf die lawinenartigen Entwicklung der Stoßionisation, als Elektronenlawinentheorie bezeichnet [FUH85, KAR01, KLC02, SCH93].

Die Ausdehnung der entstehenden Gasblase erfolgt in die Richtung, in der das elektrische Feld eine Abweichung der Homogenität aufweist. Zusätzliche Blasenbildung entsteht durch chemische Reaktionen im Dielektrikum, lokale Erwärmung der Elektrodenoberflächen sowie durch die Elektronenemission. Durch die Ausrichtung der Gasbläschen an den Feldlinien entsteht eine lokale Reduzierung der Durchschlagsfestigkeit E_D . Dieser Effekt wird als *Blasentheorie* bezeichnet [FUH85, PIL07, THO02].

Begünstigt wird die Herabsetzung der Durchschlagsfestigkeit E_D durch die Ausrichtung elektrisch leitfähiger Partikel an den Feldlinien. Des Weiteren erfolgt eine zusätzliche Elektronenemission aus den elektrisch leitfähigen Partikeln, die für den Erosionsprozess fördernd sind. Dieser Effekt wird als *Partikeltheorie* bezeichnet [SCH93, PIL07, THO07].

Keine der genannten Theorien

- Elektronenlawinentheorie,
- Blasentheorie und
- Partikeltheorie

beschreibt die zum Durchschlag führenden Mechanismen in ihrer Gesamtheit. Sie stellen allerdings einen Teil der bisher beobachteten Ereignisse dar, die für die Entstehung des Plasmakanals erforderlich sind.

Entladephase

Die Entladephase beginnt mit dem Abfall der Leerlaufspannung u_0 auf die Entladespannung u_e sowie dem Anstieg des Stroms, Bild 2-1. Dabei bilden anfangs Elektronen, die durch das elektrische Feld in Richtung Anode beschleunigt werden, den Plasmakanal. Dieser weist ein fadenähnliches Erscheinungsbild auf, mit punktuellen Flächen an den Fußpunkten. Der Elektronenstrom bewirkt das Verdampfen des Anodenwerkstoffs, zurückzuführen auf die Umwandlung von kinetischer Energie in Wärme [KLC02, LAN15].

Es folgt eine Ausdehnung des Plasmakanals mit zunehmender Entladedauer und die Aufweitung des Anodenfußpunkts, welche eine Reduzierung der Energiedichte zur Folge hat. Hierdurch wird aufgrund der geringeren Energiedichte weniger Werkstoff verdampft und aufgeschmolzen. Hingegen weist der Kathodenfußpunkt, zurückzuführen auf eine fortdauernde Emission von Elektronen, einen konstanten Radius auf [KLC02]. Die Ausdehnung des Plasmakanals erfolgt, aufgrund des schnellen Anstiegs der Zahl von Ladungsträgern, innerhalb einer Dauer von $t = 5 \text{ ns}$. Dabei wurden für Entladungsströme $i_e = 19,9 \text{ A}$ Plasmatemperaturen in einem Bereich von $3700 \text{ K} \leq T_{PL} \leq 4600 \text{ K}$ gemessen [KLC02, THO02].

Mit fortschreitender Entladedauer t_e steigt der elektrische Strom i auf den Entladestrom i_e an. Dies ist auf den wachsenden Ionenstrom zurückzuführen, der neben der Reduzierung der Stromdichte am Anodenfußpunkt einen erheblichen Anstieg der Stromdichte am Kathodenfußpunkt verursacht. Begünstigt wird dieser Effekt durch den Umgebungsdruck p_0 des flüssigen Dielektrikums, der einer Ausbreitung der Fußpunkte entgegenwirkt und somit zu einer Erhöhung der Energiedichte führt. Dieser Mechanismus wird als *Polarisationseffekt* bezeichnet.

net und beschreibt die zeitliche Umverteilung des Materialabtrags von der Anode zur Kathode [KLC02, LAN15, SCH93].

KLOCKE ET AL. [KLC02] haben in ihren Untersuchungen nachgewiesen, dass der anodenseitigen Abtrag bis zu einer Entladedauer $t_e \leq 25 \mu\text{s}$ überwiegt. Darüber hinaus steigt der Abtrag an der Kathode an.

Die zeitliche Verlagerung des Abtrags wird in der Praxis genutzt, um den funkenerosiven Prozess wirtschaftlich einzusetzen. Es erfolgt eine Anpassung der Elektrodenpolarität in Abhängigkeit von der Entladedauer. Dies erklärt die anodische Werkstückpolung in der Mikrofunkenerosion, bei der Entladedauern t_e weit unterhalb $t_e = 25 \mu\text{s}$ eingesetzt werden.

Während der Entladephase erfolgt die Aufschmelzung und Verdampfung der Werkstoffoberflächen, verursacht durch die entstehende Wärmebildung bei Aufprall der Ladungsträger auf die Elektroden.

Abbruchphase

Die Abbruchphase beginnt mit dem Abschalten des Entladestroms i_e . Aufgrund der Unterbrechung der Energiezufuhr folgt ein Temperaturabfall innerhalb der Gasblase, einher geht dieser mit der Bildung eines Unterdrucks. Die Druckänderung bewirkt das plötzliche Sieden überhitzter Schmelze und das implosionsartige Herausschleudern aufgeschmolzenen Materials. Der Vorgang des Werkstoffabtrags beruht auf

- Verdampfungsvorgängen,
- hydromechanischen Druckkräften,
- elektrostatischen Kräften,
- Eigenspannungen in den Elektrodenwerkstoffen und
- Thermoschockeffekten bei der Bearbeitung von Keramiken [PAN90, PIL07, APP98].

Mit jeder Funkenentladung entsteht eine mikroskopisch kleine kraterförmige Vertiefung auf der Werkstückoberfläche. Das dabei herausgelöste Material weist, aufgrund des thermischen Prozesses sowie der Oberflächenspannung von verflüssigtem und wieder erstarrtem Material, vornehmlich eine kugelförmige Geometrie auf [PIL07]. Die makroskopische Formgebung erfolgt durch die Überlappung vieler dieser Einzelentladungen.

Die nach der Entladung folgende Pausendauer t_0 dient der Deionisierung und zur Dekontamination des Arbeitsspalts von Abtragpartikeln sowie durch verdampften Werkstoff entstandene Gasbläschen. Hierdurch wird gewährleistet, dass das Dielektrikum seine ursprüngliche Durchschlagsfestigkeit E_D erhält und die Folgeentladung an unterschiedlicher Stelle stattfindet [PIL07]. Die Folgeentladung wird mit dem Anlegen der Gleichspannung zwischen der Werkstück- und Werkzeugelektrode eingeleitet.

2.1.2 Generatortypen

Der Generator erzeugt zeitlich getrennte, aufeinanderfolgende Funkenentladungen durch die Bereitstellung elektrischer Energie in Form einer Impulsfolge. Zwei Generatortypen werden in der Praxis eingesetzt, der Speicher- oder Relaxationsgenerator und der statische Impuls-generator. Die Unterscheidung der Generatortypen erfolgt nach

- Spannungserzeugung,
- Steuerung oder Entladung [VDI3400, LAN15].

Die Auswahl des Generatortyps erfolgt nach der jeweiligen Anwendung und dem durchzuführenden Bearbeitungsschritt. Dabei berücksichtigt werden die zu erreichenden Qualitätsmerkmale am Bauteil, die erstrebte Abtragrate und der Elektrodenverschleiß.

Der *statische Impulsgenerator* basiert auf einer geregelten Prozessstrom sowie Gleichspannungsquelle und bildet rechteckförmige Entladestromverläufe. Dies ist auf gesteuerte Schaltelemente zurückzuführen, die die Abfolge und den Energiegehalt einer Funkenentladung durch definierte Pulsformen vorgeben. Hierdurch liegen die Entladungsimpulse mit einer definierten Folge und Dauer am Arbeitsspalt an. Häufig wird parallel zu dem eigentlichen Arbeitsstromkreis, der die Leerlaufspannung u_0 erzeugt, ein weiterer hochohmiger Kreis geschaltet mit einer höheren Spannung u_z , um eine bessere Zündung des Plasmas zu gewährleisten. Bild 2-2 zeigt den Aufbau eines statischen Impulsgenerators.

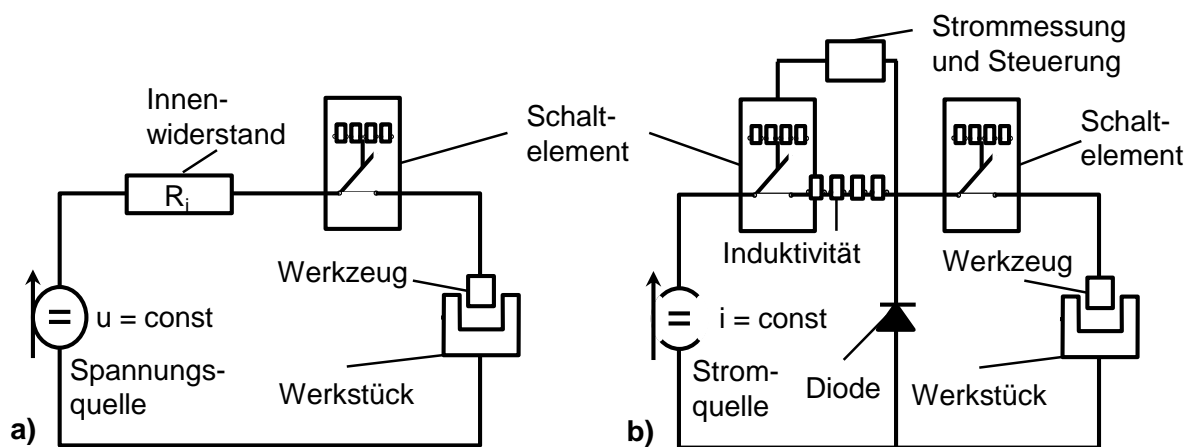


Bild 2-2: Aufbau statischer Impulsgenerator, a) Schaltungsprinzip der Spannungsquelle, b) Schaltprinzip der Stromquelle [KLC07]

Treten Leerlauf- oder Kurzschlussentladungen auf, reagiert der Funkenspannungsregelkreis mittels der Vorschubregelung, um die Spaltweite s_L so anzugleichen, dass möglichst viele erosionswirksame Entladungen stattfinden. Detektiert werden die Entladezustände über einen Abgleich der Entladespannung u_e und einen einstellbaren Sollwert. Die Differenz dieser ist das Steuersignal für das Achssystem, welches mit Zustell- oder Rückzugbewegungen der Werkzelektrode reagiert.

Nach VDI3402 erfolgt die Berechnung der Entladeenergie W_e des statischen Impulses vereinfacht aus den Prozessstellgrößen

- Entladestrom i_e ,
- Entladespannung u_e und
- Entladedauer t_e

nach der Gleichung:

$$W_e = i_e \cdot u_e \cdot t_e \quad (2-1)$$

Minimal erreichbare Entladeenergien W_e statischer Impulsgeneratoren liegen bei $W_e = 5 \mu\text{J}$. Dies ist auf die derzeitig realisierbare Entladedauer $t_e = 0,2 \mu\text{s}$ und den Entladestrom $i_e = 0,8 \text{ A}$ zurückzuführen [PIL07]. Hauptanwendungsgebiet des statischen Impulsgenerators ist daher die verschleißarme Makro-Senkbearbeitung mit großflächigen Werkzeug-

elektroden, die eine ausreichende Wärmeabfuhr gewährleisten. Unter Nutzung des Polarisationseffekts werden durch Verwendung von Impulsdauern $t_i \geq 100 \mu\text{s}$ Senkergeneratoren mit einem minimalen relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta < 0,01 \%$ realisiert [LAN15, PIL07].

Der *Relaxationsgenerator* hingegen basiert auf Kondensatoren und ermöglicht Entladungsfrequenzen im Megahertzbereich bei minimalen Entladedauern $t_e = 30 \text{ ns}$ sowie Entladeströmen $i_e = 0,1 \text{ A}$. Dabei können Entladeenergien bis $W_e \leq 0,1 \mu\text{J}$ realisiert werden [KLI08, LAN15, PIL07].

Die Entladeenergie W_e berechnet sich bei einem Relaxationsgenerator aus den Prozessstellgrößen

- Entladekapazität C_e und
- Leerlaufspannung u_0

nach folgender Gleichung:

$$W_e = \frac{C_e}{2} \cdot u_0^2 \quad (2-2)$$

Der Entladestrom i_e der Funkenentladung ist abhängig von der Kapazität und dem Ladezustand der verwendeten Kondensatoren. Dieser kann aufgrund von Störkapazitäten $C_{\text{stör}}$, beispielsweise verursacht durch die elektrischen Leitungen, Elektrodenhalter und Werkzeugelektrode, verfälscht werden sowie eine Zunahme der Kapazität und somit der Entladeenergie W_e bewirken. Zudem haben ohmsche Lastwiderstände und Leitungsinduktivitäten einen Einfluss auf die Impulsform und -güte einer Relaxationsentladung [LAN15, KUN07]. Bei einer von zusätzlichen Kapazitäten beeinflussten Relaxationsentladung führt das Spannungssignal eine oszillierende Überschwingung des angestrebten Spannungswertes aus. Dieser Effekt wird als Ringing-Effekt bezeichnet und hat aufgrund der Oszillation einen kurzzeitig entgegengesetzt wirkenden Stromfluss zur Folge, der zu einer Beeinflussung des Elektrodenverschleißes sowie der Oberflächengüte führen kann [EKM09, LAN15].

Der Zeitpunkt der Funkenentladung erfolgt bei Relaxationsgeneratoren ungesteuert und ist abhängig von der Durchschlagsfestigkeit E_D des Arbeitsspalts, die beeinflusst wird von der Spaltweite s_L sowie durch Kontamination, verursacht beispielsweise durch Abtragpartikel. Hierdurch kann es zu einer vorzeitigen Entladung des Kondensators kommen, obwohl dieser nicht vollständig aufgeladen ist [KLI08, LAN15, PIL07]. Bild 2-3 zeigt das Schaltungsprinzip eines Relaxationsgenerators sowie den schematischen Spannungs- und Stromverlauf einer Funkenentladung:

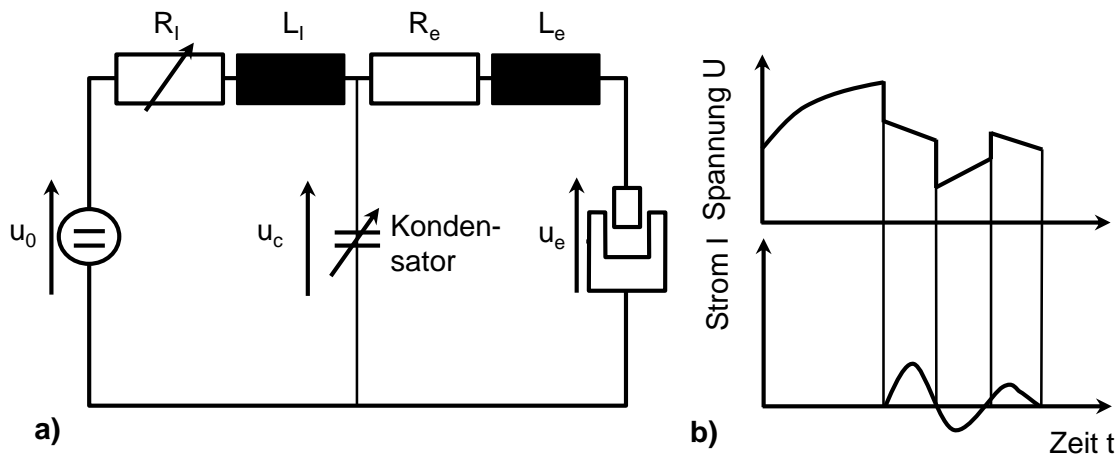


Bild 2-3: Relaxationsgenerator; a) Schaltbild; b) Spannungs- und Stromverlauf [SPU87]

2.1.3 Prozesskenngrößen

Primären Einfluss auf das Erosionsverhalten weisen die energetischen Prozessstellgrößen Leerlaufspannung u_0 , Entladestrom i_e , und -dauer t_e auf, sekundär die Eigenschaften des Dielektrikums sowie die Werkstoffzusammensetzung der Werkzeug- und Werkstückelektroden. Die Entladeenergie W_e bestimmt die Ausprägung der durch eine Einzelentladung entstehenden Entladekrater und somit das Abtragsvolumen sowie die entstehende Oberflächenbeschaffenheit. Definiert wird sie durch den zeitlichen Verlauf der am Arbeitsspalt anliegenden Prozessparametern der Prozessstellgrößen Entladespannung $u_e(t)$ und -strom $i_e(t)$ [LAN15, TSA01, TSA04].

$$W_e = \int_0^{t_e} u_e(t) \cdot i_e(t) \cdot dt \approx \bar{u}_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_e \approx \bar{u}_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_i \quad (2-3)$$

Eine vereinfachte Berechnung ergibt sich aus dem Produkt der mittleren Spannung \bar{u}_e , die in Abhängigkeit von der Werkstoffpaarung zwischen 15 V und 40 V liegt, den durch die Generatorstufe beschränkten mittleren Entladestrom \bar{i}_e sowie der Entladedauer t_e . Die Entladedauer t_e folgt aus der am Generator eingestellten Impulsdauer t_i sowie der von den Bedingungen im Arbeitsspalt abhängigen Zündverzögerungszeit t_d und wird nach Formel (2-4) berechnet [SPU87, PIL07, LAN15].

$$t_e = t_i - t_d \quad (2-4)$$

Des Weiteren sind, wie in Bild 2-1 ersichtlich, die Impuls- t_i , Pausen- t_0 , Periodendauer t_p sowie die Impulsfrequenz f_p voneinander abhängig und werden nach Formel (2-5) sowie Formel (2-6) berechnet [LAN15, TSA01, TSA04].

$$t_p = t_i + t_0 \quad (2-5)$$

$$f_p = \frac{1}{t_p} = \frac{1}{t_i + t_0} \quad (2-6)$$

Das Tastverhältnis τ beschreibt den zeitlichen Nutzungsgrad und kann nach Formel (2-7) berechnet werden [SPU87].

$$\tau = \frac{t_i}{t_p} = t_i \cdot f_p \quad (2-7)$$

Dabei hat die Änderung eines leistungsbezogenen Impulsparameters vornehmlich Einfluss auf die Verschleißrate V_E der Werkzeugelektrode und die Abtragate V_W des Werkstücks. Das Verhältnis dieser Kenngrößen wird als relativer Elektrodenverschleiß ϑ bezeichnet und nach VDI3402 wie folgt definiert:

$$\vartheta = \frac{V_E}{V_W} \quad (2-8)$$

Ermittelt wird der relative Elektrodenverschleiß ϑ in der Makrofunkenerosion über die messtechnische Erfassung der Volumen- oder Massendifferenz der Werkzeug- und Werkstückelektrode vor und nach der Bearbeitung sowie durch Aufzeichnung der Bearbeitungsdauer [KLI08].

In der Mikrofunkenerosion, speziell bei der Feinbohrbearbeitung zur Herstellung von Durchgangsbohrungen, erfolgt die Ermittlung des Bohrungsvolumens V_B durch die Berechnung eines Kegelstumpfs mittels der Formel (2-9) [LAN15, TSA01, TSA04]. Hierfür werden der Eintritts- d_{BE} und Austrittsdurchmesser d_{BA} der Bohrung sowie die Materialstärke h des durchbohrten Werkstücks messtechnisch ermittelt.

$$V_B = \frac{\pi}{12} \cdot b_W \cdot (d_{BE}^2 + d_{BE} \cdot d_{BA} + d_{BA}^2) \quad (2-9)$$

Durch die Messung des Längen-, Kanten- und Eckenverschleißes ist es möglich die Genauigkeit, mit der die Werkzeugelektrode in das Werkstück abgebildet wurde, sowie die Größe des Erodierspalts zu ermitteln. Als Kriterien zur Qualifizierung des Erosionsergebnisses und der Prozessbewertung gelten neben der Oberflächenqualität das Abtrag- und Verschleißverhalten.

Zur Erzielung einer maximalen Abtragate V_W ist die Ausschaltdauer t_{off} so einzustellen, dass eine bestmögliche Deionisierung des Arbeitsspalts erfolgt. Bei statischen Impulsentladungen andauert die Ausschaltdauer t_{off} zwischen den einzelnen Funkenentladungen und entspricht der Pausendauer t_0 , bei Relaxationsentladungen nach einer Folge dieser. Eine unzureichende Ausschaltdauer t_{off} führt, aufgrund der durch die Abtragpartikel verursachten Spaltkontamination, zu Kurzschlussentladungen und einer Herabsetzung der Prozessstabilität. Eine zu lang gewählte Ausschaltdauer t_{off} bewirkt, aufgrund der Unterbrechung zwischen den Entladungsvorgängen, eine Herabsetzung der Entladefrequenz f_e und somit des Energieeintrags in das Werkstück, welches eine Reduzierung der Abtragate V_W zur Folge hat. Dieser Effekt wird durch eine zunehmende Leerlaufspannung u_0 verstärkt, folglich geht die Änderung der Ausschaltdauer t_{off} mit einer Anpassung der Leerlaufspannung u_0 einher [LAN15].

LANGMACK [LAN15] weist mit seinen Untersuchungen nach, dass die prozessstabilisierende Länge der Ausschaltdauer t_{off} abhängig ist von der Elektrodengeometrie bzw. Spaltgeometrie sowie den sich daraus ergebenden Spülbedingungen. Zudem verursacht eine Änderung der Bedingungen im Arbeitsspalt eine Verschiebung der mit einer maximalen Abtragate einhergehenden Ausschaltdauer t_{off} . So liegt beispielsweise für das 1 mm tiefe Feinbohren in das Vollmaterial von hochlegiertem Stahl mittels einer 100 μm dicken Hartmetallelektrode die abtragmaximierende Ausschaltdauer bei $t_{off} = 48,7 \mu\text{s}$. Kommt es zu einer Änderung der

Spülbedingungen, verursacht durch eine Vorbohrung, führt dies zur Verschiebung der abtragmaximalen Ausschaltdauer auf einen Wert von $t_{\text{off}} = 6,5 \mu\text{s}$.

2.2 Mikrofunktenerosion

Die Mikrofunktenerosion (μEDM) gehört zu den in der Mikroproduktionstechnik angesiedelten Fertigungsverfahren, deren Applikationen die Herstellung von Mikrokomponenten und -strukturen mit Geometriemerkmalen unterhalb von $500 \mu\text{m}$ aufweisen. Der prägnanteste Unterschied gegenüber der Makrofunktenerosion ist die negative Werkzeugelektrodenpolung bei der Mikrofunktenerosion [MAS01, UHL05, LIU06]. Durch den Einsatz von Relaxationsgeneratoren werden Entladungskrater mit minimalem Durchmesser $d_{\text{KR}} = 0,43 \mu\text{m}$ und einer maximalen Entladefrequenz $f_e = 10 \text{ MHz}$ in dem Werkstück abgebildet [KLI08, KUN07, PIL07]. Dies ermöglicht die präzise Abbildung der Werkzeugelektrode in das Werkstück bei minimalen Funkenspaltweiten von $1,5 \mu\text{m} \leq s_L \leq 5 \mu\text{m}$ und realisierbaren Oberflächengüten $R_a < 0,1 \mu\text{m}$. Die dabei entstehende Wärmeeinflusszone am Werkstück liegt im Submikrometerbereich [TSA04, YU03].

Durch den Einsatz kurzer hochfrequenter Funkenentladungen entstehen bei der Mikrofunktenerosion Werte für den relativen Elektrodenverschleiß von $\vartheta > 30 \%$, hingegen bei der Makrofunktenerosion von $\vartheta \leq 5 \%$. Um dem entgegen zu wirken werden Elektrodenwerkstoffe oder Kombinationen aus Werkstoffen eingesetzt, die eine hohe Temperaturbeständigkeit aufweisen. Die in der Makrobearbeitung verwendete Mehrschrittbearbeitung mit unterschiedlichen Werkzeugelektroden für die Schrupp- und Schlichtbearbeitung wird, aufgrund hoher Fertigungskosten der Werkzeugelektroden sowie zur Vermeidung von Umspannfehlern beim Elektrodenwechsel, in der Mikrofunktenerosion nicht praktiziert [ASA07, BIG05].

2.2.1 Verfahrensvarianten

Neben dem Abtragprinzip der Funkenerosion, welches eine kontaktfreie Bearbeitung hochfester Werkstoffe ermöglicht, ist diese aufgrund der Variantenvielfalt für die Mikroproduktionstechnik prädestiniert. Die industriell relevantesten Verfahrensvarianten der Mikrofunktenerosion werden nachfolgend näher erläutert.

Mikrofunktenerosives Schneiden

Für das funktenerosive Schneiden wird als Elektrode ein von der Rolle ablaufender Draht eingesetzt und durch Bahnbewegungen relativ zum Werkstück geführt. Durch die kontinuierliche Ablaufbewegung der Werkzeugelektrode im Arbeitsspalt s_L , hat der Elektrodenverschleiß keinen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis, wodurch beim funktenerosiven Schneiden hohe Konturgenauigkeiten von $\pm 1 \mu\text{m}$ am Werkstück erreicht werden können. Die Anwendung von Mehrschnittstrategien ermöglicht Oberflächengüten bis zu $R_a \geq 0,05 \mu\text{m}$ bei minimalen Strukturweiten b_{st} von $20 \mu\text{m} \leq b_{\text{st}} \leq 40 \mu\text{m}$ [GFM15, REE08, UHL01]. Dabei werden durch den Einsatz modernster Generatortechnik thermische Randschichtschädigungen unterhalb eines Mikrometers für die Stahl- und Hartmetallbearbeitung erreicht [KLC07, MEN05, UHL01]. Auch konische Bauteilgeometrien werden basierend auf zweidimensionalen Bahnbewegungen realisieren [SCH93].

Der Durchmesser des eingesetzten Drahtes und der Arbeitsspalt s_L bestimmen die Breite einer Innenkontur. Minimale Durchmesser d_D von Drähten, die kommerziell erhältlich sind, liegen bei $d_D = 10 \mu\text{m}$. Zur Vermeidung eines Drahrisses, verursacht durch den Elektroden-

verschleiß bei der Bearbeitung und die vorliegende Zugbelastung, werden Werkstoffe mit hoher Zugfestigkeit R_m und Schmelztemperatur T_s verwendet. Vorwiegend sind dies beschichtete Stahl-, Wolfram- und Molybdändrähte [KUN05, MAS00, NÖT01].

Hauptanwendungsgebiete des mikrofunkenerosiven Schneidens sind der Formen- und Werkzeugbau, die Uhren- und Schmuckindustrie sowie die Medizintechnik und der Prototypenbau [GFM15, UHL01, LAN15].

Mikrofunkenerosives Senken

Bei der Senkerosion wird eine Formwerkzeugelektrode mit dem Istprofil äquidistant im Werkstück abgebildet [KLC07]. Einschränkungen für die Herstellung von 3D-Formen, Kavitäten und Freiformflächen unterliegen weniger prozessbedingten Aspekten, als den Fertigungskosten und dem Aufwand zur Herstellung der Mikroformelektroden. Als Herstellungsverfahren der aufwendigen Mikroformelektroden werden die Mikrozerspanung, das mikrofunkenerosive Schneiden und die Verfahrensschritte der LIGA-Technik eingesetzt. Demzufolge hängt die erreichbare Formgenauigkeit am Werkstück vorrangig von dem Verfahren zur Herstellung der Formelektrode ab. Anwendungsbereich ist hauptsächlich die Herstellung von Mikrospritzguss- und Prägwerkzeugen, welche für die Serienfertigung mikromechanischer Bauteile verwendet werden [UHL01, UHL05, NEU07].

Mikrobahnerosion

Als Werkzeugelektrode wird bei der Mikrobahnerosion eine zylindrische Stabelektrode, die eine rotierende Bewegung ausübt, eingesetzt. Vergleichbar der Kinematik des mechanischen Stirn-Umfangs-Fräsens erfolgt die Bewegung der Werkzeugelektrode in drei Raumrichtungen. Die Formgebung wird durch wiederholten schichtweisen Materialabtrag mit einer Elektrodenzustellung $a_{el} \geq 0,1 \mu\text{m}$ realisiert. Dies ermöglicht die Herstellung minimaler Strukturbreiten b_{st} bis $b_{st} \geq 20 \mu\text{m}$ bei einem Aspektverhältnis ≤ 10 und Oberflächengüten von $0,2 \mu\text{m} \leq Ra \leq 1 \mu\text{m}$. Durch Abrichtstrategien und Vorrichtungen werden Werkzeugelektroden mit minimalen Durchmessern $d_E \geq 5 \mu\text{m}$ eingesetzt [LIU09a, UHL01]. Die Bahnerosion ist bei der Herstellung kleiner Ecken auf den Radius der Werkzeugelektrode beschränkt, vergleichbar mit dem mechanischen Fräsen. Zusätzlich hat die Spaltweite s_L Einfluss auf die Innenradien gefertigter Bauteile.

Einen erheblichen Vorteil gegenüber dem mikrofunkenerosiven Senken weist die Mikrobahnerosion durch den Einsatz einfacher Stabelektroden auf. 3D-Formen, Kavitäten und Freiformflächen können ohne kosten- und zeitintensive Elektrodenfertigung hergestellt werden. Die Durchsetzung der industriellen Nutzung der Mikrobahnerosion erfolgte bislang in wenigen Anwendungen. Ursachen hierfür sind, neben unzureichenden CAM-Systemen, aufwendige Kompensationsstrategien des Elektrodenverschleißes und lange Bearbeitungsauern [KLI08, PHA04].

Funkenerosives Feinbohren

Beim funkenerosiven Feinbohren werden zylindrische Stabelektroden mit der Stirnseite in das Werkstück gesenkt, um rotationssymmetrische Mikrodurchbrüche und -bohrungen herzustellen. Die eingesetzten Werkzeugelektroden weisen einen Durchmesserbereich von $30 \mu\text{m} \leq d_{el} \leq 300 \mu\text{m}$ auf. Durchmesser von Mikrobohrungen d_B für industrielle Anwendungen liegen bei $100 \mu\text{m} \leq d_B \leq 300 \mu\text{m}$ und einem Aspektverhältnis ≤ 10 [DIV04, KLI08, NÖT01, PIL07].

Für die Herstellung von Einspritzsystemen wie beispielsweise Common-Rail-Einspritzdüsen wird das funkenerosive Feinbohren in der Großserienfertigung eingesetzt. Weitere Anwendungsfelder sind die Fertigung von Spinddüsen für die Textilindustrie, Düsen für Tintenstrahlköpfe und Farbmittel sowie Startlochbohrungen für die Mikrodrahterosion [GAR11, KLI08, PIL07]. Mittels der derzeitigen Maschinenteknik ist es prozesssicher möglich Mikrobohrungen mit Durchmessern von $5 \mu\text{m} \leq d_B \leq 30 \mu\text{m}$ herzustellen [MAS00, NÖT01, PIL07]. Schwierigkeiten bestehen bei den extremen Durchmessern in der Führung der Werkzeugelektrode. Industriell etablierte Methoden sind der Einsatz von präzisen Keramikhülsen oder Prismenführungen, die eine nahezu spielfreie Positionierung der Werkzeugelektrode über dem Werkstück ermöglichen [MAS00, NÖT01, SIE02, PIL07].

Wesentliche Vorteile gegenüber dem mechanischen Bohren bestehen darin, dass gratfreie Bohrungen ohne mechanischen Kontakt, unter spitzen Winkeln und in gekrümmte Oberflächen eingebracht werden können. LANGMACK [LAN15] untersucht u. a. den Kantenverschleiß von Hartmetallelektroden für das funkenerosive Feinbohren. Diese Erkenntnisse nutzt er, um mit drahtfunkenerosiv abgerichteten Hartmetallelektroden präzise Mikrobohrungen, die komplexe Bohrlochformen aufweisen, herzustellen.

2.2.2 Elektrodenwerkstoffe

Ein geeigneter Elektrodenwerkstoff, insbesondere für das funkenerosive Feinbohren, erfüllt folgende Eigenschaften:

- hoher Erosionswiderstandsindex C_m
- hohe mechanische Festigkeit σ
- gute elektrische Leitfähigkeit κ

Der Erosionswiderstandsindex C_m dient zur Bewertung eines Werkstoffs hinsichtlich der Erodierbarkeit und basiert auf der Bestimmung des Materialvolumens, welches durch eine Einzelentladung abgetragen wird. Entscheidend für die Resistenz gegenüber Funkenentladungen sind die Werkstoffeigenschaften Wärmeleitfähigkeit λ_W , Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c_p und insbesondere die Schmelztemperatur T_s , Formel (2-10) [BLE03].

$$C_m = \lambda_W \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_s)^2 \quad (2-10)$$

Da die Schmelztemperatur T_s quadratisch berücksichtigt wird, weist sie den größten Einfluss auf. TSAI ET AL. [TSA04] unterteilt die quadrierte Schmelztemperatur T_s der Formel (2-10) in die Verdampfungstemperatur T_{VC} und die erweiterte Schmelztemperatur T_{SC} , unter Berücksichtigung der Schmelzwärme h_s sowie der Verdampfungswärme h_v .

$$C_m = \lambda_W \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_{SC} \cdot T_{VC} \quad (2-11)$$

$$T_{SC} = T_s + \frac{h_s}{\rho \cdot c_p} \quad (2-12)$$

$$T_{VC} = T_v + \frac{h_s + h_v}{\rho \cdot c_p} \quad (2-13)$$

Zur Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes werden Werkstoffe eingesetzt, die eine hohe Schmelztemperatur T_s bzw. einen hohen Erosionswiderstandsindex C_m aufweisen [TSA04]. Gerade beim funkenerosiven Feinbohren, bei dem lange filigrane Werkzeugelekt-

roden mit geringem Querschnitt eingesetzt werden, kommen Werkstoffe wie Hartmetall oder Wolfram zum Einsatz. Hartmetall hat sich aufgrund der guten mechanischen Stabilität durchgesetzt. Wegen der hohen Steifigkeit von Hartmetallelektroden werden mechanische Kräfte, beispielsweise verursacht durch die Spülung des Arbeitsspalts oder eine gezielte Elektrodenbewegung, aufgenommen. Dies reduziert radial auftretende Elektrodenschwingungen, die zur Verschlechterung der Formgenauigkeit sowie zur Erhöhung des Elektrodenverschleißes führen können [PIL07, UHL03].

Des Weiteren sind für die Maßhaltigkeit der herzustellenden Bohrung sowie für den Verschleiß der Werkzeugelektrode ein geringer Wärmeausdehnungskoeffizient α_W und eine hohe Wärmeleitfähigkeit λ_W erforderlich. Die elektrische Leitfähigkeit κ des Elektrodenwerkstoffs ist relevant für die zu erreichende Abtragrata V_W , da sie Einfluss auf die Emission und Leitung der Ladungsträger hat und somit den Energieumsatz auf das Werkstück beeinflusst [PIL07].

Zur Realisierung einer Elektrodenkonstruktion, die mehrere positive Werkstoffeigenschaften beinhaltet, sind Ansätze durch Werkstoffkombinationen bestehend aus Wolfram-Kupfer und Wolfram-Silber verfolgt worden [KLI08, UHL01]. UHLMANN ET AL. [UHL11] entwickelten, mittels des Einsatzes der Beschichtungstechnik, Wolframelektroden mit Diamantbeschichtung. Durch diese Kombination konnte die hohe Schmelztemperatur T_s von Wolfram mit $T_s \approx 3595 \text{ K}$ und die gute Wärmeleitfähigkeit λ_W einer CVD-Beschichtung mit $500 \text{ W/mK} \leq \lambda_W \leq 600 \text{ W/mK}$ für das funkenerosive Feinbohren genutzt werden.

2.2.3 Dielektrika

Der Erosionsvorgang findet in einem dielektrischen Medium statt, das folgende Aufgaben hat:

- elektrische Isolation von Werkzeugelektrode und Werkstück
- Dekontamination des Arbeitsspalts durch Abtransport entstehender Abtragpartikel und prozessbedingter Rückstände
- Erhöhung der Energiedichte einer Funkenentladung durch Einschnürung des Entladekanals
- Kühlung von Werkzeugelektrode und Werkstück [KAR01, KLI08, LAN15, OEL14, VDI3400]

Die physikalischen Eigenschaften des Dielektrikums haben erheblichen Einfluss auf den funkenerosiven Prozess und auf das Bearbeitungsergebnis. Eine hohe Viskosität ν des Dielektrikums bewirkt den Anstieg des Plasmadrucks durch die Einschnürung des Entladekanals und folglich die Erhöhung der Energiedichte der einzelnen Entladungen. Dies führt zu einer stärkeren Vertiefung der Entladekrater und demzufolge zu einer Zunahme der Abtragrata V_W und des arithmetischen Mittenrauheitswertes R_a am Werkstück [KAR01, KLI08, LAN15, OEL14].

Ebenso hat die dynamische Viskosität η des Dielektrikums Einfluss auf die Spülung der Wirkstelle. Je dünnflüssiger das Arbeitsmedium ist, desto bessere Spülbedingungen können aufgrund der geringen Oberflächenspannung im Arbeitsspalt realisiert werden. Eine bessere Dekontamination des Arbeitsspalts durch den Abtransport von Abtragpartikeln, prozessbedingten Rückständen und Wärme führt zur Erhöhung der Prozessstabilität sowie zur Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ . Insbesondere in der Mikrofunkenerosion, bei

der geringe Funkenspaltweiten s_L und erhöhter Elektrodenverschleiß auftreten, werden niedrigviskose Mineralöle auf Kohlenwasserstoffbasis oder deionisiertes Wasser eingesetzt [WON95, KAR01, KLI08, LAN15, OEL14].

Der Kohlenstoffanteil in den Mineralölen kann bei der Bearbeitung von Stählen, durch die Bildung von Eisenkarbiden, zu einer zusätzlichen Beeinflussung der Randschicht führen. Beim Auftreten hoher Temperaturen im Arbeitsspalt, bedingt durch den Erosionsprozess, findet eine Zersetzung des Mineralöls u. a. in Kohlenstoff statt, was zu einer erhöhten Partikelkonzentration führt. Ferner treten vermehrt Fehl- und Kurzschlussentladungen auf, die eine Steigerung des Verschleißes der Werkzeugelektroden zur Folge haben. Dieser Effekt tritt bei unzureichenden Spülbedingungen auf, insbesondere bei der Fertigung von Mikrobohrungen oder Kavitäten mit hohem Aspektverhältnis [MAS89, YU02, YU03].

Durch die Verwendung von deionisiertem Wasser sind höhere Abtragraten V_W als bei Öl erzielbar. Dies ist auf stärkere Prozesskräfte, die zum Entfernen der Abtragspartikel beitragen, zurückzuführen. Des Weiteren hat die höhere Wärmeleitfähigkeit und -speicherung von Wasser einen positiven Einfluss auf den Erosionsprozess. Zusätzlich führt die Verdampfung des Wassers zu einer starken Kühlung von Werkzeug- und Werkstückelektrode. Aufgrund der guten Kühlwirkung können energetisch höhere Entladungen bei filigranen Elektrodenkonturen eingesetzt werden [KAR01, LAN15].

Wesentliche Nachteile von deionisiertem Wasser gegenüber Öl sind auftretende Oxidationserscheinungen am Werkstück und eine geringere zu erzielende Konturgenauigkeit in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit κ sowie eine schlechtere Oberflächengüte. Gründe hierfür sind die instabile elektrische Leitfähigkeit κ von deionisiertem Wasser sowie auftretende elektrochemische Reaktionen. Dieser Effekt und die Vergrößerung der Funkenspaltweite s_L nehmen mit steigender Kontamination und der daraus erhöhten elektrischen Leitfähigkeit κ des Dielektrikums zu [ABB07, KAR01, KUN05, KLI08, LAN15].

Neben der Verwendung flüssiger Dielektrika wurden in den letzten Jahren Untersuchungen zum Einsatz gasförmiger Medien vorgenommen. Als Halb-Trockenerosion oder auch als near-dry-EDM, wird der Einsatz einer mit Gas oder Luft zerstäubten dielektrischen Flüssigkeit bezeichnet, welche der Prozessstelle zugeführt wird [KAO07, TAO08].

KAO ET AL. [KAO07] hatten bei der Herstellung von Bohrungen mittels Halb-Trockenbearbeitung, aufgrund der guten Spül- und Kühlbedingungen, bessere Ergebnisse in der Formgenauigkeit als unter der Verwendung flüssiger Arbeitsmedien erreicht. Des Weiteren untersuchten sie durch Variation der Pausendauer t_0 abtragoptimale Einstellparameter für das Drahtscheiden. Die maximal erreichte Abtragraten V_W bei der Halb-Trockenbearbeitung lag mit $V_W = 2,53 \text{ mm}^3/\text{min}$ deutlich unter der von deionisiertem Wasser mit $V_W = 21,9 \text{ mm}^3/\text{min}$.

TAO ET AL. [TAO08] stellten in ihren Untersuchungen fest, dass das verwendete Mischdielektrikum keinen Einfluss auf den arithmetischen Mittenrauwert der Profilordinate R_a aufweist. Hingegen hat die Zusammensetzung des Dielektrikums Einfluss auf die maximal zu erreichende Abtragraten V_W . Mit einem Kerosin-Luft-Gemisch wurde gegenüber einem Kerosin-Stickstoff-, Wasser-Luft- und Wasser-Stickstoff-Gemisch die höchste Abtragraten V_W erreicht.

Die Trockenfunkenerosion stellt eine weitere Form zum Einsatz niederviskoser Dielektrika dar, bei der keine Flüssigkeiten, auch nicht im gasförmigen Zustand, sondern reine Gase

verwendet werden. Aufgrund der hohen Relevanz der für diese Dissertation durchgeführten Untersuchungen wird die Trockenfunkenerosion separat im Kapitel 2.3 vorgestellt.

Jüngste Untersuchungen zeigen, dass selbst beim konventionellen funkenerosiven Feinbohren, unter Verwendung von deionisiertem Wasser als Dielektrikum, die Halb- und Trockenfunkenerosion stattfinden. Dies ist auf ein impulsartiges Verdampfen des Dielektrikums zurückzuführen, welches die Ausdehnung und ein ausschwingendes Zusammenfallen einer Gasblase zur Folge hat [LAN15, SCH04]. KLOCKE ET AL. [KLC10, KLC11] und SCHULZE ET AL. [SCH02, SCH04] stellten bei der Beobachtung des Erosionsprozesses mittels Hochgeschwindigkeitskamera ein Verweilen der Gasblasen über die Entladedauer t_e der Funkenentladungen hinaus fest.

LANGMACK [LAN15] betrachtete die Gasblasenbildung für das funkenerosive Feinbohren von Einzel- und Folgeentladungen mittels Hochgeschwindigkeitskamera. Dabei stellte er Veränderungen des Dielektrikums in Abhängigkeit von dem Bohrungsbereich fest. Im oberen bis mittleren Bereich der Bohrung finden die Funkenentladungen in einem Gasblasen-Wassergemisch, am Bohrungsgrund in Gas statt.

Diesen Beobachtungen zufolge liegen beim konventionellen funkenerosiven Feinbohren sowohl die Halb-Trocken- als auch die Trockenfunkenerosion vor. Daraus resultierend kann der primäre Anteil der Funkenentladungen, aufgrund der axialen Vorschubbewegung und Regelung der Werkzeugelektrode, unter Bedingungen der Trockenfunkenerosion stattfinden.

2.2.4 Spülmechanismen

Zur Realisierung eines stabilen Erosionsprozesses sind konstante Spülbedingungen im Arbeitsspalt erforderlich. Insbesondere beim funkenerosiven Feinbohren liegt eine erschwerte Spülung des Arbeitsspalts aufgrund des angestrebten hohen Aspektverhältnisses l/d und kleiner Funkenspaltweiten s_L vor. Eine Ansammlung von Abtragpartikeln und Gasblasen im Arbeitsspalt führt zu einer lokalen Herabsetzung der Durchschlagsfestigkeit E_D des Dielektrikums, in dessen Folge Kurzschlussentladungen sowie Lichtbogenzustände entstehen. Neben einer Minderung der Prozessstabilität führt eine unzureichende Spülung zur Erhöhung des Elektrodenverschleißes ϑ und zur Reduzierung der Abtragrate V_W . Daraus hervorgehen Formabweichungen in der Sollgeometrie des Bearbeitungsergebnisses und eine aufgrund anhaftender Abtragpartikel reduzierte Oberflächengüte [KAO06, LAN15, WON95, YU02].

In der Makrofunkenerosion sind Spülformen wie die seitliche Spülung und die Zwangsspülung von oben sowie eine wiederholende abhebende Bewegung der Werkzeugelektrode etabliert. Für das funkenerosive Feinbohren werden zusätzlich Spülstrategien angewendet, bei denen das Dielektrikum über eine Hochdruckpumpe der Prozessstelle zugeführt wird oder über eine Relativbewegung zwischen Werkzeugelektrode und Werkstück den Dielektrikumsaustausch erzwingt. Letzteres wird als Bewegungsspülung bezeichnet und führt aufgrund der Elektrodenbewegung zu einer Sog- und Druckwirkung im Arbeitsspalt s [VDI3400, WON95].

Der Einsatz einer Druckspülung durch ein Elektrodenröhrchen bewirkt, gegenüber der Verwendung einer Stabelektrode mit seitlicher Spülung, eine erhebliche Verbesserung der Spülbedingungen im Arbeitsspalt. Zudem erfolgt eine zusätzliche Kühlung der Werkzeugelektrode durch das Hindurchfließen des Dielektrikums. Dies ermöglicht die Beaufschlagung

der Werkzeugelektroden mit hochenergetischen Entladungen, was zu einer weiteren Steigerung der Abtragrate V_w führt [LAN15, NÖT01, OZG05]. Auch das zu realisierende Aspektverhältnis, der relative Elektrodenverschleiß ϑ und die Formgenauigkeit beim Feinbohren werden durch ein gleichmäßiges „Abbrennen“ der Werkzeugelektrode positiv beeinflusst [PHA07]. Die Anzahl an abtragwirksamen Normalentladungen steigt bei der Spülung durch die Werkzeugelektrode mit dem angelegten Spüldruck bis zu einem Maximum. Wird eine Mindestkontamination durch einen zu hohen Dielektrikumsaustausch unterschritten, erfolgt eine Überspülung des Arbeitsspalts, was eine gleichmäßige Funkenbildung unterbindet und zu einem instabilen Prozess führt. Demzufolge ist je nach Werkzeugelektroden- und Werkstückwerkstoff, insbesondere bei der Bearbeitung von Werkstoffen mit geringer Schmelztemperatur T_s , wie Aluminium oder Kupfer, sowie nach erzielter Abtragleistung, eine entsprechende Anpassung des Spüldrucks vorzunehmen [CAO08, LAN15, NÖT01, OZG05, PHA07].

Die Spülung durch Rotation der Werkzeugelektrode wird angewendet zur Unterstützung einer Druckspülung oder wenn diese aufgrund der Elektrodengeometrie nicht realisierbar ist. Dabei werden Spindeln mit Drehzahlen bis $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ eingesetzt, die zu einer Stabilisierung der Werkzeugelektrode und zu einer gleichmäßigen Bohrungsgeometrie führen [KAO06, KUN97, NÖT01, LAN15, UHL01]. Gegenüber einer statischen Werkzeugelektrode beim Feinbohren, bewirkt die Elektrodenrotation eine Strömungsbewegung des Dielektrikums im Arbeitsspalt, wodurch eine Verbesserung der Spülbedingungen und demzufolge eine gesteigerte Abtragrate V_w sowie ein erhöhtes Aspektverhältnis realisiert werden [UHL01]. Die Drehbewegung der Werkzeugelektrode führt zu einem gleichmäßigen jedoch, bedingt durch vermehrt auftretende Entladungen an der Mantelfläche der Werkzeugelektrode, erhöhten Elektrodenverschleiß ϑ . Eine Folge daraus ist die Verjüngung der Werkzeugelektrode mit steigender Bohrtiefe, die zu einem konischen Bohrungsverlauf führen kann [CAO08, LAN15, PIL07, YEO04].

Durch eine Orbitalbewegung der Werkzeugelektrode oder des Werkstücks, erzeugt durch die Maschinenachsen, wird eine Strömungsbewegung des Dielektrikums im Arbeitsspalt realisiert. Diese hat einen vergleichbaren Effekt wie die Elektrodenrotation auf das Abtrag- und Verschleißverhalten sowie auf das Bearbeitungsergebnis [WON95, YU02].

Eine weitere Methode zur Spülung des Arbeitsspalts ist eine der Vorschubbewegung überlagerte Schwingung der Werkzeugelektrode, bzw. des Werkstücks. Die translatorische Bewegung wird dabei mit einer Oszillationsfrequenz f_o von $f_o \geq 50 \text{ Hz}$ bis in den Ultraschallbereich von $f_o \leq 54 \text{ kHz}$ betrieben und verursacht durch Druckschwankungen im Arbeitsspalt einen Dielektrikumaustausch. Folgen sind die Herabsetzung von Fehlentladungen und Kurzschlusszuständen sowie eine höhere Prozessstabilität mit steigender Oszillationsfrequenz f_o [ABB07, GAR11, GHO02, KIM06, LAN15]. Des Weiteren entsteht durch die hochfrequente Elektrodenbewegung Kavitation, wodurch Gasbläschen ausgebildet werden, die den Abtransport der Abtragpartikel fördern. Bei Oszillationsfrequenzen f_o im Ultraschallbereich beschreiben GHOREISHI UND ATKINSON [GHO02] ein auf Kavitation zurückzuführendes Entfernen des aufgeschmolzenen Werkstückwerkstoffs aus den Entladekratern. Dieser Effekt wirkt ebenfalls an der Werkzeugelektrode und führt zum Anstieg des relativen Elektrodenverschleißes ϑ . Vorteile liegen in einem höheren zu erzielenden Aspektverhältnis, einer besseren Oberflächengüte sowie in einer geringen Wärmeeinflusszone [GAR11, GHO01, GHO02].

2.3 Trockenfunkenerosion

Im Gegensatz zum konventionellen funkenerosiven Bearbeitungsprozess, der unter Verwendung eines flüssigen Dielektrikums stattfindet, werden für die Trockenfunkenerosion Gase als Dielektrikum eingesetzt. Die gasförmigen Medien, bestehend aus Luft, Sauerstoff, Stickstoff, Argon oder Helium, werden hierbei dem Prozess mit einer hohen Geschwindigkeit über eine Rohrelektrode zugeführt. Der erzeugte Fluidstrom bewirkt das Entfernen aufgeschmolzener Werkstückpartikel aus dem Arbeitsspalt sowie die Kühlung von Werkzeugelektrode und Werkstück [UHL12]. Bild 2-4 zeigt eine Prinzipdarstellung des trockenfunkenerosiven Bohrprozesses.

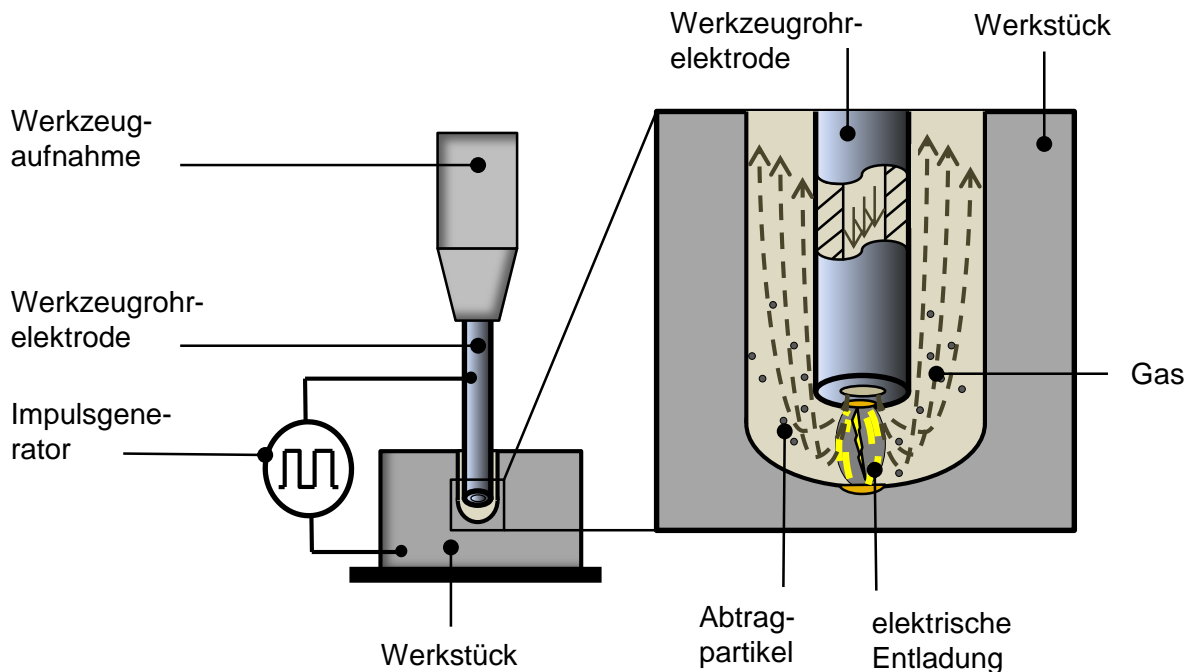


Bild 2-4: Prinzipdarstellung der Trockenfunkenerosion

Nach derzeitigem Stand der Technik wird die funkenerosive Trockenbearbeitung hauptsächlich im Gebiet der Bahnerosion von Nichteisenmetallen, niedriglegierten Stählen, Werkzeugstählen, Titanlegierungen und Hartmetallen angewendet. Hierfür kamen bislang Elektrodenröhrchen aus den Materialien Graphit, Kupfer, Wolfram-Kupfer und Kupfer infiltriertem Graphit mit minimalen Durchmessern von $d_{el} = 2 \text{ mm}$ zum Einsatz. Für die Bearbeitung wurden die Werkzeugelektroden mit Spindeldrehzahlen zwischen $1000 \text{ min}^{-1} < n < 6000 \text{ min}^{-1}$ beaufschlagt. Die maximal verwendeten Spüldrücke sind mit $p_{smax} = 8 \text{ bar}$ angegeben [KUN01, KUN03, KUN04].

Vorteile der trockenfunkenerosiven Bearbeitung liegen in der thermischen Beeinflussung der Randzone. Eigenspannungen am Bauteil und demzufolge Mikrorisse an den Oberflächen werden erheblich reduziert [SOU09, LIQ06]. Des Weiteren ist bei der trockenfunkenerosiven Bearbeitung von Werkzeugstählen die Herstellung spiegelnder Oberflächen, durch eine gleichmäßige Aufschmelzung und Wiedererstarrung des Werkstückoberfläche, realisierbar [TAO07].

Der Einsatz gasförmiger Arbeitsmedien verhindert zudem Elektrolyse- oder Korrosionserscheinungen, wie diese bei der Verwendung von deionisiertem Wasser auftreten können.

Auch werden gefährliche Gase, Schadstoffe oder zu entsorgende Rückstände, welche durch die Nutzung ölhaltiger Dielektrika entstehen, verringert. Die trockenfunkenerosive Bearbeitung stellt demnach einen ökologisch „sauberen“ Prozess dar [FUR00, KAO07, KUN01, KUN03, KUN04, ROT14, SKR10, YU04].

Innerhalb der letzten Jahre wurden unterschiedliche Untersuchungen veröffentlicht, die ambivalente Erkenntnisse und Aussagen über die trockenfunkenerosive Bearbeitung treffen. Diese werden nachfolgend näher beschrieben.

KUNIEDA UND YOSHIDA [KUN97] stellen in ihrer Arbeit erstmals die Durchführung der Funkenerosion ohne flüssiges Dielektrikum vor. Zur Realisierung der Trockenerosion halten sie folgende prozessbedingte Änderungen, gegenüber der konventionellen Bearbeitung unter flüssigem Dielektrikum, als erforderlich zur Bearbeitung von unlegiertem Stahl:

- Negative Polung der Werkzeugelektrode
→ Dies führt zu einer Herabsetzung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ sowie zu einer Steigerung der Abtragleistung V_w .
- Rotierende Werkzeugelektrode
→ Die Elektrodenbewegung hat eine Stabilisierung des Trockenfunkenerosionsprozesses zur Folge, da weniger Kurzschlussentladungen auftreten.
- Sauerstoff als Arbeitsmedium
→ Dies führt gegenüber der Spülung mit Luft, aufgrund der hohen Oxidationswirkung am Werkstückwerkstoff, zu einer Steigerung der Abtragleistung.

YU ET AL. [YU04] untersuchten ebenfalls die Wirkung der Spülung mit Sauerstoff durch die Werkzeugelektrode und bestätigen die von KUNIEDA UND YOSHIDA [KUN97] erarbeiteten Ergebnisse zur Steigerung der Abtragleistung. Des Weiteren betrachteten sie den Bahnerosionsprozess unter Verwendung von Hartmetallelektroden mit Durchmessern $d_{el} = 3$ mm sowie Sauerstoff und Öl als Dielektrikum. Dabei stellten sie fest, dass unter der Verwendung von Sauerstoff wesentlich geringere Pausendauern t_0 erforderlich sind. Unter Sauerstoff kann die Pausendauer t_0 auf $t_0 = 5 \mu s$ reduziert werden, ohne dass es zu Prozessinstabilitäten kommt, hingegen liegt die untere Grenze mit Öl bei $100 \mu s$. Bedingt durch die Reduzierung der Pausendauer t_0 und Oxidation, aufgrund des Einsatzes von Sauerstoffdielektrikum, konnte eine bis zu sechs Mal höhere Abtragleistung V_w als unter Öl erzielt werden. Zudem zeigen die Ergebnisse der Trockenbearbeitung einen wesentlich geringeren relativen Elektrodenverschleiß ϑ . YU ET AL. [YU04] beschreiben diesen Effekt als eine Folge ausbleibender Kavitationskräfte, die beim Verdampfen von Flüssigkeiten entstehen. Die mittels der trockenfunkenerosiven Bahnbearbeitung erzielten Bearbeitungsergebnisse weisen geringere Formabweichungen auf als die Ergebnisse unter Öl.

Gegenteilige Beobachtungen werden von KAO ET AL. [KAO07] berichtet. Der Vergleich der trockenfunkenerosiven Bahn- und Bohrbearbeitung ergibt sehr geringe Abtragraten V_w für gasförmige gegenüber flüssigen Dielektrika. Auch für den relativen Elektrodenverschleiß ϑ und die Formtreue konnten, aufgrund von Ablagerungen durch Abtragpartikel, keine besseren Ergebnisse für die Trockenerosion erzielt werden.

Beim funkenerosiven Schneiden erzielten KAO ET AL. [KAO07] ebenfalls mit flüssigen Dielektrikum eine höhere Abtragleistung V_w . Dies ist auf einen stabileren Prozess zurückzuführen, wodurch technologisch eine Reduzierung der Pausendauer t_0 und somit der Bearbeitungszeit realisiert wurden. KUNIEDA UND FURUDate [KUN01] erreichten keine besseren Ergebnisse

beim Drahtschneiden mit gasförmigen als unter der Verwendung von flüssigem Dielektrikum. Sie begründen das Bearbeitungsergebnis mit einer geringen Prozessstabilität, welche aufgrund einer fehlenden Elektrodenrotation beim Drahtschneiden nicht zu verbessern ist.

Wie aus der über die Trockfunkenerosion publizierten Literatur ersichtlich, können aufgrund der widersprüchlichen Ergebnisse keine eindeutigen Aussagen über Vor- und Nachteile des Verfahrens getroffen werden. Hingegen werden die aus der Verwendung von gasförmigen Dielektrika entstehenden Potentiale, insbesondere für die mikrofunkenerosive Bearbeitung von Präzisionskomponenten, ersichtlich. Im Einzelnen sind dies:

- die Unabhängigkeit vom Dielektrikumbecken und somit ein uneingeschränkter Arbeitsraum,
- die funkenerosive Bearbeitung in vorher nicht realisierbaren Positionen [UHL12],
- keine entflammbare und gesundheitsschädliche Gasbildung während, sowie die Reinigung des Werkstücks nach der Bearbeitung durch die Verwendung von Kohlenwasserstoff basiertem Dielektrikum,
- keine Korrosions- oder Elektrolyseerscheinungen am Werkstück [KUN03],
- geringe thermische Beeinflussung und Schädigung der Werkstückoberfläche [SOU09, LIQ06],
- die Realisierung spiegelnder Oberflächen [TAO07].

Um eine Bewertung zur Einsetzbarkeit der trockenfunkenerosiven Bearbeitung zu ermöglichen, sind weitere grundlegende Forschungsarbeiten erforderlich, welche maschinentechnische, technologische und ökonomische Fragestellungen beantworten.

2.4 Hochleistungskeramiken

2.4.1 Eigenschaften

Unter dem Begriff Keramik wird eine Vielzahl von Rohstoffen subsumiert mit sich daraus ergebenden Produkten. Als Minimaldefinition gilt, dass Keramiken anorganische nichtmetallische Werkstoffe sind, welche durch Sintervorgänge hergestellt werden [VER03]. Im Zusammenhang der vorliegenden Dissertation werden ausschließlich Hochleistungskeramiken betrachtet. DIN V ENV 12212 definiert Hochleistungskeramik als „hoch entwickelter, hoch leistungsfähiger Werkstoff, der überwiegend nichtmetallisch und anorganisch ist und über bestimmte zweckmäßige Eigenschaften verfügt“ [DIN12212].

DIN V ENV 12212 teilt die Hochleistungskeramiken in Oxid-, Nichtoxid- und Mischkeramiken ein, Tabelle 2-1. Des Weiteren sind Silikate, zu denen Porzellan und Steatit gehören, Hochleistungskeramiken, die beispielsweise als Isolatoren in der Elektroinstallationstechnik eingesetzt werden. Aufgrund ihrer geringen Wärmefestigkeit ist der Einsatz von Silikaten im Maschinenbau beschränkt [PAN90].

Tabelle 2-1: Einteilung von Hochleistungskeramiken [MEH09]

Bezeichnung	chemische Bestandteile	Zuordnung	Anwendung
Silikatkeramik	SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , BaO , K_2O	Silikate und Tonkeramik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Isolatoren ▪ Chemieanlagen ▪ Hochtemperaturwerkstoffe
Oxidkeramik	Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , ZrO_2 , MgO , La_2O_3 , V_2O_5	Oxide, außer SiO_2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hochtemperaturwerkstoff ▪ Ferroelektrika ▪ Ferromagnetika ▪ Implantate ▪ optoelektrische Wandler ▪ Katalysatoren
Nichtoxidkeramik	SiC , TiC , TaC , Si_3N_4 , AlN , BN , TiN , MoSi_2 , TiB_2	Karbide Nitride Boride Silizide	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verschleißmaterial ▪ feuerfeste Keramik ▪ Heizleiter ▪ optoelektrische Bauelemente ▪ Substrate ▪ Schutzrohre ▪ Tiegel ▪ spezielle Beschichtungen
Verbundkeramik	Al_2O_3 -Partikel in Glas, C-Fasern in SiC -Matrix, ZrO_2 -Partikel in Ti und Si_3N_4 -TiN		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schleifscheiben ▪ bruchtolerante Faserverbunde ▪ Hochtemperaturverbundwerkstoffe

Synthetisch hergestellte Oxidkeramiken bestehen zu 90 % aus einphasigen, einkomponentigen Metalloxiden ohne Glasphasen. Aufgrund hoher Sintertemperaturen, welche bei der Herstellung zu einem gleichmäßigen Mikrogefüge führen, weisen Oxidkeramiken eine hohe Bruch-, Verschleiß- sowie Temperaturfestigkeit auf und sind korrosionsbeständig [VER03].

Oxidkeramiken, insbesondere Aluminiumoxid, werden aufgrund ihrer Materialeigenschaften vielseitig eingesetzt. Folgend sind einige Beispiele aufgeführt:

- verschleißfester Werkstoff im Anlagen- und Maschinenbau
- Schneidstoff von Zerspanwerkzeugen
- korrosionsbeständige Komponenten in der Lebensmittel- und Chemieindustrie
- Isolatoren in der Elektronikindustrie
- Hochtemperaturkomponenten in der Wärmeindustrie und Energietechnik

Entscheidend für den Einsatz der Oxidkeramiken sind deren Verunreinigung, Korngröße und Restporosität, da diese Faktoren Einfluss auf die mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften des Werkstoffs haben [TEL07].

Nichtoxidkeramiken weisen Verbindungen mit Kohlenstoff (Carbide), Bor (Boride), Stickstoff (Nitride) und Silizium (Silicide) auf und haben aufgrund kovalenter Bindungen eine hohe

Temperaturfestigkeit. Ferner sind sie gekennzeichnet durch hohe Elastizitätsmoduln, Festigkeit, Härte sowie sehr gute Korrosions- und Verschleißbeständigkeit [VER03].

Das Anwendungsfeld der Nichtoxidkeramiken ist ebenfalls sehr umfangreich, da diese aufgrund ihrer spezifischen Werkstoffeigenschaften sehr widerstandsfähig bei extremen Bedingungen sind. Beispielsweise ist Titanborid (TiB_2) ein Werkstoff, der für die Kerntechnik als hitzebeständiger Neutronenmoderator entwickelt wurde. Aufgrund seiner hohen thermischen und elektrischen Leitfähigkeit wird TiB_2 als Elektrodenmaterial für die Aluminiumschmelzflusselektrolyse eingesetzt [TEL07].

2.4.2 Funkenerosive Bearbeitung

Voraussetzung für die funkenerosive Bearbeitung von Hochleistungskeramiken ist eine elektrische Leitfähigkeit κ von $\kappa \geq 0,01 \text{ Scm}^{-1}$ [PET88].

Entscheidend für die elektrische Leitfähigkeit sind freie Ladungsträger im Gitter des Werkstoffs. Zur Realisierung der elektrischen Leitfähigkeit einer isolierenden Keramik erfolgt die Dotierung mit einer leitfähigen Phase. Hierfür werden Keramiken wie Titannitrid TiN, Titan-carbid TiC, Siliciumcarbid SiC oder TiB_2 eingesetzt, um Mischwerkstoffe zu erhalten [FAU93, MIN97]. Beispielsweise ist Si_3N_4 mit einem spezifischen Widerstand $\rho_{\text{el}} \geq 10^6 \text{ } \Omega\text{cm}$ nicht erodierfähig. Hingegen wird durch die Bildung eines Mischwerkstoffs, realisiert durch eine TiN-Dotierung, der elektrische Widerstand ρ_{el} auf $\rho_{\text{el}} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ reduziert und die funkenerosive Bearbeitung ermöglicht [FAU93].

Gegenüber Metallen, bei denen Zusammenhänge zwischen den elektrischen und thermischen Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von den erzielbaren Abtragraten V_W sowie des arithmetischen Mittenrauwerths der Profilordinate R_a bestehen, sind bei Keramiken keine linearen Zusammenhänge ersichtlich. Dies ist auf die unterschiedlichen Abtragmechanismen der funkenerosiven Bearbeitung von Keramiken zurückzuführen [PAN90].

In den vergangenen Jahren ist eine Vielzahl von Veröffentlichungen entstanden, welche die funkenerosive Bearbeitung unterschiedlicher Werkstoffkombinationen untersuchten. Nachfolgend werden relevante wissenschaftliche Arbeiten aufgeführt, die insbesondere Untersuchungen zu Abtragmechanismen beinhalten:

GADALLA und PETROFES [GAD88, PET88] führten systematische technologische Untersuchungen mit elektrisch leitfähigen Keramiken durch. Sie beobachteten, dass der Werkstoffabtrag bei Keramiken mit hohem Schmelzpunkt nicht auf Aufschmelz- und Verdampfungsvorgängen basiert, sondern das ganze Keramik Korn herausgelöst wird (eng.: „Spalling“). PANTEN [PAN90] untersuchte Zusammenhänge zwischen Werkstoffeigenschaften und Abtragverhalten. Dabei stellte er vier unterschiedliche Abtragmechanismen für keramische Werkstoffe fest:

- Aufschmelz und Ausschleudervorgänge,
- Werkstoffabtrag durch Thermoschock,
- Abplatzen durch wiedererstarteten Werkstoff und
- Herauslösen von Keramikkörnern durch das Aufschmelzen der elektrisch leitenden Phase.

LAUWERS ET AL. [LAU04] untersuchten Mischwerkstoffe mit verschiedenen keramischen Bestandteilen (Aluminiumoxid-Siliziumcarbid-Nadelkristalle $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w$, Siliziumnitrid Si_3N_4 so-

wie Zirconiumdioxid ZrO_2) und Titanitrid TiN als elektrisch leitfähige Phase und stellten neben Aufschmelzvorgängen die Oxidation und Dekomposition des Werkstoffs fest.

TRUEMAN UND HUDDLESTON [TRU00] untersuchten Mischwerkstoffe aus Siliziumcarbid und Titandiborid SiC-TiB₂ bzw. Aluminiumoxid-Siliziumnitrid-Mischkristall und Titanitrid (Sialon-TiN) und registrierten Rissbildungen unter der Oberfläche. HU ET AL. [HU08] identifizierten den Werkstoffabtrag bei Titan-Siliziumcarbid Ti₃SiC₂ als Schmelz- und Oxidationsvorgänge. PATEL ET AL. [PAT09] stellten bei der funkenerosiven Bearbeitung von Al₂O₃-SiCw-TiC verschiedene Abtragmechanismen in Abhängigkeit von den Prozessstellgrößen fest. KHANRA ET AL. [KHA07] untersuchten die entstehenden Partikel bei der Erosion von Stahl mit einer Werkzeugelektrode aus Zirconiumdiborid und Kupfer ZrB₂-Cu und leiteten aus der Form der Partikel Schmelz- und Oxidationsvorgänge ab.

GADALLA ET AL. [GAD91b] betrachteten den Prozess des thermischen Spallings bei TiB₂ und konnten damit die Größe der Abtragpartikel erfolgreich vorhersagen. LAUWERS ET AL. [LAU06, LAU08] und MALEK ET AL. [MAL10] analysierten verschiedene auf Wolframcarbid basierende ZrO₂-Mischkeramiken. MALEK ET AL. [MAL11] untersuchten den Einfluss des TiB₂-Anteils auf die Bearbeitungskennwerte einer Mischkeramik aus Borcarbid und Titandiborid B₄C-TiB₂. GADALLA UND TSAI [GAD89a, GAD89b] beschäftigten sich mit Mischkeramiken aus Wolframcarbid und Cobalt, GADALLA UND BEDI [GAD91a] mit verschiedenen TiB₂-basierten Werkstoffen. BONNY ET AL. [BON09] untersuchten ZrO₂ Keramiken mit unterschiedlichen Sekundärstoffen wie WC, TiCN und TiN und verglichen deren entstandene Oberflächen beim Funkenerodieren mit der von WC-Co.

Anhand der aufgeführten Veröffentlichungen werden für die funkenerosive Bearbeitung keramischer Werkstoffe unterschiedliche Abtragmechanismen nachgewiesen.

Der am häufigsten beobachtete Abtragmechanismus basiert auf einer durch Verdampfung von Material entstehenden Gasblase und das Ausschleudern von aufgeschmolzenem Werkstoff. Die im Prozess entstehende Wärme verdampft metallische Bestandteile der Hochleistungskeramiken an der Oberfläche. Beim Abkühlen entstehen hohle, nichtkristalline Kugeln, die von dem Dielektrikum aus dem Arbeitsspalt gespült werden. Teilweise treten durch das Abkühlen Mikrorisse in der Werkstückoberfläche auf, insbesondere bei Werkstoffen mit einem hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten [GAD98]. Bei dem als „Melting-Effekt“ bezeichneten Abtragmechanismus treten zwei Arten von Abtragpartikeln auf. Agglomerierte Partikel, die je nach Werkstoffpaarungen einen Durchmesser von $d_p \approx 20 \mu\text{m}$ aufweisen und durch die Verbindung des aufgeschmolzenen Werkzeugelektroden- sowie Werkstückwerkstoffs entstehen. Des Weiteren kommt es durch schichtähnliches Erstarren von Abtragpartikeln an der Werkzeugelektroden- und Werkstückoberfläche und deren anschließendem Abplatzen zu flachen Partikeln mit Durchmessern von $d_p > 50 \mu\text{m}$ [PAR90].

Als Indikatoren für den Abtragmechanismus Melting-Effekt gelten

- Materialtropfen auf Werkzeugelektrode und Werkstück,
- Oberflächenbeschichtungen aus wiedererstartem Werkzeugelektroden- und Werkstückwerkstoff,
- Mikrorisse in der wiedererstarteten Oberflächenbeschichtung sowie
- kugelförmige, agglomerierte und flache Abtragpartikel.

Das Abbröckeln und Herauslösen ganzer Keramikkörner durch thermische Spannungen wird als „Spalling-Effekt“ bezeichnet und konnte bisher nur bei der Bearbeitung von keramischen Werkstoffen beobachtet werden. Dieser Abtragmechanismus entsteht bei Werkstoffen mit hohem Schmelzpunkt T_S und Wärmeausdehnungskoeffizienten α sowie bei geringer Wärmeleitfähigkeit λ_W . Er basiert auf Thermoschock, bei dem Spannungen im Werkstoff auftreten [GAD98]. Temperaturunterschiede führen aufgrund der im Werkstück entstehenden Spannungen zur Bildung horizontaler und folgend vertikaler Risse in der Oberfläche [TRU00]. Durch die Kühlwirkung des Dielektrikums kommt es zu einem sekundären Spalling-Effekt, wodurch zusätzlich sehr kleine Bruchpartikel an der Oberfläche entstehen. Dieser Effekt kann bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 17 \text{ K}$ auftreten [GAD91b]. Zurückzuführen auf die Rissbildung wirkt der Spalling-Effekt tiefer in das Werkstück hinein als der rein thermische Abtrag durch den Melting-Effekt. Dies ermöglicht durch Herausbrechen ganzer Keramikkörner hohe Abtragraten V_W , daraus folgen unregelmäßige Oberflächen [LEE91]. Aufgrund des thermischen Prozesses bei der funkenerosiven Bearbeitung erscheint der Spalling-Effekt nur in Verbindung mit dem Melting-Effekt, wodurch es ebenfalls zum Aufschmelzen des Werkstücks und zur Bildung kugelförmiger Abtragpartikel kommt [GAD98]. Die durch den Spalling-Effekt entstehenden Abtragpartikel weisen bei Partikeldurchmessern $20 \mu\text{m} \leq d_p \leq 200 \mu\text{m}$, glatte Bruchkanten und unregelmäßige Formen auf. Diese entstehen in Form von flachen und kugelförmigen Partikeln, welche hauptsächlich auf den Werkzeugelektrodenwerkstoff zurückzuführen sind [GAD98, TRU00].

Typische Merkmale für den Spalling-Effekt sind

- kantige, unregelmäßige und ein geringer Anteil kugelförmige Abtragpartikel,
- ungleichmäßige Oberflächen mit einem hohen arithmetischen Mittenrauwert der Profilordinate R_a sowie
- hohe Abtragraten V_W .

Weitere Abtragmechanismen, die bisher nur bei der funkenerosiven Bearbeitung von Keramiken beobachtet wurden, sind die Oxidation und Dekomposition der Werkstoffbestandteile. Dabei reagieren Bestandteile der Keramik mit denen des Dielektrikums, beispielsweise mit dem Sauerstoff im Wasser, wodurch Gase freigesetzt werden. Diese tragen zur Prozessstabilität bei, wodurch hohe Abtragraten V_W , insbesondere beim funkenerosiven Schneiden von Si_3N_4 -TiN, erreicht werden. Die dabei entstehenden Oberflächen sind porös und weisen hohe arithmetische Mittenrauwerte der Profilordinaten R_a auf [LAU04, LAU08, LIU08].

Auf die Unterstützung des Werkstoffabtrags durch Oxidation und Dekomposition weisen Merkmale wie

- kurze Bearbeitungszeiten,
- Bläschenbildung während des Prozesses und
- poröse Oberflächen mit hohen arithmetischen Mittenrauwerten der Profilordinaten R_a hin.

2.5 Fazit und Bewertung des Kenntnisstands

Hervorgehend aus dem Stand der Erkenntnisse, liegen für die Mikروفunkenerosion, insbesondere für das funkenerosive Feinbohren, bei welchem hohe Aspektverhältnisse zu erzielen sind, verfahrensinhärente Einschränkungen in unzureichenden Spülbedingungen an der Wirkstelle. Daraus resultierend erfolgen, aufgrund der hohen Kontamination des Arbeitspalts mit Abtragpartikeln und trotz moderner Generatortechnik, Kurzschlüsse sowie Fehlent-

ladungen, welche Prozessinstabilitäten und Formabweichungen an der Bohrungsgeometrie bewirken. Neben der Verbesserung der Spülbedingungen durch vorschubüberlagerte Elektrodenbewegungen, welche bereits für industrielle Anwendungen zum Einsatz kommen, bestehen erste Ansätze für die Verbesserung der Spülbedingungen in der Verwendung niederviskoser Arbeitsmedien bis hin zu Gasen.

Die in den letzten Jahren publizierten Ergebnisse über die Trockenfunkenerosion zeigen eine Vielzahl technologischer Vorzüge gegenüber dem Einsatz von flüssigem Dielektrikum. Neben höheren erzielten Abtragraten, geringerem relativen Elektrodenverschleiß und thermischer Beeinflussung der Randzone, werden das Entfallen von Elektrolyse- oder Korrosionserscheinungen sowie ökologische Aspekte genannt.

Nach dem derzeitigen Stand der Technik erfolgten Untersuchungen zur Trockenfunkenerosion ausschließlich auf dem Gebiet der Makrobearbeitung. Dabei sind überwiegend Einzelversuche zur trockenfunkenerosiven Bahnbearbeitung metallischer Werkstoffe, wie Nichteisenmetalle, niedriglegierte Stähle, Titanlegierungen und Hartmetalle, zum Teil unter Laborbedingungen, durchgeführt worden. Des Weiteren erfolgten die Untersuchungen überwiegend als Machbarkeitsnachweise, wodurch Wirkungszusammenhänge der Trockenerosion unzureichend erforscht und beschrieben sind. Insbesondere die Zusammenhänge zwischen Prozessstellgrößen, Prozessgas und Werkstückwerkstoff – sie bilden die Grundlagen zum Prozessverständnis – wurden bisher nicht analysiert oder publiziert.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen sind auf die oben genannten Werkstoffe beschränkt. Hochleistungswerkstoffe, die aufgrund ihrer industriellen Anwendung und somit aus wirtschaftlichen Aspekten eine permanente Anpassung sowie Intensivierung bestehender Fertigungsverfahren und Technologien fordern, wurden bislang nicht mit der neuartigen Trockenfunkenerosion bearbeitet.

Technische Keramiken werden immer häufiger in Bereichen eingesetzt, in denen hohe Verschleißfestigkeit, Temperatur-, Oxidations- und Wärmewechselbeständigkeit erforderlich sowie die Anwendung metallischer Werkstoffe nicht mehr geeignet bzw. ausreichend sind. Einsatzbeispiele hierfür sind Turbinenschaufeln für die Energietechnik und Luftfahrt, Ziehwerkzeuge für die Umformtechnik, Gasdüsen in der Automobiltechnik, Fadenführer, Schneiden und Spinddüsen für die Textilindustrie sowie Hüft- und Kniegelenkskomponenten für die Medizintechnik. Die hohe Resistenz keramischer Werkstoffe gegenüber Adhäsion begünstigt zunehmend auch den Einsatz als Schneidstoff für die Hochgeschwindigkeitszerspanung metallischer Werkstücke.

Handlungsbedarf besteht in der ergebnisorientierten Nutzung der unterschiedlichen Abtragmechanismen, welche ausschließlich bei der funkenerosiven Bearbeitung von Keramiken beobachtet wurden. Entstehende Abtragmechanismen in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften sind untersucht, jedoch nicht im Zusammenhang einer Verfahrensoptimierung genutzt worden.

Hier bietet das funkenerosive Feinbohren, aufgrund erschwelter Spülbedingungen und steigender industrieller Relevanz, die Möglichkeit, durch den Einsatz prozessfördernder Gase und aufeinander abgestimmter Prozessstellgrößen, die Bearbeitung von keramischen Werkstoffen zu optimieren. Des Weiteren sind keine wissenschaftlichen Abhandlungen über die trockenfunkenerosive Bearbeitung von keramischen Werkstoffen bekannt.

3 Ziele und Vorgehen

Primärziel dieser Arbeit ist die Entwicklung, Analyse sowie die Anwendung einer neuartigen Technologie – das trockenfunkenerosive Feinbohren für die Bearbeitung keramischer Werkstoffe. Dabei werden grundlegende technologische Fragestellungen zum prozesssicheren Einsatz der Trockenerosion am Beispiel spezifischer Keramiken erörtert.

Die gezielte Verwendung gasförmiger Dielektrika soll, aufgrund der geringen dynamischen Viskosität η von Gasen gegenüber Flüssigkeiten, zu verbesserten Spülbedingungen innerhalb des Arbeitsspalts führen. Mit Hinblick auf eine wirtschaftliche und ökologische Optimierung des funkenerosiven Feinbohrprozesses werden die Erhöhung der Abtragraten V_w sowie die Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ realisiert. Anhand der Betrachtung grundlegender Prozesseinflüsse sowie des Abtragverhaltens keramischer Werkstoffe erfolgt die Ableitung von Fertigungstechnologien für das trockenfunkenerosive Feinbohren spezifischer Keramiken. Durch den Einsatz prozessfördernder Gase sowie die Anpassung und Auswertung regelspezifischer Prozessstellgrößen wird eine Optimierung der Fertigungstechnologien realisiert. Die Vorgehensweise dieser Arbeit ist in vier Abschnitte gegliedert, welche aufeinander aufbauen und in der Bereitstellung einer prozesssicheren sowie wirtschaftlichen trockenfunkenerosiven Feinbohrtechnologie münden:

1. Die Basis zur Realisierung des Primärziels bildet die Untersuchung von Einzelentladungen auf unterschiedlichen Werkstückwerkstoffen. Unter Gewährleistung einer prozesssicheren Methodik zur Erzeugung einzelner Relaxationsentladungen mit definierten Kennwerten erfolgt eine Analyse zum Einfluss gasförmiger gegenüber flüssiger Dielektrika für unterschiedliche Werkstückwerkstoffe. Dabei werden die messtechnische Auswertung verschiedener Merkmale der entstehenden Einzelentladekrater und die Erarbeitung von ersten Erkenntnissen über das Abtragverhalten des jeweiligen Werkstückwerkstoffs in Abhängigkeit von den Prozessstellgrößen durchgeführt.
2. Zur Entwicklung neuer Fertigungstechnologien ist die Bildung eines grundlegenden Prozessverständnisses des trockenfunkenerosiven Feinbohrens von keramischen Werkstoffen erforderlich. Dies erfolgt anhand einer systematischen Analyse der Haupteinflussfaktoren sowie deren Detailuntersuchung und Betrachtung des Prozesseinflusses beim trockenfunkenerosiven Feinbohren. Teilziel ist dabei die Ableitung prozesssicherer Parametereinstellungen zur funkenerosiven Herstellung von Mikrobohrungen in unterschiedlichen Keramikwerkstoffen mit Luft als Dielektrikum.
3. Wie im Stand der Technik aufgeführt, treten bei der konventionellen funkenerosiven Bearbeitung keramischer Werkstoffe unterschiedliche Abtragmechanismen auf, welche Einfluss auf das Prozessverhalten haben. Über die Untersuchungen entstehender Abtragpartikel erfolgt die Identifikation auftretender Abtragmechanismen des jeweiligen keramischen Werkstoffs, welche für die weitere Verfahrensoptimierung genutzt werden.
4. Der Einsatz prozessfördernder Gase als Dielektrikum sowie die Erforschung von deren Prozessverhalten bilden die Grundlage einer abschließenden Verfahrensoptimierung sowie der Ableitung unterschiedlicher Fertigungstechnologien. Dabei werden der Einfluss verschiedener Gase auf ihr Erosionsverhalten erforscht sowie deren Einsatzfähigkeit als Prozessgas untersucht. Abschließend und zur Erreichung des Primärziels erfolgen eine systematische Optimierung der Fertigungstechnologien sowie die Ableitung von Schrupp- und Schlichtparametern für die jeweiligen keramischen Werkstoffe.

In **Bild 3-1** sind die Problemstellung und Vorgehensweise mit den einzelnen Teilzielen sowie das Ziel der Arbeit dargestellt:

Herausforderung:

Unzureichende Prozessstabilität infolge schlechter Spülbedingungen beim funkenerosiven Feinbohren von Hochleistungswerkstoffen

Der steigende Bedarf von technischen Keramiken für industrielle Anwendungen fordert aus wirtschaftlichen Aspekten die stetige Anpassung und Optimierung bestehender Fertigungsverfahren und Technologien.

Vorgehensweise:

Untersuchung von Einzelentladungen

Erzeugung und messtechnische Auswertung von Einzelentladekratern unter flüssigen sowie gasförmigen Arbeitsmedien auf unterschiedlichen Keramikwerkstoffen durch Variation energiebeeinflussender Entladeparameter

Teilziel 1: Grundlegende Erkenntnisse über das Abtragverhalten des jeweiligen Werkstückwerkstoffs in Abhängigkeit der Prozessstellgrößen

Entwicklung von Fertigungstechnologien

Technologische Untersuchungen für das trockenfunkenerosive Feinbohren keramischer Werkstoffe mit Luft als Dielektrikum, zur systematischen Analyse der Haupteffekte einzelner Prozessstellgrößen sowie deren Detailuntersuchung

Teilziel 2: Bereitstellung prozesssicherer Fertigungstechnologien zur Herstellung von Mikrobohrungen sowie Erkenntnisse zum Einfluss einzelner Prozessstellgrößen

Untersuchung von Abtragpartikeln

Messtechnische Untersuchung der beim trockenfunkenerosiven Feinbohren keramischer Werkstoffe entstehenden Abtragpartikel in Anhängigkeit unterschiedlicher Fertigungstechnologien

Teilziel 3: Identifikation auftretender Abtragmechanismen der jeweiligen Keramiken zur Nutzung der folgenden Prozessoptimierung

Einsatz prozessfördernder Gase

Erforschung des Prozessverhaltens unterschiedlicher Gase als Arbeitsmedium sowie die Durchführung einer systematischen Optimierung der Fertigungstechnologien

Teilziel 4: Erkenntnisse zum Einfluss der eingesetzten Gase sowie die Bereitstellung optimierter Fertigungstechnologien für die Schrupp- und Schlichtbearbeitung

Ziel:

Entwicklung, Analyse sowie Anwendung einer neuartigen Technologie zur trockenfunkenerosiven Feinbohrbearbeitung keramischer Werkstoffe.

Wirtschaftliche und ökologische Optimierung des funkenerosiven Feinbohrens zur Herstellung von Mikrobohrungen in Hochleistungswerkstoffen durch die Steigerung der Abtragrate V_w und die Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ

Bild 3-1: Problemstellung, Vorgehensweise und Ziel

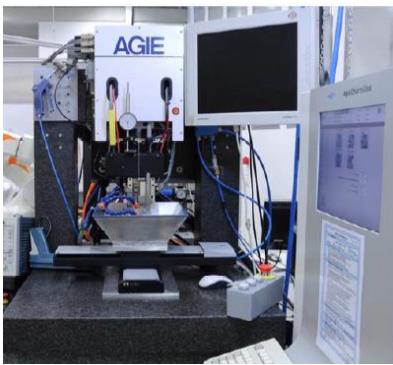
4 Randbedingungen für das trockenfunkenerosive Feinbohren

4.1 Maschinentechnik

4.1.1 Versuchsanlage

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wird das Mikrobohrsystem Quadraton 1 in Verbindung eines AT Spirit 2 Generators der Firma GF AGIE CHARMILLES, Losone, Schweiz eingesetzt. Der Generator verfügt über eine Prozessstromquelle für statische Impulsentladungen sowie eine Relaxationsgeneratoreinheit, die C- und μ C-Box. Diese Kombination ermöglicht die verschleißarme Schruppbearbeitung der Makrofunkenerosion sowie die Schlicht- und Feinschlichtbearbeitung für die Mikrofunkenerosion. Zur Erweiterung der Verfahrenswege verfügt das Maschinensystem für die X- und Y-Richtung über weitere Linearachsen des Typs M-531 der Firma PHYSIKINSTRUMENTE GMBH & CO.KG, Karlsruhe. Tabelle 4-1 zeigt die Leistungskenndaten der verwendeten Versuchsanlage.

Tabelle 4-1: Leistungskenndaten der Versuchsanlage

 <p>Maschinensystem mit Quadraton 1 Bohrkopf, AT Spirit 2 Generator und PI M-531 Linearachsen</p>	Generator	Prozessstromquelle für statische Impulsentladungen, Relaxations-Mikrogenerator für Kondensatorentladungen
	Leerlaufspannung u_0	60 V bis 250 V
	min. Entladestrom i_e	0,8 A
	min. Entalddauer t_e	100 ns
	Entladekapazität C_e	0,2 nF bis 116 nF
	min. Entladeenergie W_e	0,5 μ J
	Achsen	Schrittmotor mit Kugelumlaufspindel X (10 mm), Y (10 mm), Z (50 mm) DC-Servomotor mit Kugelumlaufspindel U (306 mm), V (306 mm)
	Dielektrikum	deionisiertes Wasser

Für die Aufzeichnung der Strom- und Spannungsverläufe wird ein digitales Speicheroszilloskop vom Typ TDS5032B über eine Strommesszange des Typs A6303 und einen Signalwandler des Typs AM503 der Firma TEKTRONIX INC., Beaverton, USA mit der Versuchsmaschine verbunden. Das Oszilloskop weist eine maximale Abtastrate von 5 GSs^{-1} , eine Bandbreite von 350 MHz und eine Speichertiefe von 4 Mio. Datenpunkten pro Kanal auf. Die Detektion des Stromsignals erfolgt über die zur Werkzeugelektrode führenden Leiterkabel mittels einer Ringspule der Strommesszange, die Aufzeichnung des Spannungssignals über Kontaktgeber am Werkzeug und Werkstück. Der Aufbau ermöglicht beispielsweise die Er-

mittlung von Entladeenergien über eine numerische Signalanalyse und -verarbeitung mittels mathematischer Funktionen sowie die visuelle Betrachtung der Prozessstabilität.

4.1.2 Modifikation der Versuchsanlage

Zur Realisierung des trockenfunkenerosiven Feinbohrens mittels des Mikrobohrsystems Quadraton 1 der Firma GF AGIE CHARMILLES, Losone, Schweiz, sind konstruktive Anpassungen des Maschinensystems erforderlich. Für die Erweiterung des bestehenden Luftdruckbereichs von $0 \text{ bar} \leq p_s \leq 10 \text{ bar}$ auf $0 \text{ bar} \leq p_s \leq 100 \text{ bar}$ wird ein Luftdruckverstärker der Firma MAXIMATOR GMBH, Nordhausen, vom Typ DLE15-GG-S über einen Hochdruckbehälter mit der Werkzeugelektrode verbunden. Der Hochdruckbehälter ist durch präzise Verbindungswinkel, über welche die Leitung des Stromsignals erfolgt, mit dem Achssystem der Maschine verbunden. Bild 4-1 zeigt den Aufbau der Trockenerosionseinheit an dem Mikrobohrsystem Quadraton 1.

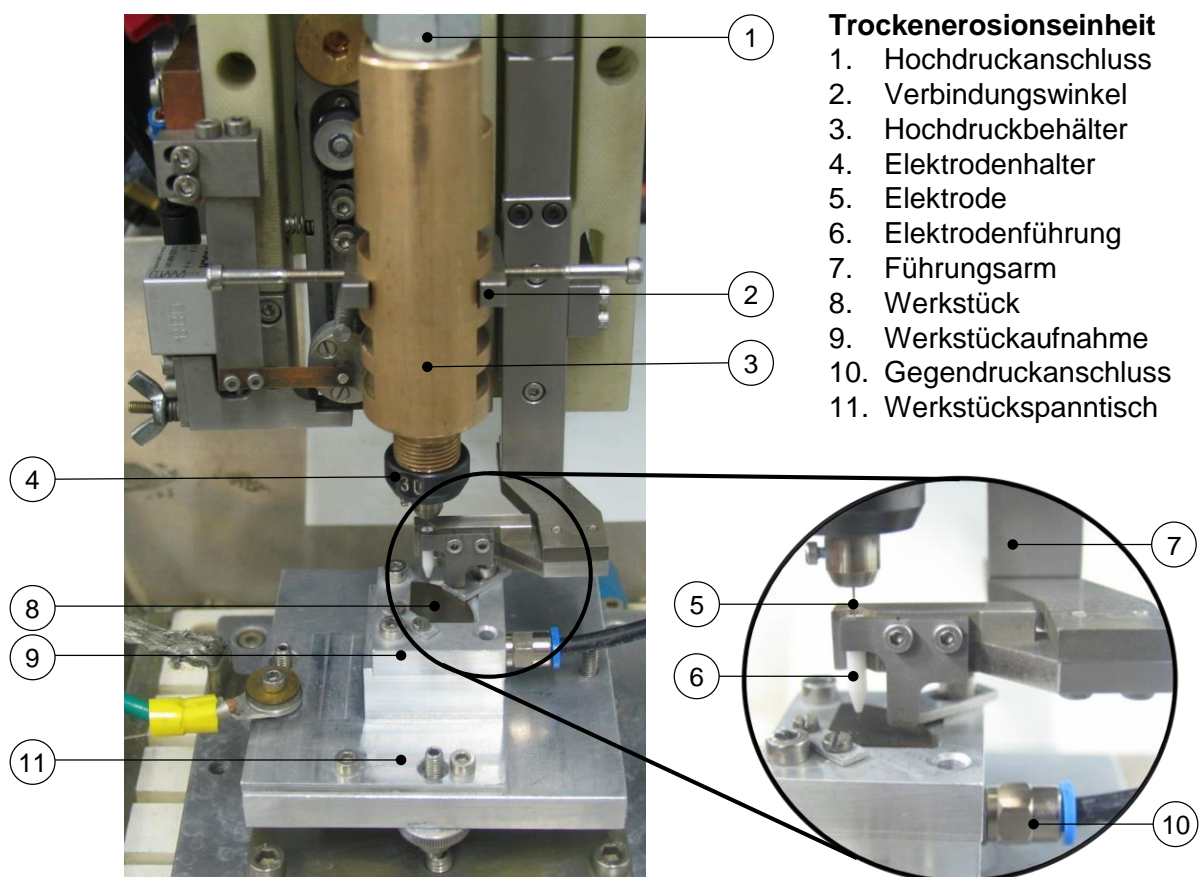


Bild 4-1: Aufbau der Trockenerosionseinheit

Um das durch den Mikrogenerator erzeugte Strom- und Spannungssignal so gering wie möglich durch Störkapazitäten $C_{\text{stör}}$ zu verfälschen, erfolgt eine Reduzierung des Werkstoffvolumens bei der Auslegung des Druckbehälters auf ein Minimum. Der Druckbehälter dient als Schnittstelle zwischen Luftdruckverstärker und Elektrodenhalter sowie als Pulsationsdämpfer des Druckluftverstärkers. Dadurch werden ein gleichmäßiger Luftdruck gewährleistet und zusätzliche Schwingungen der Werkzeugelektrode infolge eines ungleichmäßigen Luftstroms vermieden. Des Weiteren wird ein Elektrodenhaltearm zur genauen Führung der Werkzeugelektrode eingesetzt, um mögliche translatorische Auslenkungen oder Schwingungen der Werkzeugelektrode verursacht durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten des Dielektrikums auszuschließen.

Die Werkstückaufnahme erfolgt über einen Werkstückspanntisch, welcher das spielfreie Ausgleichen von Winkelfehlern über ein auf Festkörpergelenken basierendes Kippelement ermöglicht. Zudem erfolgt über einen Gegendruckanschluss ein konstanter Spüldruck p_s von $p_s = 7$ bar an der Unterseite des Werkstücks. Dieser gewährleistet während der Durchbruchphase konstante Spülbedingungen, wodurch die Streuung der Durchbruchzeiten reduziert wird. Das weiterhin bestehende Durchspülen des Arbeitsspalts ist eine Folge der größeren Druckdifferenz zwischen Elektrodenaustritt und dem Umgebungsdruck p_0 im Vergleich zum Spüldruck p_s des Gegendruckanschlusses.

4.2 Werkstück- und Elektrodenwerkstoffe, Dielektrika

4.2.1 Werkstückwerkstoff

Die technologischen Untersuchungen erfolgen mit zwei Hochleistungskeramiken, deren Werkstoffeigenschaften unterschiedlich sind und somit ein ungleiches Erodierverhalten aufweisen. Bei der Auswahl der Werkstoffe werden folgende Schwerpunkte berücksichtigt:

- Zu untersuchen sind ein reiner Keramikwerkstoff sowie eine Mischkeramik, die ohne den Zusatz einer leitfähigen Phase nicht funkenerosiv zu bearbeiten ist.
- Zum Einsatz kommen Werkstoffe, die ausführlich untersucht wurden und deren Erosionsverhalten unter flüssigem Dielektrikum bekannt ist.
- Die Werkstoffe sollen unterschiedliche Abtragmechanismen aufweisen.

Nach den im Stand der Technik, Kapitel 2.4.2, aufgeführten Veröffentlichungen ist bei allen Untersuchungen mit Titanborid TiB_2 der Spalling-Effekt beobachtet worden. Dies ist auf die hohe Schmelztemperatur T_s zwischen $3193\text{ K} \leq T_s \leq 3800\text{ K}$ und den Wärmeausdehnungskoeffizienten α mit $6,4 \cdot 10^{-6}/\text{K} \leq \alpha \leq 8,1 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ sowie auf die geringe Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_w \leq 54\text{ W/mK}$ bei einer Temperatur $T = 50^\circ\text{C}$ zurückzuführen. Gegenüber anderen Keramiken weist TiB_2 somit stark ausgeprägte Werkstoffeigenschaften auf [PAN90, GAD88, GAD91a, VAS96].

Titannitrid infiltriertes Siliciumnitrid Si_3N_4 -TiN ist eine Mischkeramik, bei der ausschließlich Schmelzvorgänge während der funkenerosiven Bearbeitung beobachtet wurden [FAU93, GAD90, LIU08, LIU09b, MOH02], ausgenommen von LAUWERS ET AL. [LAU04], die vom Melting-Effekt in Verbindung mit dem Spalling-Effekt berichten. Die für den Abtragmechanismus relevanten thermischen Werkstoffeigenschaften von Si_3N_4 -TiN weisen mit einer Schmelztemperatur $T_s = 2151\text{ K}$, einem Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ und einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda_w = 30\text{ W/mK}$ auf den Melting-Effekt hin [FAU93].

Allerdings berichten MALEK ET AL. [MAL11], dass es insbesondere bei Mischkeramiken aufgrund der unterschiedlichen Werkstoffe zu Spannungen zwischen den Kongrenzen kommen kann, die Rissbildung zur Folge haben. Demnach ist der Spalling-Effekt bei Si_3N_4 -TiN nicht auszuschließen. In [Tabelle 4-2](#) sind die Eigenschaften der Versuchswerkstoffe des Keramikherstellers FCT INGENIEURKERAMIK GMBH, Frankenblick, aufgeführt.

Tabelle 4-2: Eigenschaften der Versuchswerkstoffe

Eigenschaften	Einheit	Versuchswerkstoffe	
		Titanborid	Titannitrid infiltriertes Siliciumnitrid
Kennwert		TiB ₂	Si ₃ N ₄ -TiN
Werkstoffzusammensetzung	-	TiB ₂	38 % Si ₃ N ₄ 7 % Sinteradditive (Y ₂ O ₃ und Al ₂ O ₃) 55 % TiN
äquivalenter Korndurchmesser d _v	µm	0,5 bis 10	2 bis 10
Dichte ρ	g/cm ³	4,13	3,847
Vickers-Härte HV1	GPa	23 bis 29	18
Elastizitätsmodul E	GPa	510 bis 575	350
Bruchzähigkeit K _{Ic}	MPa√m	3,5 bis 7	8
Poissonzahl ν	-	0,1 bis 0,15	0,2
Druckfestigkeit β _D	MPa	1100 bis 1800	3000
Schmelztemperatur T _S	K	3243	2151
Wärmeausdehnungskoeffizient α	10 ⁻⁶ /K	6,4 bis 8,1	2,5
Wärmeleitfähigkeit λ	W/mK	96	30
spezifischer elektrischer Widerstand ρ _{el}	Ωcm	10 · 10 ⁻⁶ bis 15 · 10 ⁻⁶	2 · 10 ⁻⁵

Von den Versuchswerkstoffen TiB₂ und Si₃N₄-TiN werden Aufnahmen polierter Oberflächen mittels eines Rasterelektronenmikroskops (REM) des Typs LEO 1455 VP der CARL ZEISS AG, Oberkochen, erstellt. Diese dienen zur Betrachtung des Gefüges sowie zur späteren Bewertung der Ergebnisse für die Untersuchungen der Abtragpartikel. Des Weiteren werden zur Verifizierung der Herstellerangaben über die Bestandteile der Keramikwerkstoffe energiedispersive Röntgenmikroanalysen (EDX) mittels eines DXP-X10P Detektors der Firma XIA LLC, Hayward, USA, durchgeführt. Zur Evaluierung der über die EDX-Analyse ermittelten Werkstoffzusammensetzung erfolgt der Einsatz der wellenlängendispersiven Röntgenspektroskopie (WDX). Hierfür wird eine JEOL JXA-8530F Hyperprobe Elektronen-

strahl-Mikrosonde der Firma JEOL GMBH, Freising, eingesetzt, welche die genaue Ermittlung einzelner Werkstoffelemente der Keramiken gewährleistet.

Bild 4-2 zeigt das Gefüge von TiB_2 in unterschiedlichen Vergrößerungen durch die REM-Aufnahmen sowie die Ergebnisse der EDX-Analyse. Bei 7000-facher Vergrößerung sind Ausbrüche und Risse im Werkstoff, zurückzuführen auf das Polieren der Oberfläche, zu erkennen. Des Weiteren weist das Gefüge Flächen unterschiedlicher Helligkeit mit maximalen Durchmessern von $10\ \mu m$ auf. Dies sind die einzelnen Phasen des Gefüges, bzw. die Körner des Werkstoffs, die mit einem äquivalenten Korndurchmesser d_v von $0,5\ \mu m \leq d_v \leq 10\ \mu m$ mit den Herstellerangaben übereinstimmen. Das Ergebnis der EDX- und WDX-Analysen zeigen, dass neben dem reinen TiB_2 geringe Kohlenstoffanteile in der Keramik vorhanden sind. Laut Keramikhersteller enthält das als Grundlage für die Keramik verwendete TiB_2 -Pulver außerdem Sauerstoff, Stickstoff und Eisen, jedoch in Konzentrationen von teilweise weit unter 3 %.

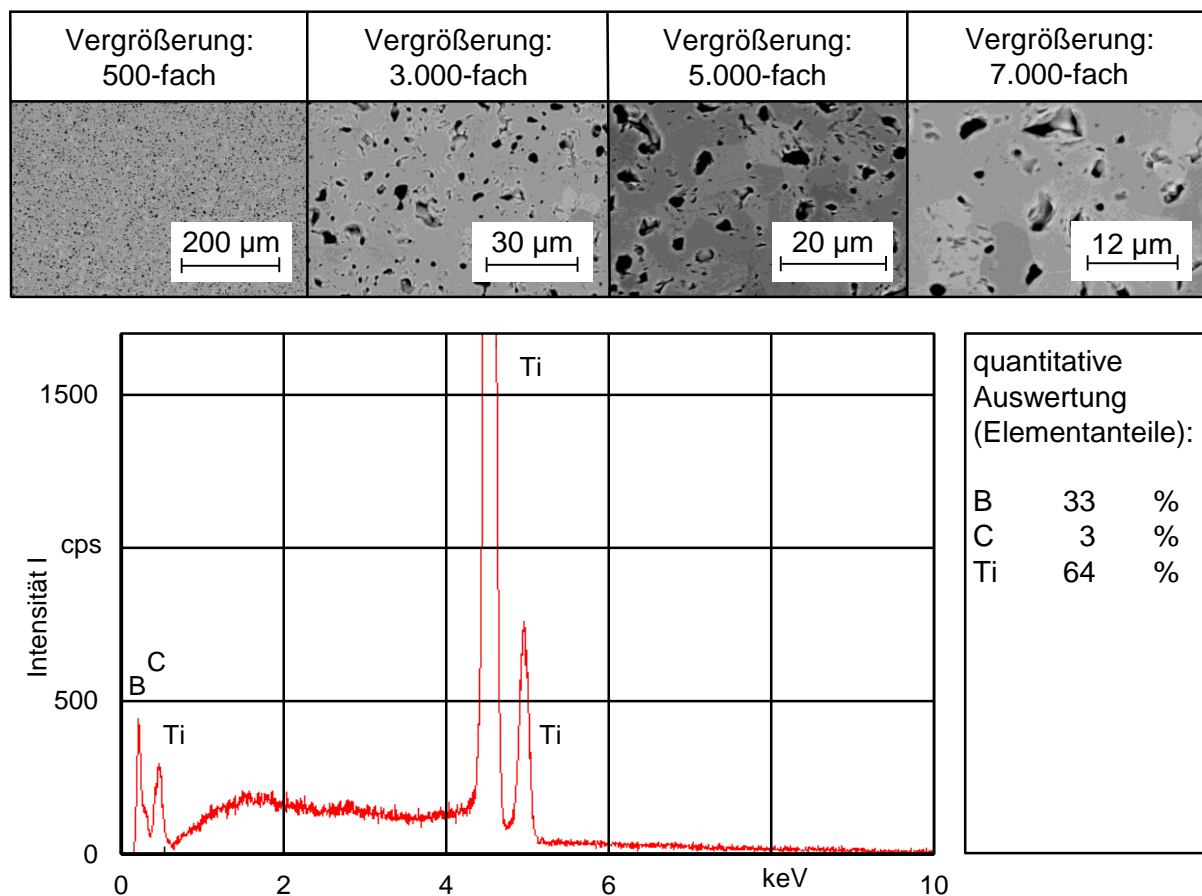


Bild 4-2: Schliffbilder und Werkstoffanalyse TiB_2

Bild 4-3 zeigt die REM-Aufnahmen und die Ergebnisse der EDX- und WDX-Analyse von Si_3N_4 -TiN. Es sind ebenfalls die Phasen der Keramik durch helle (TiN) und dunkle stabförmige (Si_3N_4) Flächen zu erkennen. Die EDX-Analyse ergibt, dass die Oberfläche aus 22 % Titan besteht, welches zur Dotierung des Si_3N_4 dient. Des Weiteren sind in der dunklen Si_3N_4 -Phase Anteile von Aluminium mit 3 % sowie Spuren von Kohlenstoff enthalten. In Bild 4-3 sind die Anteile der einzelnen Elemente der Si_3N_4 -TiN aufgelistet.

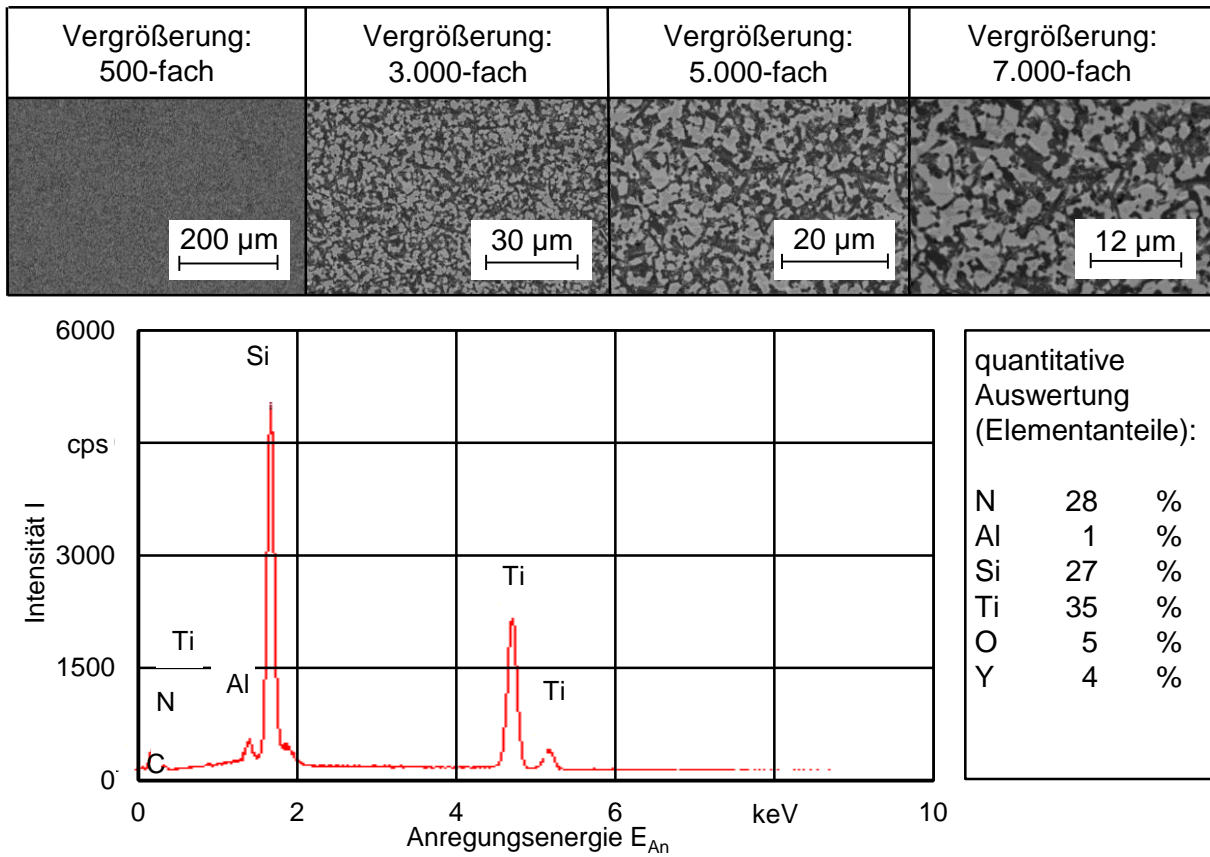
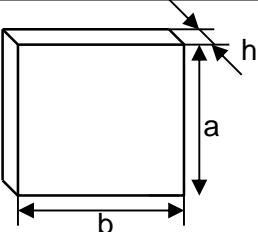
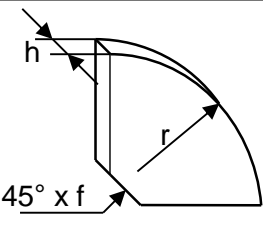


Bild 4-3: Schliffbilder und Werkstoffanalyse $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$

Die Fertigung der Werkstücke aus den Rohlingen erfolgt mittels funkenerosiven Drahtschneidens. Dabei werden 1 mm starke Werkstücke mit den in Tabelle 4-3 dargestellten Formen und Maßen hergestellt. Die Werkstückgeometrie, ob quadratisch oder Kreisabschnitt, ist abhängig von der Form des Keramikrohlings.

Tabelle 4-3: Skizze und Daten der Werkstückgeometrie

Form	quadratisch	Kreisabschnitt mit Schrägung
Skizze		
Werkstückwerkstoff und -maße	$\text{TiB}_2, \text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$: h = 1,0 mm a = 13,0 mm b = 13,0 mm	$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$: h = 1,0 mm r = 14,3 mm f = 3,0 mm

4.2.2 Elektrodenwerkstoff

Als Werkzeugelektroden für das trockenfunkenerosive Feinbohren werden Hartmetallröhrchen mit einem Außendurchmesser $d_{el} = 300 \mu\text{m}$ und einem Innendurchmesser $d_{eli} = 120 \mu\text{m}$ sowie einer Elektrodenlänge $l_{el} = 150 \text{mm}$, der Fa. BALZER-TECHNIK SA/AG, Domdidier, Schweiz, eingesetzt. Der Elektrodenwerkstoff besteht aus dem Hartmetall TSM10 mit 94 % Wolframcarbid (WC) und 6 % Kobalt (Co). Hartmetall weist neben einem hohen Erosionswiderstandsindex C_m gute mechanische Eigenschaften auf. Diese haben eine erhebliche Steifigkeit der Werkzeugelektrode zur Folge. Die Auswirkungen des Fluidstroms auf die Werkzeugelektrode, bei Spüldrücken p_s bis $p_s \leq 80 \text{bar}$, sind nicht bekannt. Demzufolge können bisher nicht berücksichtigte Effekte, verursacht durch die Spülströmung mit Gasen, auftreten und eine Verfälschung des Bearbeitungsergebnisses bewirken. Um Elektrodenschwingungen und somit eine weitere Störgröße zu reduzieren, die eine hohe Streuung der Messergebnisse für den relativen Elektrodenverschleiß und Formabweichungen der Bohrungsgeometrie zur Folge haben, sind Werkzeugelektroden mit hoher Steifigkeit unabdingbar (vgl. Kapitel 2.2.2).

4.2.3 Dielektrika für die Trockenfunkenerosion

Als Dielektrika für das trockenfunkenerosive Feinbohren werden neben Druckluft vier weitere Gase, welche unterschiedliche Eigenschaften als Prozessgas z. B. in der Schweißtechnik aufweisen, eingesetzt. Im Einzelnen sind dies die Gase:

- Argon Ar,
- Helium He,
- Sauerstoff O_2 und
- Stickstoff N_2 .

DIN EN 439 teilt die für das Lichtbogenschweißen eingesetzten Schutzgase nach ihrem Reaktionsverhalten ein. Demzufolge gehören die Edelgase Argon und Helium zu den inerten, Stickstoff zu den reduzierenden und Sauerstoff, welches für den Schweißprozess nur als Beimischung eingesetzt wird, zu den oxidierenden Gasen [DIN439].

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Gasen besteht im Aufbau ihrer Struktur.

Argon und Helium besitzen vollständig besetzte Valenzschalen und sind daher Edelgase, die im Periodensystem als Elemente in der VIII. Hauptgruppe geführt werden. Demzufolge liegen Argon und Helium als Einzelatome vor und gehen keine Bindungen ein – sie haben einen inerten Zustand. Sauerstoff und Stickstoff hingegen sind molekular aus zwei Atomen desselben Elements aufgebaute Aktivgase. Da diese molekulare Atombindung des gemeinsamen Elektronenpaars durch Wärme aufgespalten wird, beispielsweise impliziert durch Funkenentladungen, erfolgt je nach Reaktionsverhalten eine chemische Reaktion mit der Umgebung. Diese wirkt oxidierend oder reduzierend auf die Atmosphäre eines Lichtbogens, bzw. der Funkenentladung [THU08].

Im Gegensatz zum Schweißen, bei welchem die Eigenschaften der Prozessgase in Abhängigkeit von der Temperatur zu betrachten sind, werden diese bei der Erosionsbearbeitung, aufgrund der in- oder quasistationären, zeitlich voneinander getrennten Funkenentladungen, unter Normalbedingung berücksichtigt. Insbesondere Transporteigenschaften der Prozessgase sind für Zündzustände und instationäre Lichtbogenzustände einflussnehmend. Im Einzelnen sind dies die Eigenschaften:

- thermische Leitfähigkeit λ_w ,
- elektrische Leitfähigkeit κ ,
- spezifische Wärmekapazität c_p und
- dynamische Viskosität η [TUH08].

In Tabelle 4-4 sind die Eigenschaften der Prozessgase Argon, Helium, Sauerstoff und Stickstoff mit denen von Luft gegenübergestellt.

Tabelle 4-4: Gegenüberstellung der Eigenschaften von Argon, Helium, Sauerstoff und Stickstoff [MAT12, SCH05]

Eigenschaften	Einheit	Luft	Argon Ar	Helium He	Sauerstoff O ₂	Stickstoff N ₂
Struktur		atomar und molekular	atomar	atomar	molekular	molekular
Dichte ρ (ideal)	kg/m ³	1,204	1,7823	0,1786	1,4276	1,2499
Molmasse M	g/mol	28,960	39,948	4,003	31,999	28,014
Siedetemperatur T _s (bei 1,013 bar)	°C	-194,5	- 185,86	-268,85	-182,98	-195,8
thermische Leitfähigkeit λ_w (15°C und 1,013 bar)	mW/cmK	0,240	0,161	1,482	0,254	0,250
spezifische Wärmekapazität c _p (25°C und 1,013 bar)	kJ/kgK	1,050	0,519	5,196	0,919	1,041
dynamische Viskosität η (25°C u. 1bar)	Ns/m ²	18,2 10 ⁻⁶	22,8 10 ⁻⁶	19,68 10 ⁻⁶	20,5 10 ⁻⁶	17,9 10 ⁻⁶
Dissoziations- energie E _B	eV	/	/	/	5,14	9,78
Ionisierungs- energie E _I	eV	33,70	15,76	24,59	13,62	14,53
Durchschlag- festigkeit E _D	kV/mm	3,30	0,65	1,00	2,90	3,30

Aus den verschiedenen spezifischen Eigenschaften der Gase resultieren unterschiedliche Auswirkungen auf die Funkenentladungen bei der Erosionsbearbeitung. Im Folgenden werden derzeitige Erkenntnisse zum Einfluss der in Tabelle 4-4 aufgeführten Gase auf das Plasmaverhalten thermischer Verfahren aufgeführt, welche für die trockenfunkenerosive Bearbeitung eine Relevanz aufweisen.

Helium

Helium bewirkt beim WIG-Schweißen von Stahlwerkstoffen im Vergleich zu Argon einen geringeren Staudruck. Dieser bezeichnet den Druck, welcher über den Plasmakanal auf das Werkstück einwirkt, er ist entscheidend für die Energiedichte am Fußpunkt einer Entladung. Der Staudruck wird vorwiegend beeinflusst durch die Dichte ρ und die Molmasse M des Gases. Des Weiteren weist Helium in einem Temperaturbereich von $300 \text{ K} \leq T \leq 8000 \text{ K}$ eine sehr hohe thermische Leitfähigkeit κ auf, welche zu einer verstärkten Wärmeübertragung in das Werkstück führt [ZÄH10].

Dieser Effekt wird durch die Ausbildung einer kleinen Plasmawolke mit geringer Streuung unterstützt, zurückzuführen auf die hohe erforderliche Ionisierungsenergie E_i . Auswirkungen sind eine erschwerte Lichtbogenzündung in Helium trotz geringer Durchschlagsfestigkeit E_D [RÖH01, MAT12].

Argon

Die Ionisierbarkeit von Argon gegenüber der von Helium ist aufgrund der erforderlichen Ionisierungsenergie E_i hoch, wodurch eine frühzeitige Ausbildung des Plasmakanals realisiert wird. Dieser weist eine breite Plasmawolke mit einer niedrigen Energiedichte auf, welche eine geringe Wärmeeinbringung in das Werkstück verursacht. Zurückzuführen auf die hohe Dichte ρ und Molmasse M von Argon ist die zu erreichende Geschwindigkeit freier Ladungsträger im Plasmakanal schwächer gegenüber der von Helium, Sauerstoff und Stickstoff, wodurch eine geringere Prozesswärme entsteht [MAT12, RÖH01, SAV11, ZÄH10].

Sauerstoff

ROTH ET AL. [ROT13] analysierten das Prozessverhalten beim trockenfunkenerosiven Bohren von Stahlwerkstoffen mit Sauerstoff als Dielektrikum. Neben einer sehr hohen realisierten Abtragrate V_w stellten sie, zurückzuführen auf das große Oxidationsvermögen von Sauerstoff, eine überdurchschnittliche Prozessstabilität fest. Diese begründen sie anhand der durch Oxidation entstehenden Abtragpartikel, was zu einer elektrischen Isolation dieser führt und Kurzschlussentladungen, verursacht durch Brückenbildungen der Abtragpartikel zwischen der Werkzeugelektrode und der Bohrungswand, unterbindet.

Des Weiteren sind die Reaktionsfreudigkeit von Sauerstoff sowie die erforderliche Ionisierungsenergie E_i zur Ausbildung eines Plasmas sehr gering, welches zu einem hohen Werkstoffabtrag am Werkstück führt [LIQ13].

Stickstoff

Stickstoff ist ein Reaktionsgas, welches ein quasiinertes Verhalten aufweist und ausschließlich bei hohen Temperaturen mit dem zu bearbeitenden Werkstoff reagiert. Die hohe spezifische Wärmekapazität c_p von Stickstoff hat auf den Plasmakanal einen einschnürenden Effekt, welcher zur Erhöhung der Energiedichte, verursacht durch hohe Geschwindigkeiten der freien Ladungsträger, führt. Dieser Effekt wird durch eine geringe Molmasse M sowie eine niedrige dynamische Viskosität η unterstützt und hat eine Erhöhung des Staudrucks zur Folge [MAT12, SAV11].

Starke elektromagnetische Kräfte führen zu einer zusätzlichen Beschleunigung der freien Ladungsträger im Inneren des Plasmas, welche neben der einschnürenden Wirkung eine Erhöhung des anodenseitigen Wärmeeintrags bewirken. Aufgrund der starken Einschnürung des Plasmakanals entstehen bei Stickstoff als Prozessgas hohe Energieverluste in der

Randzone. In der Schweißtechnik sind demzufolge hochenergetische Parametereinstellungen erforderlich, um die Vorteile von Stickstoff nutzen zu können [LU09].

ROTH ET AL. [ROT13] stellten bei der Verwendung von Stickstoff als Dielektrikum für die trockenfunkenerosive Bohrbearbeitung eine erhöhte Anzahl an Fehl- und Kurzschlussentladungen fest. Diese führen, aufgrund der zunehmenden Spaltweitenregelung zur Kompensierung der Kurzschlüsse, zu einem instabilen Prozess und einer geringen Abtragate.

5 Einzelentladungen

5.1 Vorgehensweise

Für die Untersuchung und Darstellung der in Abhängigkeit vom Dielektrikum entstehenden Unterschiede bei der Entladekraterausbildung auf dem Werkstück werden Einzelentladungsversuche unter Luft und deionisiertem Wasser auf verschiedenen Werkstückwerkstoffen durchgeführt und messtechnisch ausgewertet. Bei der Betrachtung der Einzelentladungen erfolgt die Erarbeitung von Erkenntnissen über das Prozessverhalten und die Auswirkungen einzelner Prozessstellgrößen auf die entstehende Kratergeometrie in gasförmigen sowie flüssigen Dielektrika. Dies ermöglicht eine gezielte Untersuchung von Prozessparametern innerhalb eines großen Variationsbereichs ohne auftretende Störeinflüsse, verursacht durch Folgeentladungen, welche z. B. zu einer Änderung der Durchschlagsfestigkeit E_D des Dielektrikums führen.

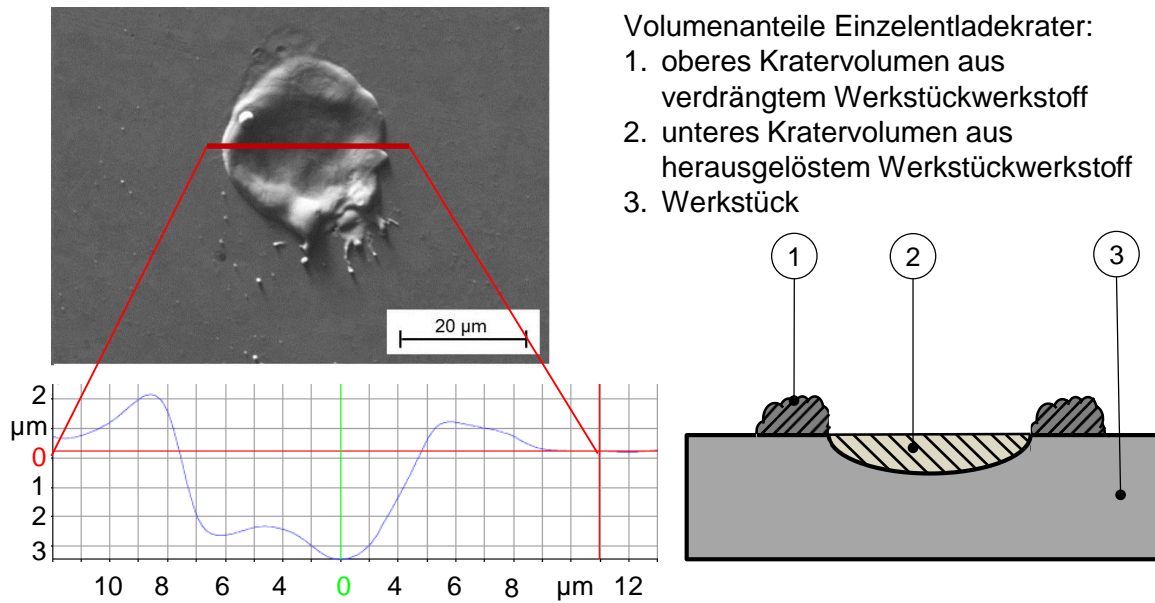
Als Werkstückwerkstoffe werden die Keramiken Si_3N_4 -TiN und TiB_2 sowie der Chrom-Nickel-Stahl 18CrNi8, Werkstoffnummer 1.5920, mit polierten Werkstückoberflächen zur besseren Darstellung der Einzelentladungskrater, eingesetzt. Der Stahlwerkstoff dient als Vergleichswerkstoff gegenüber den Keramiken, um möglicherweise auftretende Effekte beim Werkstoffabtrag, zurückzuführen auf die Werkstoffzusammensetzung der Keramiken, zu erkennen.

Die Versuchsdurchführung erfolgt mit Entladungen des Relaxationsgenerators, da diese niedrigere Entladeenergien W_e als statische Funkenentladungen aufweisen und für das Feinbohren mit geringen Elektrodendurchmessern d_{el} eingesetzt werden. Dabei erfolgt die Untersuchung der energiebeeinflussenden Prozessstellgrößen

- Entladestrom i_e ,
- Entladespannung u_e und
- Entladedauer t_e

einer Einzelentladung, deren Entladeenergie W_e nach VDI3402 über die Formel (2-1) berechnet wird. Die Beeinflussung der Entladedauer t_e erfolgt über die Entladekapazität des Kondensators C_e und die Änderung des Entladestroms i_e über die Leerlaufspannung u_0 . Eine detaillierte Erklärung über die Zusammenhänge der Prozessstellgrößen ist im Stand der Technik, unter [Kapitel 2.1.3](#), erfolgt.

Zur Überprüfung, ob die entstehenden Krater auf der Werkstückoberfläche durch Einzelentladungen und nicht durch aufeinander folgende Entladungen erzeugt werden, sowie zur Ermittlung des Kraterdurchmessers kommt ein Raster-Elektronen-Mikroskop des Typs JCM-5000 der Firma JEOL (GERMANY) GMBH zum Einsatz. Die Messung von Kratertiefe l_K und -volumen V_K erfolgt über ein optisches 3D-Messsystem der Firma ALICONA IMAGING GMBH, Österreich. Dieses ermöglicht die Bestimmung der Anteile von verdrängtem und herausgelöstem Werkstückwerkstoff eines Entladekraters. In [Bild 5-1](#) sind ein schematisches Beispiel zur messtechnischen Erfassung eines Einzelentladekraters dargestellt sowie dessen Volumenanteile definiert. Um die vollständige Aufladung der Kondensatoren zu überprüfen und Fehlentladungen zu vermeiden, werden der Strom- und Spannungsverlauf jeder Einzelentladung mittels eines digitalen Oszilloskops vom Typ TDS5032B der Firma TEKTRONIX AG aufgezeichnet.



- Volumenanteile Einzelentladekrater:
1. oberes Kratervolumen aus verdrängtem Werkstückwerkstoff
 2. unteres Kratervolumen aus herausgelöstem Werkstückwerkstoff
 3. Werkstück

Bild 5-1: Schematisches Beispiel zur messtechnischen Erfassung und Definition der Volumenanteile eines Einzelentladekraters

Durch eine Variation der einzelnen Prozessstellgrößen in drei Stufen werden die in [Tabelle 5-1](#) zusammengestellten Parameterkombinationen für die Durchführung der Einzelentladungsversuche realisiert. Die in den Arbeitsmedien, deionisiertes Wasser mit einer konstanten elektrischen Leitfähigkeit κ von $\kappa \approx 0,001$ S/cm und Luft, erzeugten Einzelentladungen werden gegenübergestellt, wodurch eine Darstellung zur Wirkung flüssiger und gasförmiger Dielektrika erfolgt.

Tabelle 5-1: Parameterkombinationen des Relaxationsgenerators für die Durchführung der Einzelentladungsversuche

Parameterkombination Relaxationsentladungen				
Kapazität C_e	Entladedauer t_e	Spitzenstrom \hat{i}	Spitzenstrom \hat{i}	Spitzenstrom \hat{i}
10 nF	0,400 μ s	4,4 A	10,7 A	17,0 A
15 nF	0,487 μ s	5,3 A	13,1 A	21,8 A
33 nF	0,722 μ s	7,9 A	19,4 A	32,3 A
Leerlaufspannung u_0		80 V	160 V	250 V

Die gezielte Auslösung einzelner Funkenentladungen auf der Werkstückoberfläche, insbesondere bei Verwendung des Relaxationsgenerators, erfolgt über die Abstimmung der Ausschaltdauer t_{off} und der Einschaltdauer t_{on} mit der Elektrodenbewegung in Z-Richtung. Da diese abhängig ist von der verwendeten Entladekapazität C_e des jeweiligen Kondensators und der Leerlaufspannung u_0 , werden für jede Parameterkombination im Vorfeld eine iterative Anpassung der Ausschaltdauer t_{off} und der Einschaltdauer t_{on} durchgeführt. Für die unterschiedlichen Werkstoffe, Dielektrika und Parameterkombinationen werden jeweils 30 Einzelentladungen auf den Werkstückoberflächen erzeugt und anhand der Prozessüberwachung selektiert. Dies gewährleistet für die Betrachtung der Einzelentladungen, dass die Auswertung ausschließlich bei vollständig aufgeladenen Kondensatoren erfolgt.

5.2 Einfluss der Prozessstellgrößen auf die Kraterausbildung

Ausgehend von einer Parameterkombination des Relaxationsgenerators mit der Entladekapazität $C_e = 15 \text{ nF}$ und der Leerlaufspannung $u_0 = 160 \text{ V}$ erfolgte eine Variation in drei Stufen sowie ein Abgleich der Kratergeometrien unter Verwendung flüssiger und gasförmiger Dielektrika. Bild 5-2 beinhaltet Gegenüberstellungen unterschiedlicher Messwerte von Einzelentladekratern sowie deren Volumenanteile des herausgelösten und verdrängten Stahlwerkstückwerkstoffs. Bild 5-3 zeigt repräsentative REM-Aufnahmen der Einzelentladungen.

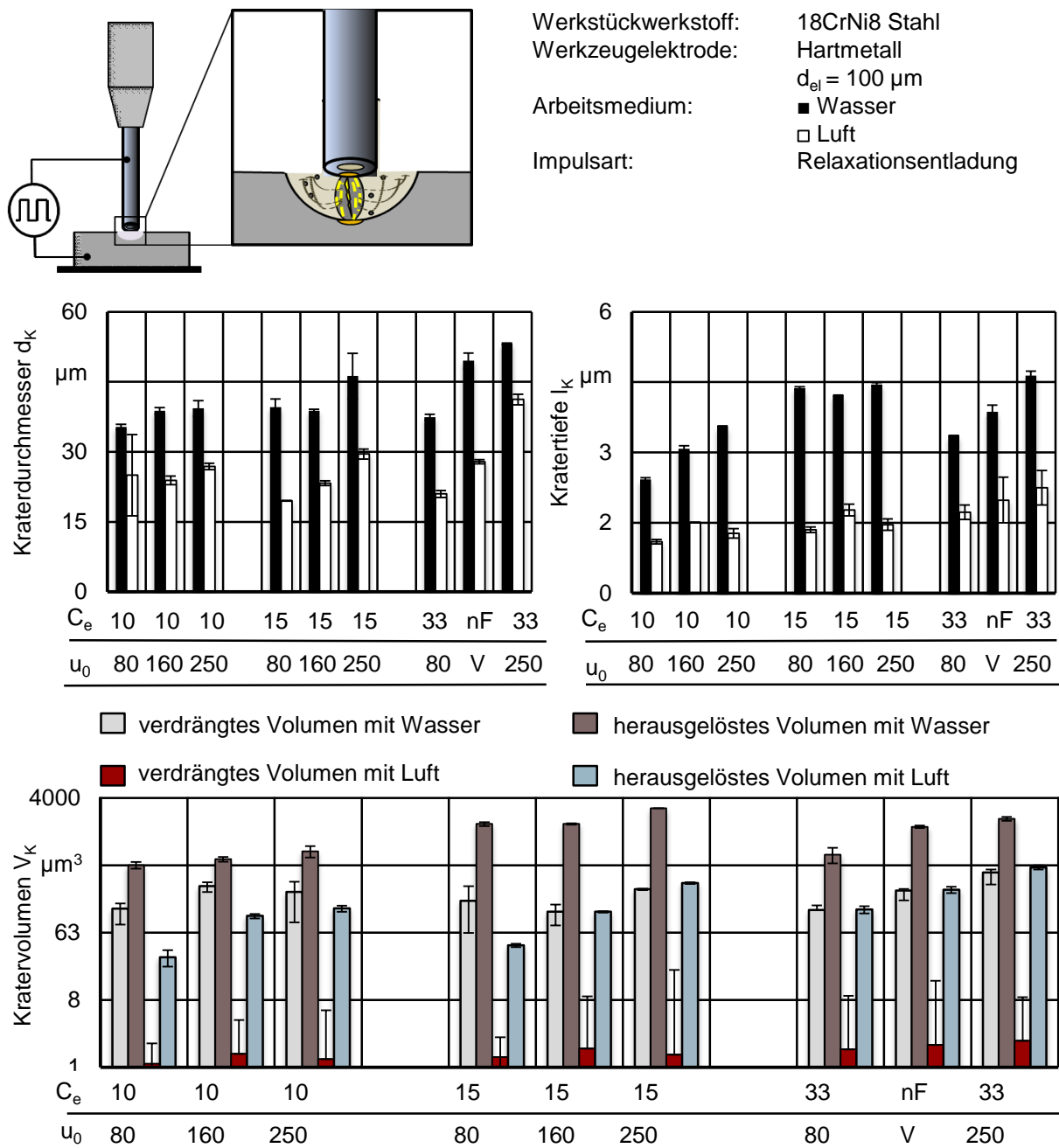


Bild 5-2: Messergebnisse der mittels Relaxationsentladungen hergestellten Einzelentladekrater in 18CrNi8 Stahl mit deionisiertem Wasser und Luft als Dielektrikum

Die Ergebnisse der Messung von Kraterdurchmesser d_k und -tiefe l_k zeigen, dass durch die Verwendung von deionisiertem Wasser als Dielektrikum gegenüber Luft höhere Werte bei

der Bearbeitung von Stahl erreicht werden. Insbesondere ist die Kratertiefe l_K um ein Vielfaches höher. Dies ist auf die unterschiedliche dynamische Viskosität η der Dielektrika zurückzuführen, welche für deionisiertes Wasser $\eta = 1,65 \text{ Ns/m}^2$ und für Luft $\eta = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ beträgt. Umso größer die dynamische Viskosität η des Arbeitsmediums, desto stärker die Einschnürung des Entladekanals und die damit einhergehende Energiedichte der Funkenentladung. Eine hohe Energiedichte führt zu einem stärkeren Einbrand in das Werkstück und somit zu einer zunehmenden Kratertiefe l_K . Des Weiteren entstehen durch den Einsatz von deionisiertem Wasser als Dielektrikum Entladekrater mit einem größeren Kraterdurchmesser d_K als unter Luft, was ebenfalls auf die höhere Energiedichte zurückzuführen ist. Diese bewirkt einen besseren Wärmeeintrag in das Werkstück, welche dort verteilt wird und zum Aufschmelzen sowie Verdampfen des Werkstückwerkstoffs führt.

Zudem erfolgen durch die Verwendung eines flüssigen Arbeitsmediums, nach Zusammenbruch des Entladekanals, ein Abschrecken und eine schockartige Verfestigung des aufgeschmolzenen Werkstoffs. Dies führt zur Bildung kugelförmiger Abtragpartikel, welche mit dem flüssigen Dielektrikum weggespült werden. Bei gasförmigen Arbeitsmedien wird dieser Effekt nicht realisiert, hier kommt es zur Ausbildung von kleinen Kratern mit Rückständen von wieder erstarrtem Werkstoff. In Bild 5-3 sind repräsentative Einzelentladekrater, erzeugt in Wasser, mit denen in Luft gegenübergestellt.

Die messtechnische Auswertung der Entladekrater zeigt, dass die Erhöhung der energetischen Prozessstellgrößen Entladekapazität C_e und Leerlaufspannung u_0 annähernd identische Auswirkungen auf den Kraterdurchmesser d_K haben. Bei der Erhöhung der Entladekapazität C_e erfolgt die Verlängerung der Entladedauer t_e , wodurch mehr Energie auf das Werkstück übertragen wird. Ferner führt eine längere Entladedauer t_e zu einer weiteren Ausbreitung des Entladekanals, wodurch größere Flächen des Werkstückwerkstoffs erwärmt und steigende Kraterdurchmesser d_K realisiert werden.

Unter deionisiertem Wasser ist dabei eine Erhöhung der Kratertiefe l_K zu beobachten. Bei Luft als Arbeitsmedium hingegen wird durch die Erhöhung der Leerlaufspannung u_0 und der Entladekapazität C_e keine relevante Änderung in der Kratertiefe l_K verwirklicht. Dies bedeutet, dass trotz eines höheren Spitzenstroms \hat{i} , welcher zu einem Anstieg der Stromdichte an den Fußpunkten führt, kein tieferer Einbrand in das Werkstück realisiert wird. Dies ist auf den geringen Umgebungsdruck p_0 des gasförmigen Dielektrikums zurückzuführen. Bei Flüssigkeiten wirkt dieser der Ausbreitung der Fußpunkte entgegen und verursacht eine Erhöhung der Energiedichte und des Werkstoffabtrags, welches bei Luft unzureichend realisiert wird.

Wesentliche Unterschiede im abgetragenen Volumen entstehen erst bei höherenergetischen Entladungen mit Entladekapazitäten $C_e \geq 15 \text{ nF}$ und Leerlaufspannungen $u_0 \geq 160 \text{ V}$. Bei einer Leerlaufspannung $u_0 = 80 \text{ V}$ sind keine systematischen Zusammenhänge zwischen dem Kratervolumen V_K und den Prozessstellgrößen ersichtlich. Wie Bild 5-1 zeigt, wird das Kratervolumen unterteilt in unteres Kratervolumen V_{Ku} aus herausgelöstem und oberes Kratervolumen V_{Ko} aus verdrängtem Werkstückwerkstoff. Anhand der in Bild 5-2 aufgeführten Volumenmessungen der Entladekrater wird ersichtlich, dass unter deionisiertem Wasser als Arbeitsmedium eine größere Differenz zwischen dem oberen Kratervolumen V_{Ko} und unteren Kratervolumen V_{Ku} existiert. Demzufolge wird unter flüssigem Dielektrikum mehr Werkstückwerkstoff vom Stahl abgetragen als unter Luft. Die Anteile des oberen Kratervolumens V_{Ko}

und somit der verdrängte, nicht abgetragene Werkstückwerkstoff weisen unter deionisiertem Wasser und Luft vergleichbare Werte auf.

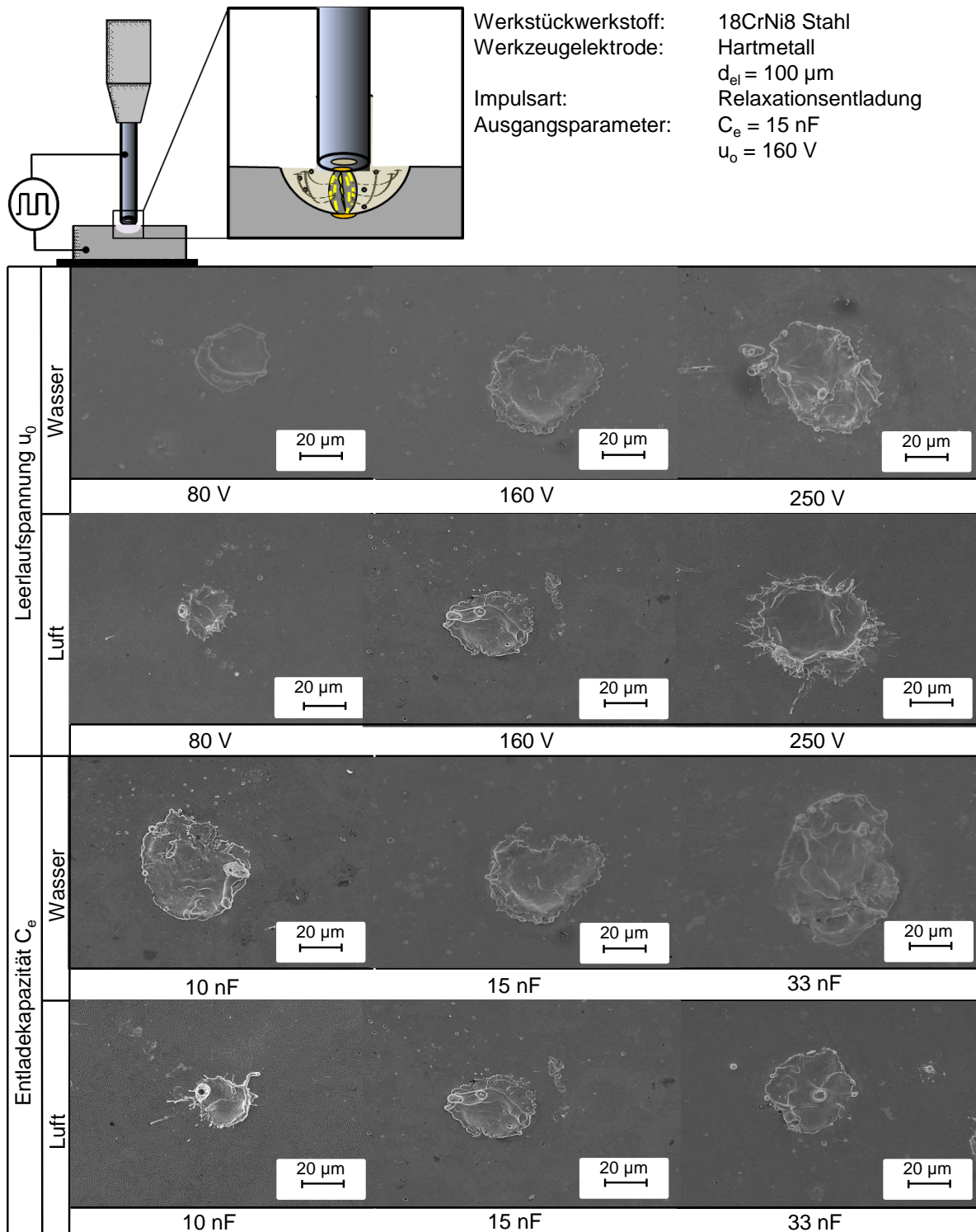


Bild 5-3: Gegenüberstellung Einzelentladekrater von Relaxationsentladungen in 18CrNi8 Stahl mit deionisiertem Wasser und Luft als Dielektrikum

Die Einzelentladekrater in dem Werkstückwerkstoff $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ zeigen starke Abweichungen von denen in Stahl. Dabei haben die Kraterdurchmesser d_K unter deionisiertem Wasser und Luft in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ vergleichbare Werte, sind jedoch deutlich kleiner zu denen in Stahl. Die Kratertiefen l_K weisen Werte von wenigen Mikrometern auf, bei Luft als Arbeitsmedium über-

wiegend unterhalb eines Mikrometers, Bild 5-4. Durch die Erhöhung der Leerlaufspannung u_0 und somit des Spitzenstroms \hat{i} erfolgt unter deionisiertem Wasser die Bildung tieferer Entladekrater bis zu drei Mikrometer.

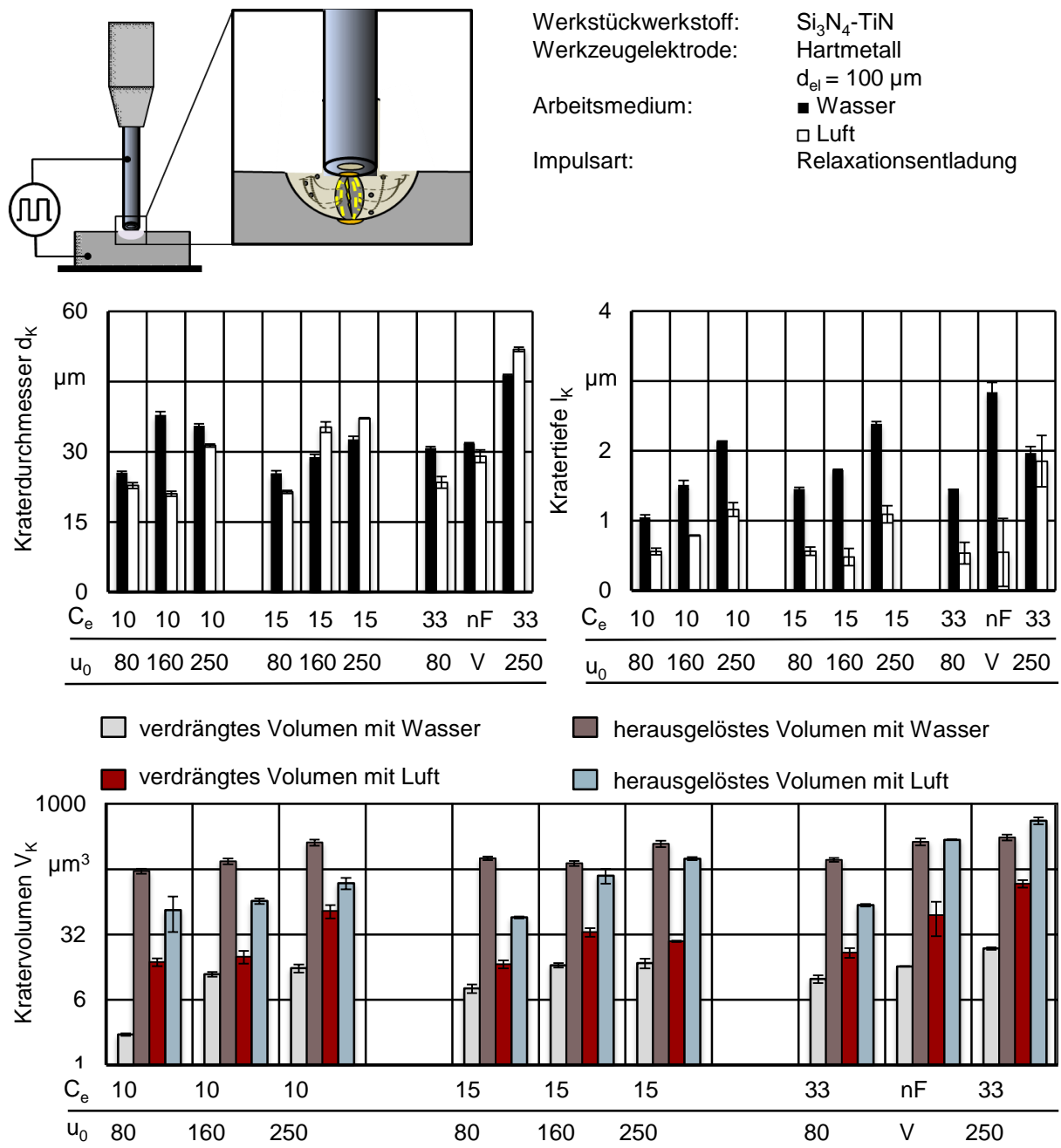


Bild 5-4: Messergebnisse der mittels Relaxationsentladungen hergestellten Einzelentladekrater in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit deionisiertem Wasser und Luft als Dielektrikum

In Bild 5-5 sind die Einzelentladekrater auf einem polierten $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ Werkstück, welche unter Luft und deionisiertem Wasser erzeugt wurden, gegenübergestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Einzelentladekrater aus aufgeschmolzener Werkstückoberfläche entstehen und keine kugelförmige Vertiefung wie beim Stahlwerkstoff aufweisen. Dies ist auf die Zusammensetzung des gesinterten $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ Werkstoffs zurückzuführen, welcher, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, aus unterschiedlichen Keramiken und Sinteradditiven besteht.

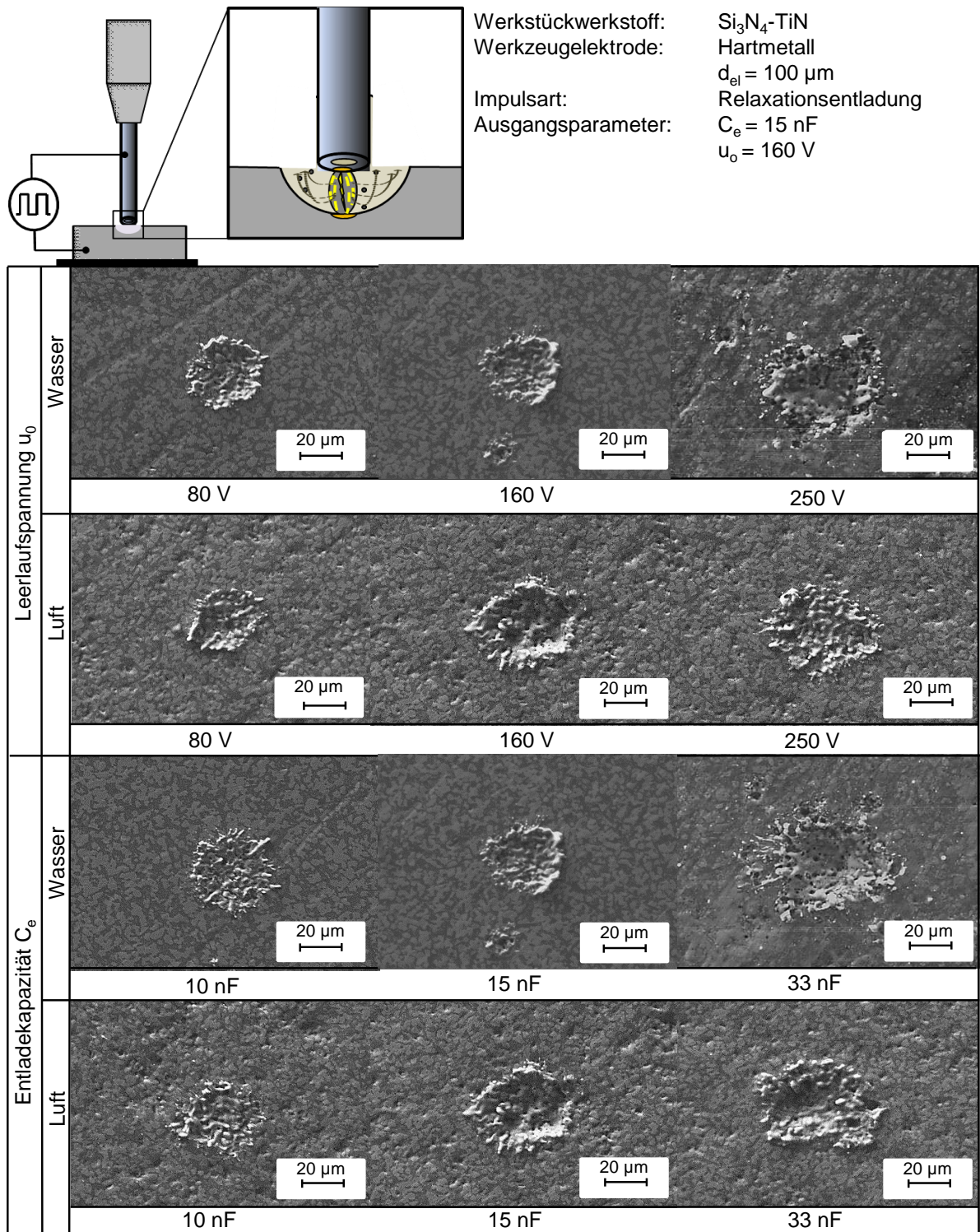


Bild 5-5: Gegenüberstellung Einzelentladekrater von Relaxationsentladungen in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit deionisiertem Wasser und Luft als Dielektrikum

Bei der Erwärmung der Werkstückoberfläche durch eine Funkenentladung erfolgt, je nach Sublimationspunkt und Schmelztemperatur T_s des jeweiligen Werkstoffbestandteils, eine Aufschmelzung oder Verdampfung. Durch die Aufschmelzung und Verdampfung vereinzelter Werkstückwerkstoffbestandteile bleiben Keramikkörner der thermisch unempfindlicheren Bestandteile zurück, welche mit verflüssigtem und wieder erstarrtem Werkstoff überzogen

sind. Hieraus entstehen die porös aussehenden Entladekrater, welche eine geringe Einbrandtiefe aufweisen.

Unter deionisiertem Wasser erfolgt eine stärkere Freilegung der Keramikkörner als unter Luft sowie ein tieferes Eindringen in das Werkstück. Dies ist eine Folge der hohen Kühlwirkung des deionisierten Wassers, was zu einem schockartigen Erstarren des aufgeschmolzenen Werkstoffs führt und somit dessen Anhaften auf der Krateroberfläche verhindert. Die entstehenden Abtragpartikel werden durch das flüssige Dielektrikum weggespült.

Bei Luft als Dielektrikum hingegen weisen die Einzelentladekrater eine glatte Oberfläche auf, verursacht durch aufgeschmolzenen Werkstoff, welcher nicht entfernt wird, sondern auf der Oberfläche wiedererstartet. Demzufolge ist der Volumenanteil des verdrängten Werkstoffs bei der Verwendung von Luft größer als bei der von deionisiertem Wasser, vgl. Gegenüberstellung in Bild 5-4.

Die Einzelentladungen zeigen, dass bei der funkenerosiven Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ der Werkstoffabtrag auf unterschiedlichen Effekten basiert, zurückzuführen auf die verschiedenen Werkstoffeigenschaften der Mischkeramik. Demzufolge ist davon auszugehen, dass bei Folgeentladungen während des funkenerosiven Bohrprozesses, neben Aufschmelz- und Verdampfungsvorgängen, ganze Keramikkörner herausgelöst werden.

Dies bestätigt die von LAUWERS ET AL. [LAU04] durchgeführten Beobachtungen – bei der funkenerosiven Bearbeitung von Mischkeramiken, im Speziellen von Siliziumnitrid Si_3N_4 und Titanitrid TiN als elektrisch leitfähige Phase, existieren drei Abtragmechanismen. Dabei sind Schmelz-, Oxidations- und Dekompositionsvorgänge sowie der Werkstoffabtrag über Thermoschock Bestandteil des Werkstoffabtrags.

Die in Bild 5-6 dargelegte messtechnische Auswertung der Einzelentladekrater auf einer TiB_2 Werkstückoberfläche zeigt deutliche Unterschiede gegenüber zu denen auf $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$. Dabei führen die auf TiB_2 erzeugten Entladungen zu einer größeren Differenz in den Kraterdurchmessern d_k beim Einsatz von Luft und deionisiertem Wasser als Dielektrikum, welche vergleichbar ist mit der in Stahl. Die unter deionisiertem Wasser hergestellten Entladekrater weisen einen bis zu doppelt so großen Kraterdurchmesser d_k als unter Luft auf, trotz gleicher Parameterkombination. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Erhöhung der Entladekapazität C_e und somit der Entladedauer t_e eine geringfügige Änderung des Kraterdurchmessers d_k bewirkt. Durch die Steigerung des Spitzenstroms \hat{i} erfolgt die Vergrößerung des Kraterdurchmessers d_k . Dieses Verhalten ist ebenfalls bei der Kratertiefe l_k , welche im Gegensatz zu der von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ größer ist, in den Bereichen für Luft von $1,3 \mu\text{m} \leq l_k \leq 2,5 \mu\text{m}$ und deionisiertem Wasser von $1,8 \mu\text{m} \leq l_k \leq 3,7 \mu\text{m}$ zu beobachten.

Wie oben beschrieben ist dieses Prozessverhalten auf die Energiedichte des Plasmakanals zurückzuführen. Beeinflusst wird es unter anderem durch die dynamische Viskosität η des Dielektrikums, die Auswirkungen auf die Einschnürung des Plasmakanals hat und durch den Entladestrom i_e . Des Weiteren haben Eigenschaften des zu bearbeitenden Werkstückwerkstoffs, wie beispielsweise der spezifische elektrische Widerstand ρ_{el} Einfluss auf den Energieumsatz. Dieser ist bei TiB_2 mit $\rho_{el} = 10 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$ gegenüber $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit $\rho_{el} = 2 \cdot 10^5 \Omega\text{cm}$ wesentlich geringer, wodurch eine höhere Entladeenergie, trotz gleicher Parameterkombination, umgesetzt wird.

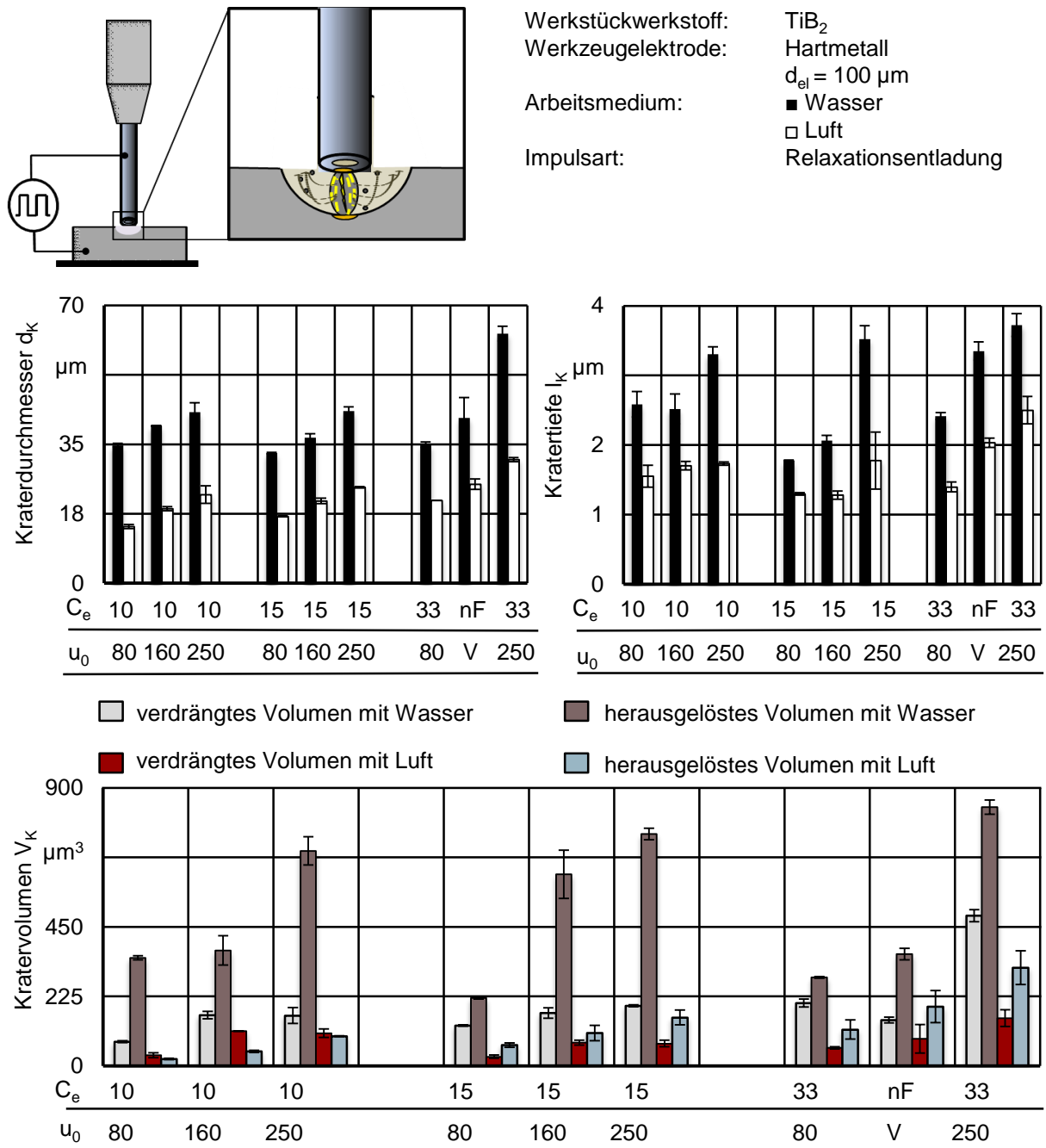


Bild 5-6: Messergebnisse der mittels Relaxationsentladungen hergestellten Einzelentladekrater in TiB_2 mit deionisiertem Wasser und Luft als Dielektrikum

Dem Kraterdurchmesser d_k und der -tiefe l_k entsprechend weisen die unter deionisiertem Wasser erzeugten Einzelentladekrater gegenüber denen von Luft deutlich höhere Volumina auf. Insbesondere der Anteil des herausgelösten Werkstückwerkstoffs und somit das untere Kraterolumen V_{Ku} ist um ein Vielfaches größer unter deionisiertem Wasser als unter Luft. Wie oben beschrieben, ist dies eine Folge der stärkeren Einschnürung des Plasmakanals, aus der eine höhere Energiedichte hervorgeht, und dem effizienteren Entfernen des aufgeschmolzenen Werkstückwerkstoffs durch die Kühlwirkung des flüssigen Dielektrikums. **Bild 5-7** zeigt eine Gegenüberstellung der Einzelentladekrater auf einer polierten TiB_2 Oberfläche, erzeugt unter den Arbeitsmedien Luft und deionisiertem Wasser.

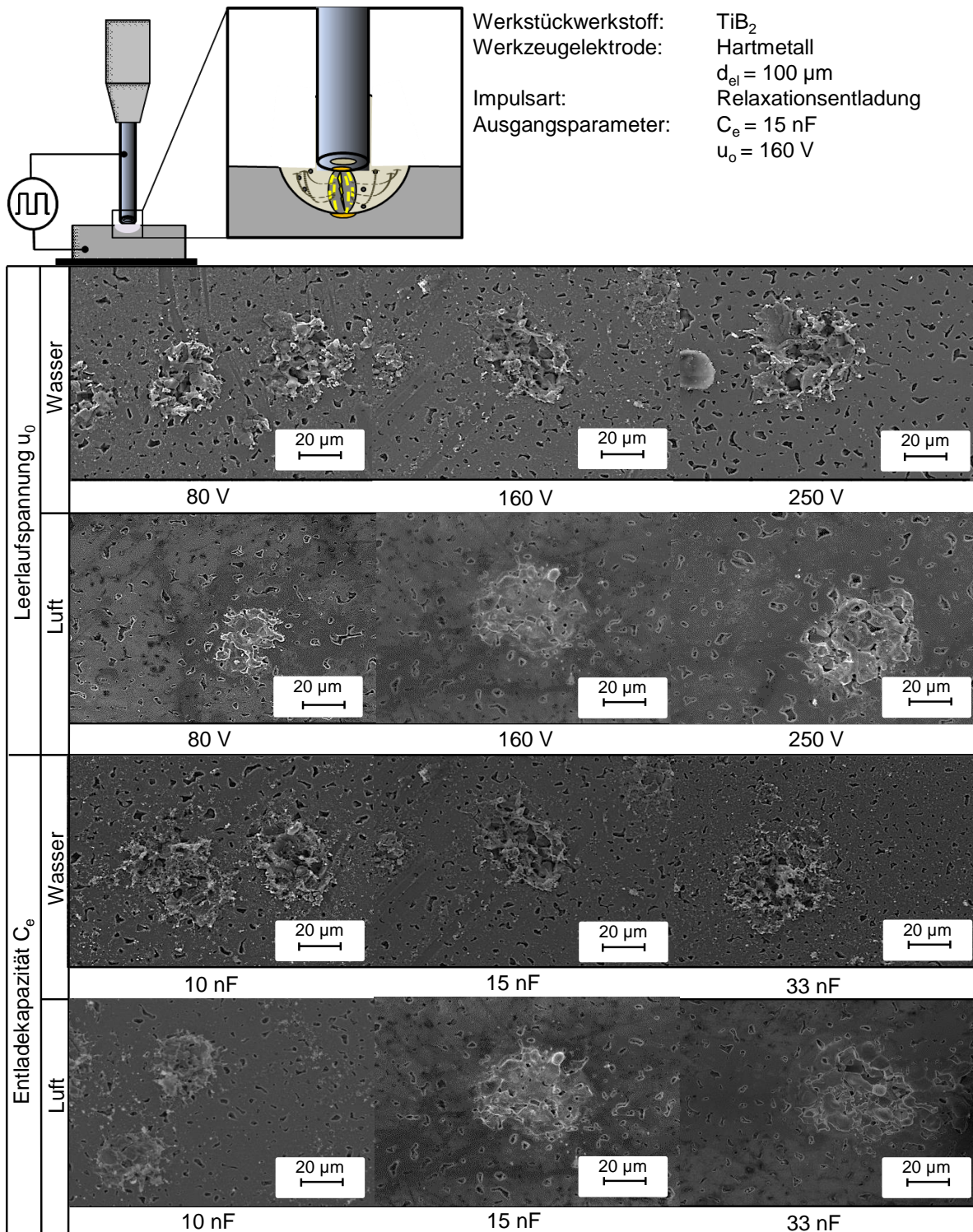


Bild 5-7: Gegenüberstellung Einzelentladekrater von Relaxationsentladungen in TiB_2 mit deionisiertem Wasser und Luft als Dielektrikum

Die unter dem Arbeitsmedium Luft hergestellten Entladekrater weisen, aufgrund der explosionsartigen Verteilung des aufgeschmolzenen Werkstückwerkstoffs, eine hohe Spritzerbildung und Anhaftung von Abtragpartikeln an der Werkstückoberfläche auf. Dabei erfolgt die Freilegung der Keramikkörner, welche einen äquivalenten Korndurchmesser d_v bis $d_v \leq 10 \mu\text{m}$ besitzen. Diese werden durch die Einzelentladungen, aufgrund des geringen Werkstoffabtrags, nicht herausgelöst.

Die Einzelentladungen unter deionisiertem Wasser hingegen haben eine glatte Krateroberfläche, zurückzuführen auf die schockartige Erstarrung des aufgeschmolzenen Werkstückwerkstoffs. Dabei werden die einzelnen Phasen des TiB_2 Gefüges miteinander verschmolzen. Beim Erstarren des flüssigen Werkstückwerkstoffs entstehen Mikrorisse in den Oberflächen der Entladekrater, welche auf eine Thermoschockwirkung hindeuten. Wie im Stand der Technik, Kapitel 2.4.2, beschrieben ist dies ein sekundärer Spalling-Effekt, zurückzuführen auf die Kühlwirkung des Dielektrikums, wodurch sehr kleine Bruchpartikel an der Oberfläche entstehen. Die Energie der Einzelentladung ist nicht ausreichend, um eine tief in das Werkstück eindringende Rissbildung zu verursachen und somit ganze Keramikkörner herauszulösen.

Anhand der Ergebnisse zu den Untersuchungen der Einzelentladungen werden folgende Erkenntnisse, welche für die trockenfunkenerosive Feinbohrbearbeitung der Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 genutzt werden, abgeleitet:

- Bei der Erhöhung der Entladekapazität C_e erfolgt die Verlängerung der Entladedauer t_e und des Entladestroms i_e wodurch mehr Energie auf das Werkstück übertragen wird. Eine längere Entladedauer t_e führt unter deionisiertem Wasser zu einer weiteren Ausbreitung des Entladekanals, welche die Erwärmung größerer Flächen des Werkstückwerkstoffs und steigende Kraterdurchmesser d_K zur Folge hat. Unter deionisiertem Wasser ist dabei eine Erhöhung der Kratertiefe l_K zu beobachten, da das flüssige Dielektrikum der Ausbreitung der Fußpunkte entgegenwirkt und eine Erhöhung der Energiedichte und des Werkstoffabtrags bewirkt. Bei Luft als Arbeitsmedium hingegen wird aufgrund der geringeren dynamischen Viskosität η durch die Erhöhung der Leerlaufspannung u_0 und der Entladekapazität C_e keine relevante Änderung in der Kratertiefe l_K realisiert. Dies bedeutet, dass trotz eines höheren Spitzenstroms \hat{i} und dem damit einhergehenden Anstieg der Stromdichte an den Fußpunkten, kein tieferer Einbrand in das Werkstück erfolgt.
- Bei deionisiertem Wasser kommt es, nach Zusammenbruch des Entladekanals, zu einer schockartigen Verfestigung des aufgeschmolzenen Werkstoffs. Dies führt zur Bildung kugelförmiger Abtragpartikel, welche mit dem flüssigen Dielektrikum weggespült werden. Bei dem Arbeitsmedium Luft hingegen wird der aufgeschmolzene Werkstoff nicht herausgespült und abgetragen sondern durch die auftretenden Prozesskräfte der Funkenentladung auf dem Werkstück verteilt. Demzufolge ist für die funkenerosive Bearbeitung mit gasförmigen Dielektrika ein kontinuierlicher Gasstrom an der Wirkstelle erforderlich, um den Werkstoffabtransport zu realisieren.
- Die Einzelentladekrater in dem Werkstückwerkstoff $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ weisen starke Abweichungen von denen in Stahl auf, was auf die Werkstoffzusammensetzung der Mischkeramik zurückzuführen ist. Je nach Sublimationspunkt und Schmelztemperatur T_s des jeweiligen Werkstoffbestandteils erfolgt dessen Aufschmelzung und Verdampfung. Teilweise bleiben einzelne thermisch unempfindlichere Bestandteile zurück, welche mit verflüssigtem und wiedererstartem Werkstoff überzogen sind. Hieraus entstehen porös aussehende Entladekrater mit einer geringen Kratertiefe l_K unterhalb eines Mikrometers.
- Bei TiB_2 erfolgt, im Gegensatz zu $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, aufgrund des geringeren spezifischen elektrischen Widerstands ρ_{el} , die Umsetzung einer höheren Entladeenergie trotz gleicher Parametereinstellungen. Die entstehenden Entladekrater auf TiB_2 zeigen vergleichbare Werte wie im Stahlwerkstoff. Dabei weisen entstehende Mikrorisse in den Oberflächen der Entladekrater auf eine Thermoschockwirkung, den Spalling-Effekt, hin. Die Energie der Ein-

zelentladung ist nicht ausreichend, um eine tief in das Werkstück eindringende Rissbildung zu verursachen und somit ganze Keramikkörner herauszulösen.

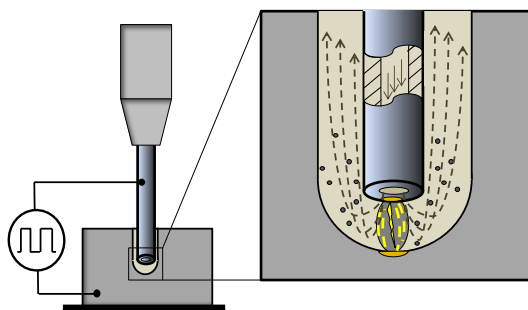
6 Einfluss von Prozessstellgrößen auf die Prozesskenngrößen und das Arbeitsergebnis

6.1 Effektanalyse der Prozessstellgrößen

6.1.1 Voruntersuchungen

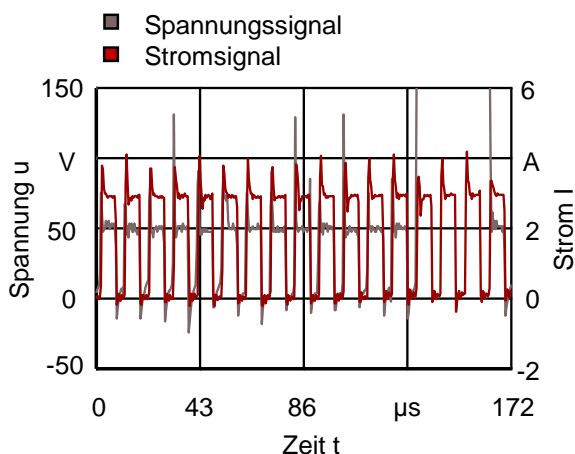
Ausgehend von den betrachteten Prozessstellgrößen der Einzelentladungen erfolgen erste Bohrversuche mit Folgeentladungen zur Evaluierung eines Betriebspunkts und die Erstellung eines Arbeitsplans auf deren Basis. Hierfür werden die in Tabelle 5-1 aufgeführten Prozessstellgrößen der Einzelentladeversuche während des funkenerosiven Feinbohrens, mittels Luft und deionisiertem Wasser als Dielektrikum in den Keramiken Si_3N_4 -TiN und TiB_2 , iterativ kombiniert und die Prozessparameter variiert sowie das Entladeverhalten analysiert. Das deionisierte Wasser dient dabei als Vergleichsmedium, um prozessentscheidende Unterschiede zwischen gasförmigen und flüssigen Arbeitsmedien festzustellen. Die Aufzeichnung der Strom- und Spannungsverläufe werden mittels eines digitalen Oszilloskops vom Typ TDS5032B der Firma TEKTRONIX AG realisiert.

Anhand der analytischen Prozessbetrachtung erfolgt eine Auswahl von Parameterkombinationen für die nachfolgende Entwicklung von Fertigungstechnologien des trockenfunkenerosiven Feinbohrens über die Selektion der entstehenden Entladebilder. Kriterium für die Verwendung der Parameterkombination ist dabei die Prozessgüte der aufeinander folgenden Funkenentladungen. Bild 6-1 zeigt Strom- und Spannungsverläufe eines stabilen und instabilen Erosionsprozesses.



Werkstückwerkstoff: Si_3N_4 -TiN
 Werkzeugelektrode: Hartmetall
 $d_{el} = 300 \mu\text{m}$
 Arbeitsmedium: deionisiertes Wasser
 Impulsart: Relaxationsentladung
 Technologie: $C_e = 15 \text{ nF}$
 $u_0 = 150 \text{ V}$

stabiler Erosionsprozess



instabiler Erosionsprozess

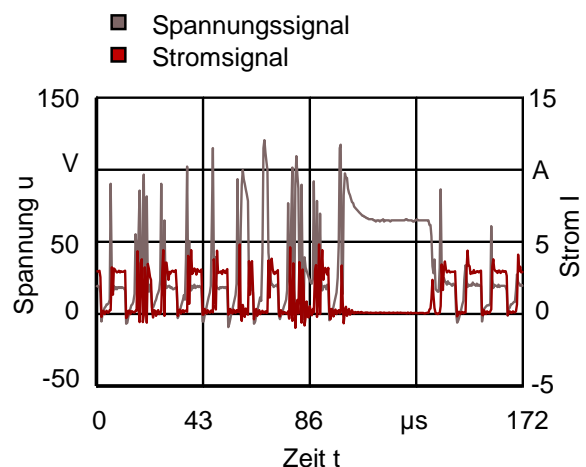


Bild 6-1: Spannungs- und Stromverläufe mit unterschiedlichen Prozessgüten

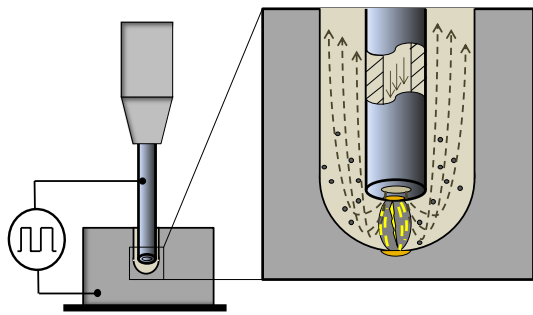
Eine hohe Prozessgüte ist durch ein gleichmäßiges Entladebild aufeinander folgender Strom- und Spannungsverläufe gekennzeichnet. Das Entladebild eines instabilen Erosionsprozesses hingegen weist Unregelmäßigkeiten in den zu erreichenden Spannungs- und Stromspitzen sowie in den Impulsdauern t_i auf.

Eine Parameterkombination die eine hohe Prozessgüte mit geringen Anzahlen von Fehl- und Kurzschlussentladungen aufweist, wird als Betriebspunkt für die Erstellung eines Versuchsplans verwendet.

Die Strom- und Spannungsverläufe sind bei den Einzelentladeversuchen, zur Gewährleistung der Einstellparameter, durch eine vollständige Aufladung der Kondensatoren aufgezeichnet worden. Dabei zeigen die Arbeitsspalte zwischen den Werkzeugelektroden und den Werkstücken bei jeder Entladung annähernd Idealbedingungen. Aufeinander folgende Funkenentladungen bewirken eine Änderung der Bedingungen im Arbeitsspalt, zurückzuführen auf die Spaltkontamination durch Abtragpartikel. Diese haben die Abweichung der Durchschlagsfestigkeit E_D vom Idealzustand zur Folge, was zu einer frühzeitigen Entladung der Kondensatoren führt [PIL07].

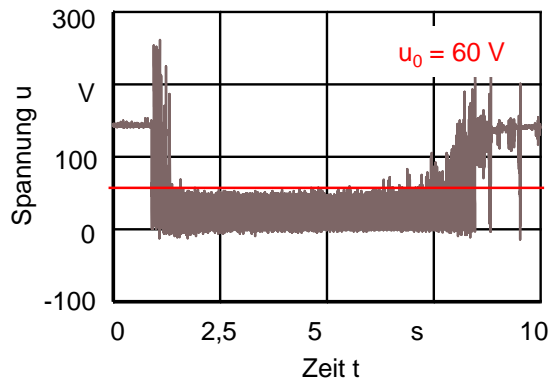
Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse zum Abtragverhalten bei Einzelentladungen auf das Erosionsverhalten von Folgeentladungen und somit auf den Feinbohrprozess ist eingeschränkt möglich. Neben den Auswirkungen des Arbeitsmediums auf das Abtragverhalten, aufgrund des differenzierten Umgebungsdrucks p_0 und der Kühlwirkung, beeinflusst dieses das Entladeverhalten der Kondensatoren.

Die Spannungsverläufe der Relaxationsentladungen weisen unter Luft als Dielektrikum, im Gegensatz zu deionisiertem Wasser, bei eingestellten Leerlaufspannungen u_0 $60 \text{ V} \leq u_0 \leq 250 \text{ V}$ einen Maximalwert von $u_0 = 60 \text{ V}$ auf. Dies ist auf eine frühzeitige Entladung der Kondensatoren, infolge der geringen Durchschlagsfestigkeit E_D von Luft mit $E_D = 3,3 \text{ kV/mm}$, im Gegensatz zu der von deionisiertem Wasser mit $E_D = 65 \text{ kV/mm}$, zurückzuführen. Daher kann beim trockenfunkenerosiven Feinbohren unter Luft als Dielektrikum durch den Einsatz von Kondensatorkapazitäten $C_e \geq 33 \text{ nF}$ oder durch das Anlegen einer Leerlaufspannung $u_0 \geq 100 \text{ V}$ keine Steigerung des Energieumsatzes erreicht werden. Bild 6-2 zeigt den Strom- und Spannungsverlauf aufeinander folgender Funkenentladungen unter Luft und deionisiertem Wasser als Dielektrikum, welche mit gleichen Parameterkombinationen aufgezeichnet sind.



Werkstückwerkstoff: $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$
 Werkzeugelektrode: Hartmetall
 $d_{\text{el}} = 300 \mu\text{m}$
 Arbeitsmedium: Luft und deionisiertes Wasser
 Impulsart: Relaxationsentladung
 Technologie: $C_e = 15 \text{ nF}$
 $u_0 = 150 \text{ V}$

Arbeitsmedium: Luft



Arbeitsmedium: deionisiertes Wasser

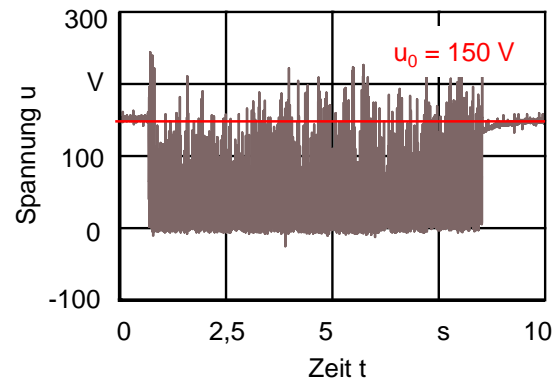


Bild 6-2: Gegenüberstellung der Spannungsverläufe beim funkenerosiven Feinbohren mit Luft und deionisiertem Wasser als Arbeitsmedium

Die in den Spannungsverläufen eingezeichneten Markierungslinien zeigen die erreichten Spannungswerte bis zur Entladung der Kondensatoren. Bei Luft als Arbeitsmedium wird trotz einer eingestellten Leerlaufspannung $u_0 = 150 \text{ V}$ ein Maximalwert von $u_0 = 60 \text{ V}$ erreicht, bei deionisiertem Wasser hingegen stimmen die Werte mit den Parameterkombinationen annähernd überein. Demzufolge weisen die Entladungen unter flüssigen Arbeitsmedien höhere Energien auf als unter gasförmigen.

Die Folgeentladungen des Relaxationsgenerators zeigen eine hohe Prozessgüte ohne Kurzschlussentladungen, dies ist auf die geringe Viskosität von Luft und die hohen Strömungsgeschwindigkeiten im Arbeitsspalt zurückzuführen. Hierdurch werden bessere Spülbedingungen im Vergleich zu flüssigen Dielektrika erreicht und dem Entstehen von Partikelbrücken entgegenwirkt.

6.1.2 Versuchsvorbereitung

Im Fokus der nachfolgenden Untersuchungen steht die Identifikation der Haupteffekte technologisch relevanter Prozessstellgrößen eines getakteten Relaxationsgenerators für die trockenfunkenerosive Feinbohrbearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 mit Luft als Dielektrikum. Diese Erkenntnisse tragen zum Verständnis des Erosionsverhaltens unter gasförmigen Dielektrika bei und bilden die Grundlage für die Entwicklung prozesssicherer Fertigungstechnologien.

Es werden Untersuchungen mit energiebeeinflussenden Prozessstellgrößen und dem Spüldruck, unter konstanten Regelstellgrößen, systematisch nach Methoden der statistischen Versuchsplanung (engl. DoE, Design of Experiments) durchgeführt und ausgewertet. DoE wird angewendet für die Optimierung von Prozessen durch die Erfassung von deren Steuer-,

Störgrößen und Eigenschaften [KLE07]. Nachfolgend werden die betrachteten Prozessstellgrößen als Faktoren bezeichnet, da dies dem Sprachgebrauch der angewendeten Methode entspricht.

Es erfolgt die Betrachtung der Faktoren

- Leerlaufspannung u_0 ,
- Entladekapazität C_e ,
- Spüldruck p_s ,
- Einschaltdauer t_{on} und
- Ausschaltdauer t_{off} .

Dabei werden die Haupteffekte der einzelnen Faktoren durch eine Gegenüberstellung der Bearbeitungsergebnisse auf folgende Zielgrößen betrachtet und ausgewertet:

- Erodierzeit t_{ero} für die Fertigung einer 1 mm tiefen Durchgangsbohrung
- relativer Elektrodenverschleiß ϑ
- oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo} am Bohrungseintritt
- unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu} am Bohrungsausritt
- arithmetischer Mittenrauwert der Profilordinate R_a an der Bohrungswand

Die Versuchsdurchführung erfolgt nach teilfaktoriellen Versuchsplänen erster Ordnung zur Reduzierung des Aufwands gegenüber einer vollfaktoriellen Untersuchung. Dabei werden die Faktoren, die einen signifikanten Einfluss auf die Zielgrößen haben, identifiziert und lineare funktionale Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen dargestellt. Da die Wechselwirkungen der Faktoren für die Untersuchungen nicht relevant sind, erfolgt eine starke Reduzierung des Versuchsumfangs ohne die Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu beeinflussen.

Beispielsweise hat ein vollfaktorieller Versuchsplan mit fünf Faktoren n und zwei Faktorstufen k einen Umfang von $k^n = 2^5 = 32$ Parameterkombinationen. Durch die Reduzierung der Faktoren um die Zahl m , beispielsweise $m = 2$, wird der Versuchsumfang auf $k^{n-m} = 2^{5-2} = 8$ Parameterkombinationen herabgesetzt. Es werden Wechselwirkungen zweifacher und höhere Ordnung soweit mit Faktoren vermengt und die Ergebnisse verfälscht, dass sie nicht mehr aussagekräftig sind.

Die für den Versuchsplan verwendeten Faktoren mit der unteren und oberen Faktorstufe sind in Tabelle 6-1 sowie in dem daraus gebildeten Versuchsplan in Tabelle 6-2 aufgelistet. Dabei erfolgt die Festlegung der Faktorstufen in der Form, dass hohe Abtragraten V_W bei geringem relativen Elektrodenverschleiß ϑ erzielt werden.

Tabelle 6-1: Einteilung der Faktorstufen zur Ermittlung der Haupteffekte technologierelevanter Prozessstellgrößen

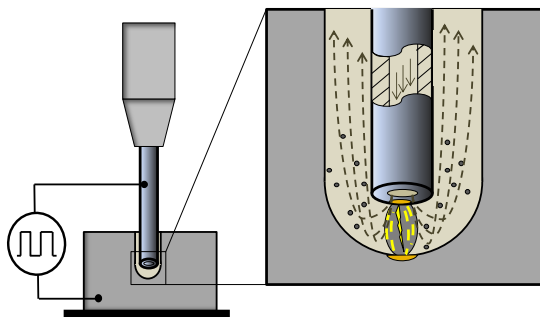
Faktoren	Einheit	untere Faktorstufe	obere Faktorstufe
Leerlaufspannung u_0	V	60	100
Entladekapazität C_e	nF	10	15
Spüldruck p_s	bar	60	80
Einschalt-dauer t_{on}	μs	4,2	8,7
Ausschalt-dauer t_{off}	μs	8,7	13

Tabelle 6-2: Versuchsplan zur Ermittlung der Haupteffekte technologierelevanter Prozessstellgrößen

Technologie	Entladekapazität C_e	Einschalt-dauer t_{on}	Ausschalt-dauer t_{off}	Spüldruck p_s	Leerlaufspannung u_0
1	10 nF	4,2 μs	8,7 μs	80 bar	100 V
2	15 nF	4,2 μs	8,7 μs	60 bar	60 V
3	10 nF	8,7 μs	8,7 μs	60 bar	100 V
4	15 nF	8,7 μs	8,7 μs	80 bar	60 V
5	10 nF	4,2 μs	13 μs	80 bar	60 V
6	15 nF	4,2 μs	13 μs	60 bar	100 V
7	10 nF	8,7 μs	13 μs	60 bar	60 V
8	15 nF	8,7 μs	13 μs	80 bar	100 V

6.1.3 Bohrungsqualität und Prozessverhalten

Die Erosionsergebnisse der in Tabelle 6-1 aufgeführten Technologien für das trockenfunkenerosive Feinbohren von Si_3N_4 -TiN und TiB_2 sind in Bild 6-3 dargestellt. Hinsichtlich ihres Prozessverhaltens zeigen die bearbeiteten Keramiken deutliche Unterschiede. Mit einer durchschnittlichen Erosionsdauer von $t_{ero} = 203$ s und einem relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta > 100$ % für die Bearbeitung von TiB_2 ist diese gegenüber der von Si_3N_4 -TiN mit $t_{ero} = 20$ s und $\vartheta < 20$ % wesentlich höher. Ursachen hierfür sind die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften (vgl. Tabelle 4-2). TiB_2 weist eine Schmelztemperatur T_s von $T_s = 3243$ K und eine Wärmeleitfähigkeit λ von $\lambda = 96$ W/mK auf. Diese Werte sind wesentlich höher als die von Si_3N_4 -TiN mit $T_s = 2151$ K und $\lambda = 30$ W/mK. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, sind diese Eigenschaften entscheidend für das Abtragverhalten eines Werkstoffs mit Funkenentladungen. Mit steigender Schmelztemperatur T_s ist ein höherer Energieeintrag erforderlich, um einen Abtrag durch Aufschmelzen und Herauslösen flüssigen Werkstoffs zu realisieren. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit λ wirkt dem Ausschmelzvorgang zusätzlich entgegen – durch die Wärmeabfuhr in das Werkstück kommt es zur Reduzierung der mittleren kinetischen Energie der Werkstoffmoleküle. Folg daraus ist eine geringere Abtragrate V_w bei der funkenerosiven Bearbeitung, mit gleichen energetischen Parametereinstellungen, von TiB_2 gegenüber Si_3N_4 -TiN.



Werkstückwerkstoff: ■ $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$
 □ TiB_2
 Werkzeugelektrode: Hartmetall
 $d_{el} = 300 \mu\text{m}$
 $l_b = 1 \text{ mm}$
 Durchgangsbohrung:
 Arbeitsmedium: Luft
 Technologie: Tabelle 6-2
 Impulsart: Relaxationsentladung

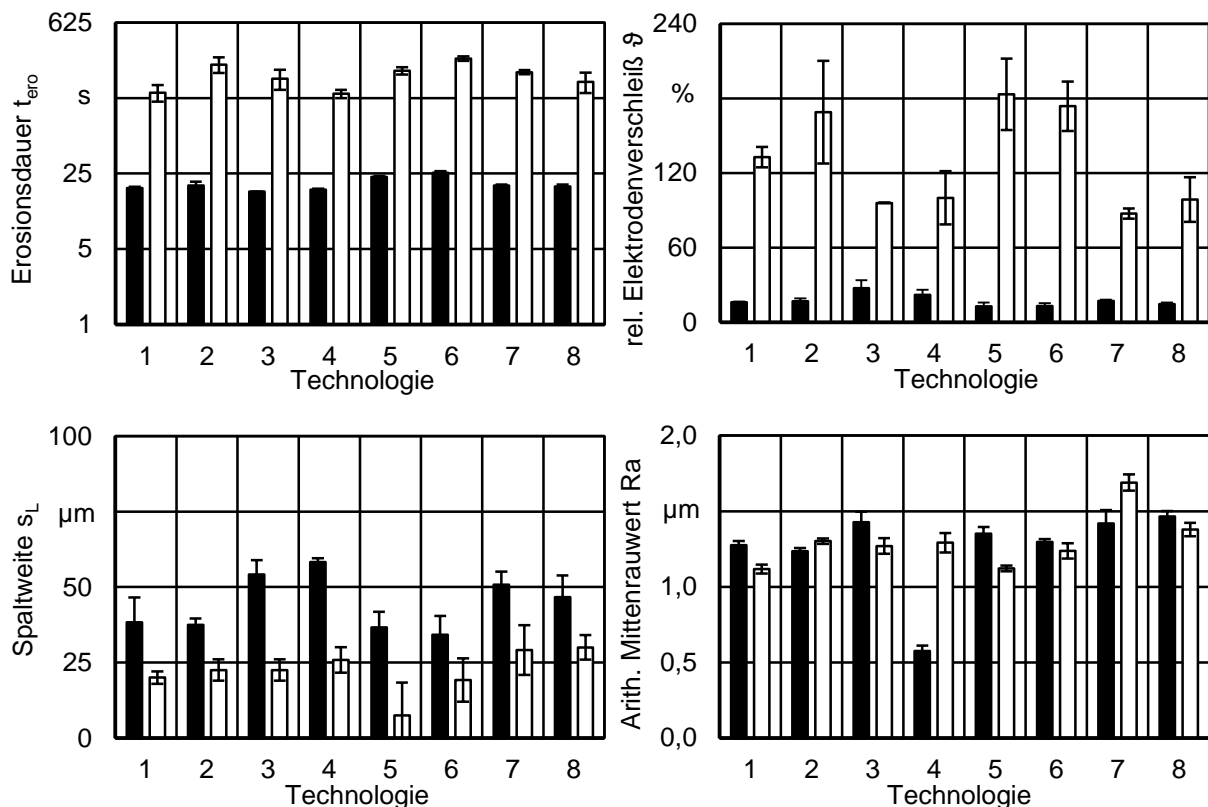


Bild 6-3: Einfluss unterschiedlicher Technologien (Tabelle 6-2) auf Zielgrößen Erosionsdauer t_{ero} , Spaltweite s_L , relativer Elektrodenverschleiß ϑ und arithmetischer Mittenrauwert Ra

Der hohe relative Elektrodenverschleiß ϑ bei der Bearbeitung von TiB_2 resultiert aus der langen Eingriffszeit der Werkzeugelektrode im Werkstück. Damit einher gehen Passiventladungen, welche zwischen den Mantelflächen der Werkzeugelektrode und Bohrung stattfinden, die zu einer kontinuierlichen Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers führen. Verstärkt treten die Passiventladungen bei einem hohen relativen Elektrodenverschleiß ϑ auf, da die Konzentration der Abtragpartikel im Arbeitsspalt zunimmt und elektrisch leitende Partikelbrücken bildet.

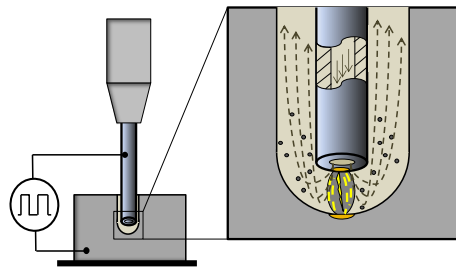
Der Zusammenhang der Spaltweite s_L , welche aus dem Mittelwert des oberen oder unteren Bohrungsdurchmessers sowie dem Elektrodendurchmesser berechnet wird, vom relativen Elektrodenverschleiß ϑ , ist in Bild 6-3 bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ zu erkennen. Technologien mit hohen Verschleißraten weisen ebenfalls größere Spaltweiten s_L auf, vgl. Technologie 3.

Bei TiB_2 hingegen sind keine Zusammenhänge zwischen Eingriffszeit t_{ero} und Spaltweite s_L bzw. relativem Elektrodenverschleiß ϑ und Spaltweite s_L ersichtlich. Bei der Bearbeitung von TiB_2 mit der Technologie 5 kann trotz einer Bearbeitungsdauer von $t_{\text{ero}} = 223$ s und einem relativen Elektrodenverschleiß von $\vartheta = 183$ % die geringste Spaltweite mit $s_L = 8$ μm erreicht werden.

Der geringe Werkstoffabtrag bei TiB_2 ist eine Folge des Spalling-Effekts, bei dem der Werkstückwerkstoff nicht aufgeschmolzen, sondern ganze Werkstoffpartikel herausgelöst werden. GADALLA und PETROFES [GAD88, PET88] zeigen in ihren Untersuchungen, dass der Werkstoffabtrag bei thermoschockempfindlichen Keramiken nicht auf Aufschmelz- und Verdampfungsvorgängen basiert. Der Werkstoffabtrag erfolgt durch das Ausbrechen ganzer Keramikkörner.

Wie aus dem aufgeführten Stand der Technik, Kapitel 2.4.2, hervorgeht, entsteht der Spalling-Effekt bei der Bearbeitung von Werkstoffen, die einen hohen Schmelzpunkt T_S und Wärmeausdehnungskoeffizienten α sowie eine geringe Wärmeleitfähigkeit λ_W aufweisen. Zudem sind große Prozessenergien erforderlich, um die Thermoschockwirkung zu verursachen. Bei der Bohrbearbeitung entsteht an der Stirnseite der Werkzeugelektrode, aufgrund der axialen Vorschubrichtung, die höchste Energiedichte, welche hauptsächlich zum Werkstoffabtrag beiträgt. Die an der Mantelfläche der Werkzeugelektrode herrschende Energiedichte ist aufgrund der Verteilung der einzelnen Entladungen nicht ausreichend, um ganze Werkstoffpartikel des TiB_2 herauszulösen. Demzufolge sind die geringen Spaltweiten s_L , trotz hohen relativen Elektrodenverschleißes ϑ und langer Eingriffszeiten der Werkzeugelektrode, eine Ursache des Spalling-Effekts.

Bild 6-4 zeigt Mikrobohrungen mit vergrößerten Aufnahmen der Bohrungsränder, die mit der Technologie 5 in TiB_2 und $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ gefertigt wurden. Die Ränder der Bohrungen in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ säumen aufgeschmolzene Ablagerungen des Werkstückwerkstoffs, zurückzuführen auf den klassischen Abtrag durch Aufschmelzen des Werkstückwerkstoffs. Hingegen sind bei den Bohrungen in TiB_2 nur geringfügige Mengen aufgeschmolzenen Werkstoffs zu erkennen.



Werkstückwerkstoff: $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$,
 TiB_2
 Werkzeugelektrode: Hartmetall
 $d_{\text{el}} = 300 \mu\text{m}$
 Durchgangsbohrung: $l_b = 1 \text{ mm}$
 Arbeitsmedium: Luft
 Technologie: Technologie 5
 Impulsart: Relaxationsentladung

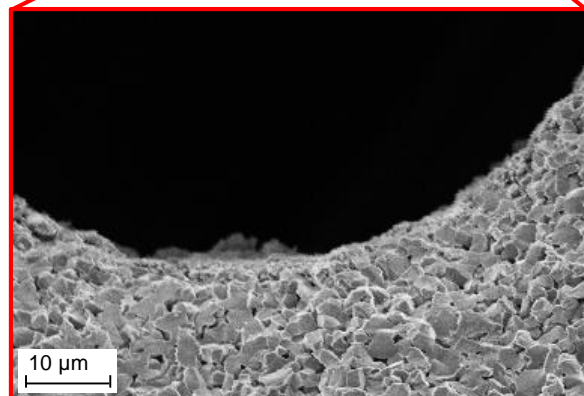
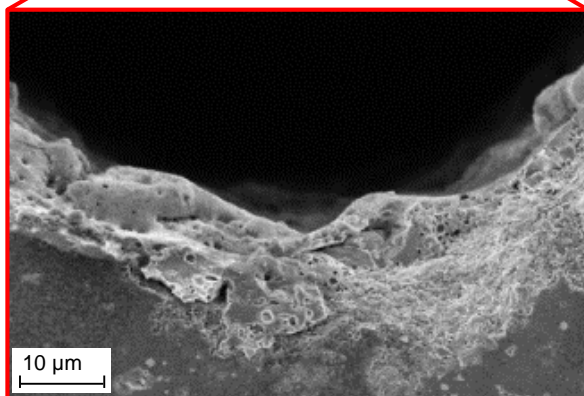
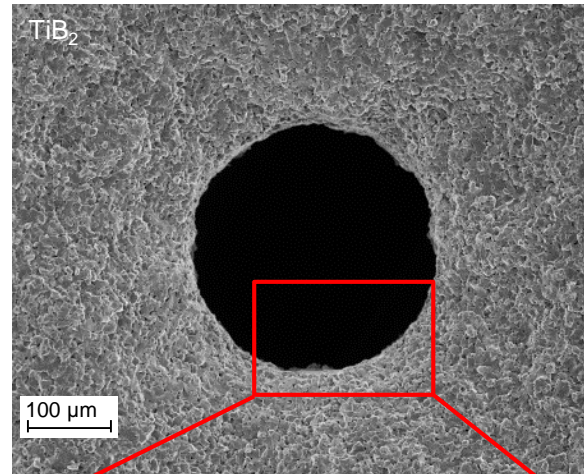
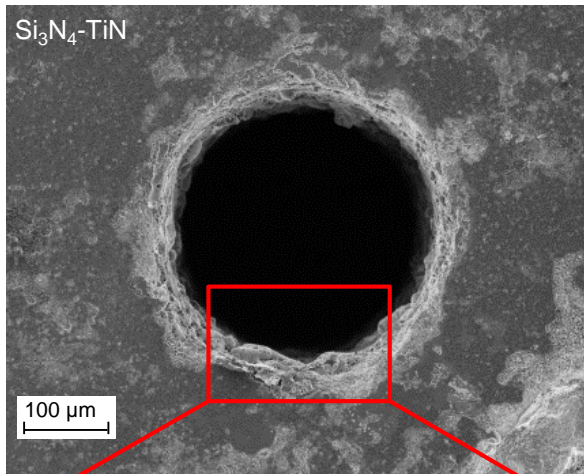


Bild 6-4: Mikrobohrungen einschließlich vergrößerter Aufnahme des Bohrungsrandes in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 mit Luft als Dielektrikum

An den Mantelflächen der gefertigten Bohrungen in TiB_2 und $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ wurden die arithmetischen Mittenrauwerte der Profilordinaten R_a gemessen. Diese weisen bei allen Technologien Werte im Bereich von $1 \mu\text{m} < R_a \leq 1,5 \mu\text{m}$ auf. Ausgenommen davon sind die Technologie 4 bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ sowie die Technologie 7 bei TiB_2 mit $R_a > 1,5 \mu\text{m}$, Bild 6-3. Um einen Zusammenhang der Parametereinstellungen der Technologie 4 und 7 mit den Abweichungen der Oberflächengüte herzustellen, ist die Auswertung der Haupteffekte der Einstellfaktoren erforderlich.

In Tabelle 6-3 sind alle ermittelten Haupteffekte für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 des trockenfunkenrosiven Feinbohrrens mit Luft als Dielektrikum zusammengefasst. Die Übersicht beinhaltet die prozentuale Veränderung der Zielgrößen bei einer Steigerung der Faktoren von der unteren auf die obere Faktorstufe. Des Weiteren ist mit farbigen Pfeilen gekennzeichnet, ob der Effekt eine positive oder negative Wirkung auf die Zielgröße bewirkt. Die Anzahl der Pfeile beschreibt die Signifikanzgrenze des Effekts in Abhängigkeit vom Vertrauensbereich.

Tabelle 6-3: Übersicht der Haupteffekte beim trockenfunkenerosiven Feinbohren mit Luft als Dielektrikum

Faktor	Erodierzeit t_{ero}	relativer Elektrodenverschleiß ϑ	oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}	mittlere Rauheit Ra
Si₃N₄-TiN					
Kapazität C_e 10 nF → 15 nF	— 4 %	— -10 %	— -1 %	— 0 %	↑↑↑ -18 %
Ontime t_{on} 4,2 μs → 8,7 μs	↑↑↑ -17 %	↓↓↓ 32 %	↓↓↓ 10 %	↑↑ 6 %	↑ -5 %
Offtime t_{off} 8,7 μs → 13 μs	↓↓↓ 18 %	↑↑↑ -36 %	— -0 %	↓↓ -5 %	↓↓↓ 20 %
Spüldruck p_s 60 bar → 80 bar	— -3 %	— -13 %	— -2 %	— 3 %	↑↑↑ -14 %
Leerlaufspannung u_0 60V → 100V	— 0 %	— 3 %	— -1 %	— -2 %	↓↓↓ 18 %
TiB₂					
Kapazität C_e 10 nF → 15 nF	— 11 %	— 8 %	— 3 %	— 2 %	— 0 %
Ontime t_{on} 4,2 μs → 8,7 μs	↑↑ -23 %	↑↑↑ -53 %	— -1 %	↑↑↑ 14 %	↓↓↓ 16 %
Offtime t_{off} 8,7 μs → 13 μs	↓↓ 23 %	— 9 %	— -0 %	— -2 %	↓↓↓ 9 %
Spüldruck p_s 60 bar → 80 bar	↑↑↑ -34 %	— -2 %	— -0 %	— -3 %	↑↑↑ -11 %
Leerlaufspannung u_0 60V → 100V	— -5 %	— -7 %	— -1 %	— 4 %	↑↑↑ -8 %

Tabelle 6-4 gibt eine Übersicht zur Einteilung der Haupteffekte in Tabelle 6-3 sowie für die folgenden Haupteffektanalysen.

Tabelle 6-4: Legende für die Einteilung der Haupteffekte

Signifikanzgrenzen	Vertrauensbereich	Kennzeichnung	
		positiv	negativ
keine Signifikanz	< 95 %	—	—
geringe Signifikanz	≥ 95 % bis < 99 %	↑	↓
mittlere Signifikanz	≥ 99 % bis < 99,9 %	↑↑	↓↓
hohe Signifikanz	≥ 99,9 %	↑↑↑	↓↓↓

Die Kapazität C_e ist eine energiebeeinflussende Prozessstellgröße, welche die Entladedauer t_e in Abhängigkeit vom Entladestrom i_e vorgibt [LAN15]. Eine Erhöhung der Kapazität C_e beim funkenerosiven Feinbohren unter deionisiertem Wasser führt zu einer Verlängerung der Entladedauer t_e und somit zu einer Steigerung der Energie pro Einzelentladung, wodurch mehr Werkstoffvolumen abgetragen wird, vgl. Kapitel 5. Dies führt zur Erhöhung der Abtragrate und zu einer stärkeren thermischen Belastung der Werkzeugelektrode und somit zu einer Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} und Steigerung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ [LAN15].

Hingegen zeigen die Ergebnisse für das trockenfunkenerosive Feinbohren in Tabelle 6-3, dass die Erhöhung der Kapazität C_e keinen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis besitzt. Eine Ausnahme bildet der Einfluss auf die Oberflächenrauheit bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, die höchstsignifikant um 18 % reduziert wird. Ein ähnliches Ergebnis tritt auf bei der Änderung der Leerlaufspannung u_0 von $u_0 = 60 \text{ V}$ auf $u_0 = 100 \text{ V}$, welche ebenfalls den Energiegehalt der einzelnen Entladungen über den maximal zu erreichenden Entladestrom i_e regelt. Genauso wie die Kapazität hat die Leerlaufspannung einen hoch signifikanten Einfluss auf die Oberflächengüte. Bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ führt diese zu einer Erhöhung des arithmetischen Mittenrauwerts der Profilordinate R_a um 18 %, hingegen bei TiB_2 zu einer Reduzierung um 8 %, was auf die Tiefe der Einzelentladungen zurückzuführen ist, vgl. Kapitel 5.2.

Dass die energiebeeinflussenden Prozessstellgrößen Kapazität C_e und Leerlaufspannung u_0 beim trockenfunkenerosiven Feinbohren keinen Einfluss auf den Bearbeitungsprozess haben, ist auf die Durchschlagsfestigkeit E_D von Luft zurückzuführen. Wie anhand der Voruntersuchungen belegt, kann die Bereitstellung einer größeren Entladekapazität C_e aufgrund einer unvollständigen Aufladung des Kondensators nicht ausgenutzt werden. Die Ladung des Kondensators erfolgt bis zu einer Durchschlagsspannung $u_d = 60 \text{ V}$, bei der es zu einer frühzeitigen Entladung kommt, unabhängig von der darüber hinaus eingestellten Leerlaufspannung u_0 .

Die Ergebnisse der Einzelentladungsversuche des Kapitels 5 zeigen einen deutlichen Einfluss der Entladekapazität C_e und der Leerlaufspannung u_0 auf die Kratergeometrie sowie auf das abgetragene und verdrängte Werkstoffvolumen. Diese Erkenntnisse können nicht auf Folgeentladungen bei der Trockenerosion übertragen werden, da die Untersuchungen mit stets voll aufgeladenen Kondensatoren durchgeführt wurden. Bei deionisiertem Wasser als Dielektrikum mit einer Durchschlagsfestigkeit $E_D = 65 \text{ kV/mm}$ hingegen erreichen die Kondensatoren auch bei Folgeentladungen ihre maximale Aufladung, vorausgesetzt es herrschen gute Spülbedingungen im Arbeitsspalt. Hier können im Gegensatz zur Trockenerosion Erkenntnisse zum Prozessverhalten anhand der Einzelentladungen abgeleitet und zur Optimierung genutzt werden.

Die Einschaltdauer, oder auch Ontime t_{on} , beschreibt die Zeit, in der die Versorgung des Kondensators erfolgt. Während dieser Zeit finden die Funkenentladungen an der Werkzeugelektrode statt, bis die Ontime t_{on} alternierend von der Ausschaltdauer, oder auch Offtime t_{off} , unterbrochen wird. Durch eine Anpassung dieser Prozessstellgrößen ist es möglich die Ladedauer des Kondensators t_L sowie die Entladefrequenz f_e zu beeinflussen [LAN15].

Die Änderung der Ontime t_{on} hat den größten Einfluss auf die betrachteten Zielgrößen, insbesondere auf die Erosionsdauer t_{ero} und den relativen Elektrodenverschleiß ϑ . Sie führt zu einer Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ um 17 % und bei TiB_2 um 23 %, wel-

ches auf eine Erhöhung der Entladefrequenz f_e und somit auf die Steigerung der Abtragleistung zurückzuführen ist.

Hingegen ist der Effekt der Ontime t_{on} gegensätzlich für den relativen Elektrodenverschleiß ϑ . Bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ bewirkt die Steigerung der Ontime t_{on} von $t_{on} = 4,4 \mu\text{s}$ auf $t_{on} = 8,7 \mu\text{s}$ eine Erhöhung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ um 32 %, dem gegenüber bei TiB_2 eine Reduzierung von 53 %. Die Zunahme des relativen Elektrodenverschleißes ϑ ist ebenfalls eine Folge des gestiegenen Energieumsatzes, verursacht durch die Erhöhung der Entladefrequenz f_e und der Entladephasen, welches zu einer höheren thermischen Belastung der Werkzeugelektroden führt. Aufgrund der Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} bei der Bearbeitung von TiB_2 ist die Eingriffszeit der Werkzeugelektrode erheblich verkürzt worden, dies hat positive Auswirkungen auf den relativen Elektrodenverschleiß ϑ . Des Weiteren weist TiB_2 gegenüber $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ eine über dreifach höhere Wärmeleitfähigkeit λ auf. Untersuchungen von RÖHNER [RÖH12] zeigen, dass eine ansteigende Wärmeleitfähigkeit λ von Werkstoffen einen im Prozessergebnis spürbaren Entzug von Wärmeenergie mit sich bringt. Demzufolge ist die Wärmeenergie, insbesondere die an den Mantelflächen auftretenden Passiventladungen, welche beim funkenerosiven Feinbohren zu einer starken Verschleißbildung der Werkzeugelektrode führen, verringert. Dieser Effekt trägt ferner zu den geringen Spaltweiten s_L von TiB_2 bei.

Die Erhöhung der Ausschaltdauer t_{off} führt, aufgrund der längeren Pause zwischen den Entladephasen, zu einer Verlangsamung der Erosionsdauer t_{ero} für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ um 18 % und TiB_2 um 23 %. Da die thermische Belastung der Werkzeugelektrode bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ aus den zuvor genannten Gründen größer ist als bei der Bearbeitung von TiB_2 , führt die Kühlwirkung der größeren Ausschaltdauer t_{off} zu einer hoch signifikanten Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ um 36 %. Bei TiB_2 hingegen hat die Erhöhung der Ausschaltdauer t_{off} keinen Einfluss auf das Verschleißverhalten. Die Oberflächengüte wird bei beiden Werkstoffen negativ beeinflusst.

Durch die Erhöhung des Spüldrucks p_s von $p_s = 60 \text{ bar}$ auf $p_s = 80 \text{ bar}$ wird eine hochsignifikante Herabsetzung der Erosionsdauer t_{ero} von 34 % für die Bearbeitung von TiB_2 realisiert. Die Steigerung des Abtrags durch Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Arbeitsspalt trägt bei dem Spalling-Effekt zum Herauslösen der Keramikpartikel bei. Für die Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, bei welcher voraussichtlich der Melting-Effekt primär vorherrscht, hat eine Steigerung des Spüldrucks im betrachteten Bereich keinen Einfluss auf das Verschleiß- und Abtragverhalten.

Die faktororientierte Effektanalyse stellt dar, durch welche Prozessgrößen einzelne Zielgrößen beeinflusst werden. Die Erkenntnisse zu den einzelnen Haupteffekten ermöglichen den trockenfunkenerosiven Feinbohrprozess systematisch zu optimieren. Hierfür werden für die folgenden Versuche die Faktoren in elektrische und regelspezifische Prozessstellgrößen eingeteilt und genauer untersucht.

6.2 Elektrische Prozessstellgrößen

Aufbauend auf der Effektanalyse erfolgt eine Detailuntersuchung der für den Trockenerosionsprozess signifikanten Faktoren. Hierfür werden zur weiteren Optimierung der Parameterkombination Untersuchungen durchgeführt und die signifikanten energie- und frequenzbeeinflussenden Faktoren in fünf Stufen variiert. Da die Änderung eines Faktors bei der Funkene-

rosion aufgrund der Vielzahl von Einflussgrößen kein lineares Verhalten aufweist, ermöglicht die Variation einer einzelnen Prozessstellgröße die Identifikation von Extremwerten für die vorliegende Parameterkombination. Zudem erfolgt durch die Detailuntersuchung eine Erweiterung des Prozessfelds der einflussstärksten Faktoren. Im Einzelnen sind es die Prozessstellgrößen

- Einschaltdauer t_{on} ,
- Ausschaltdauer t_{off} ,
- Spüldruck p_s ,
- Leerlaufspannung u_0 und
- Ladestrom i_L .

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass eine Erhöhung des Energieeintrags in das Werkstück bei der Trockenfunkenerosion, aufgrund der geringen Durchschlagsfestigkeit E_D von Luft, über die Steigerung der Entladefrequenz f_e erfolgt. Die für die durchzuführenden Versuche zusätzlich betrachtete Prozessstellgröße Ladestrom i_L beeinflusst die Aufladung des Kondensators durch die Anstiegsflanke der Ladespannung u_L . Demzufolge führt ein hoher Ladestrom zu einer Verkürzung der Ladezeit des Kondensators t_L und somit zu einer Steigerung der Entladefrequenz f_e , wodurch eine Verbesserung der Abtragrate V_W zu erwarten ist.

Die Versuchsdurchführung erfolgt nach einem Versuchsplan der OFAT Vorgehensweise (one-factor-at-a-time), ohne die Ausgangskombination der Prozessparameter zu verändern. Diese basiert auf Technologie 1 der Tabelle 6-2, welche bei der Bearbeitung beider Werkstoffe Si_3N_4 -TiN und TiB_2 eine hohe Prozessstabilität aufweist. Als Zielgrößen für die 1 mm tiefen Durchgangsbohrungen werden betrachtet:

- die Erosionsdauer t_{ero} für die Fertigung einer Durchgangsbohrung,
- der relative Elektrodenverschleiß ϑ sowie
- der obere Bohrungsdurchmesser d_{Bo} am Bohrungseintritt und der untere Bohrungsdurchmesser d_{Bu} am Bohrungsaustritt, aus denen die Spaltweite s_L über den Elektrodendurchmesser d_{el} berechnet wird.

Da die Effektanalyse ergeben hat, dass die Faktoren zwar einen hohen Einfluss, allerdings eine zu vernachlässigende Änderung auf den arithmetischen Mittenrauwert der Profilordinate R_a an der Bohrungswand aufweisen, wird diese Zielgröße bei den Variationsversuchen vernachlässigt. Eine detaillierte Untersuchung zur Beeinflussung der Oberflächengüte erfolgt in Kapitel 9, in dem die Abtragmechanismen tiefergehend anhand einer Analyse der Abtragpartikel erfolgen.

Bei der Festlegung der Faktorstufen sind die abtrag- und verschleißoptimalen Parameterkombinationen aus der Effektanalyse für Si_3N_4 -TiN und TiB_2 berücksichtigt und so gewählt worden, dass beide Werkstoffe in den Ergebnisdiagrammen dargestellt werden können. Dies ermöglicht neben der Betrachtung des Verhaltens einzelner Prozessstellgrößen die Ableitung werkstoffspezifischer Erkenntnisse, resultierend aus den unterschiedlichen Abtragmechanismen der betrachteten Keramiken. Anhand der Ergebnisse werden weitere Erkenntnisse gewonnen, die zum Prozessverständnis und zur Technologieentwicklung für das trockenfunkenerosive Feinbohren beitragen.

Die folgenden Kapitel 6.2.1 bis 6.2.5 zeigen den Einfluss der oben genannten Prozessstellgrößen auf die betrachteten Zielgrößen für die Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 .

6.2.1 Einschaltdauer

Der in der Effektanalyse identifizierte Einfluss der Einschaltdauer t_{on} entspricht dem in Bild 6-5 dargestellten Prozessverhalten für den Variationsbereich von $2,1 \mu\text{s} \leq t_{\text{on}} \leq 11,5 \mu\text{s}$.

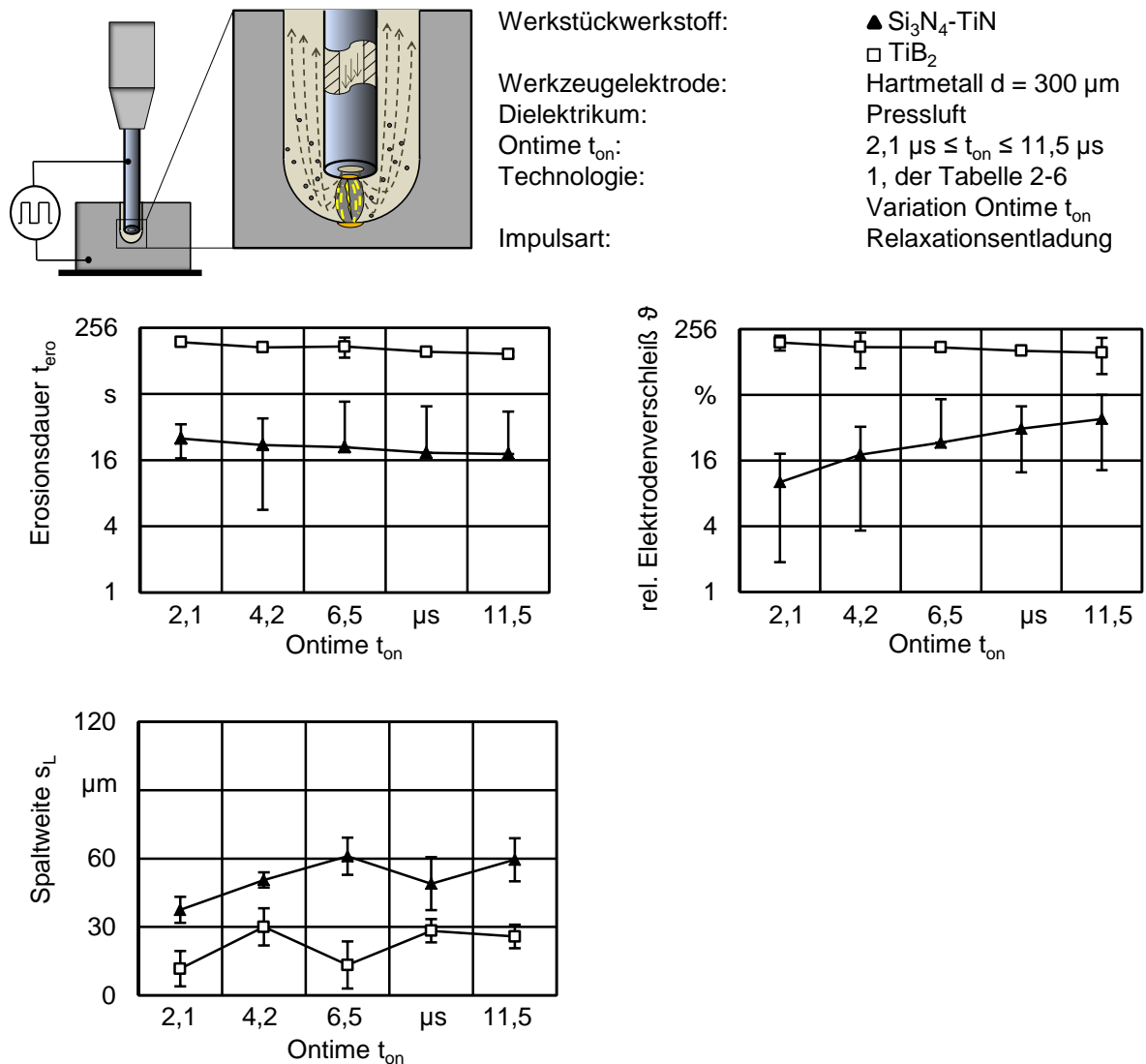


Bild 6-5: Einfluss der Einschaltdauer t_{on} auf die Erosionsdauer t_{ero} , den relativen Elektrodenverschleiß ϑ und die Spaltweite s_L

Eine steigende Einschaltdauer t_{on} führt bei beiden Werkstoffen zu einer Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} . Dabei kommt es für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ zu einer Differenz der Erosionsdauer t_{ero} , zwischen der Einschaltdauer $t_{\text{on}} = 2,1 \mu\text{s}$ und $t_{\text{on}} = 11,5 \mu\text{s}$, von $\Delta t_{\text{ero}} = 7 \text{ s}$, für TiB_2 von $\Delta t_{\text{ero}} = 60 \text{ s}$. Dies entspricht für beide Werkstoffe einer Verkürzung der Erosionsdauer t_{ero} um ca. 28 %.

Der relative Elektrodenverschleiß ϑ wird durch die Einschaltdauer t_{on} , wie in der Effektanalyse ermittelt, gegenläufig beeinflusst für die Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 . Bei TiB_2 hat die Steigerung der Einschaltdauer t_{on} eine Herabsetzung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ von 15 %, bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ eine Erhöhung von 28 % zur Folge. Durch die Erhöhung der Ein-

schaltdauer t_{on} wird, angesichts der steigenden Anzahl von Funkenentladungen, mehr Energie von der Elektrode in das Werkstück übertragen. Bei der Bearbeitung von Si_3N_4 -TiN führt dies zu einer Steigerung des werkzeug- und werkstückseitigen Abtrags. Das Verschleißverhalten bei der Bearbeitung von TiB_2 ist auf eine Prozessstabilisierung zurückzuführen, da aufgrund des erhöhten werkstückseitigen Abtrags die Eingriffszeit der Elektrode im Werkstück und somit zusätzliche Achsbewegungen reduziert werden.

Die Spaltweite s_L wird von der Einschaltdauer t_{on} für die Bearbeitung von Si_3N_4 -TiN zwischen $2,1 \mu s \leq t_{on} \leq 6,5 \mu s$ beeinflusst und führt zu einem Anstieg bis $s_L = 60 \mu m$. Eine Einschaltdauer $t_{on} \geq 6,5 \mu s$ bewirkt keine signifikante Änderungen der Spaltweite s_L . Die maximale Spaltweite von $s_L = 60 \mu m$ ist auf die Durchschlagfestigkeit E_D von Luft mit $E_D = 3,3 \text{ kV/mm}$ sowie die größtmögliche Leerlaufspannung von $u_0 = 60 \text{ V}$ zurückzuführen, vgl. Kapitel 6.1.1. Im Gegensatz zum konventionellen Feinbohren mit flüssigem Dielektrikum, bei welchem die elektrische Leitfähigkeit im Arbeitsspalt abweicht, zurückzuführen auf lokale Ansammlungen von Abtragpartikeln, ist diese beim trockenerosiven Feinbohren konstant. Eine Ursache hierfür ist die hohe Strömungsgeschwindigkeit im Arbeitsspalt, die einer lokalen Herabsetzung der Durchschlagfestigkeit E_D entgegenwirkt. Ab einer maximalen Spaltweitenlänge von $s_L = 60 \mu m$ treten aufgrund unzureichender Feldstärke keine Passiventladungen auf, die zu einer Weitung des Bohrungsdurchmessers d_B führen.

Ebenfalls weisen die Spaltweiten s_L von TiB_2 keine wesentlichen Änderungen in Abhängigkeit von der Einschaltdauer t_{on} auf, welches die Erklärung in Kapitel 6.1.3 zum Werkstoffabtrag von TiB_2 bestätigt. Diese besagt, dass die Energiedichte an der Mantelfläche der Werkzeugelektrode unzureichend ist um den Spalling-Effekt auszulösen, woraus geringe Spaltweiten s_L entstehen.

Wie in Kapitel 6.1.3 beschrieben, bewirkt die Verlängerung der Einschaltdauer t_{on} eine Steigerung des Energieumsatzes als Resultat einer Erhöhung der Entladefrequenz f_e und der Entladephasen. Dies führt unter den Einstellungen der betrachteten Parameterkombination zu folgenden Erkenntnissen:

- Die Verlängerung der Einschaltdauer t_{on} bewirkt die Steigerung der Abtragsrate V_W .
- Eine Reduzierung des relativen Elektrodenschleißes ϑ wird bei TiB_2 durch eine Erhöhung, bei Si_3N_4 -TiN durch die Verkürzung der Einschaltdauer t_{on} realisiert.
- Die Erhöhung der Einschaltdauer t_{on} führt zu keiner signifikanten Änderung der Spaltweite s_L bei der Bearbeitung von TiB_2 . Hingegen bewirkt diese bei Si_3N_4 -TiN eine Vergrößerung der Spaltweite bis maximal $s_L = 60 \mu m$.

6.2.2 Ausschaltdauer

Bild 6-6 zeigt die Ergebnisse der Detailuntersuchung für die Prozessstellgröße Ausschaltdauer t_{off} , deren Einfluss auf die Zielgrößen mit dem in der Effektanalyse identifizierten Prozessverhalten übereinstimmt. Die Verlängerung der Ausschaltdauer t_{off} führt bei beiden Werkstoffen zu einer Zunahme der Erosionsdauer t_{ero} . Diese bewirkt bei einer Erhöhung von $t_{off} = 2,1 \mu s$ auf $t_{off} = 11,5 \mu s$ für Si_3N_4 -TiN eine Verlängerung der Erosionsdauer t_{ero} von $\Delta t_{ero} = 5 \text{ s}$, bei TiB_2 von $\Delta t_{ero} = 60 \text{ s}$. Dies entspricht einer Verlängerung der Bohrzeiten von ca. 26 % für Si_3N_4 -TiN und ca. 86 % für TiB_2 . Eine Erhöhung der Ausschaltdauer t_{off} reduziert die von der Elektrode in das Werkstück übertragene Energie aufgrund einer sinkenden An-

zahl von Funkenentladungen. Die hohe Differenz des Einflusses bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 ist auf deren Werkstoff- und Abtrageigenschaften zurückzuführen. Insbesondere die mehr als dreifach höhere thermische Leitfähigkeit λ von TiB_2 gegenüber $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ führt zu dem hohen Einfluss der Ausschaltdauer t_{off} auf die Erosionsdauer t_{ero} .

Mit zunehmender Ausschaltdauer t_{off} zwischen $t_{\text{off}} = 4,2 \mu\text{s}$ und $t_{\text{off}} = 10 \mu\text{s}$ sinkt der relative Elektrodenverschleiß ϑ konstant für die Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$. Bei Ausschaltdauer $t_{\text{off}} < 4,2 \mu\text{s}$ kommt es zu einem sprunghaften Anstieg des relativen Elektrodenverschleißes ϑ . Dies ist auf die thermische Belastung der Werkzeugelektrode zurückzuführen, verursacht durch die Verkürzung der Pause zwischen den Entladephasen. Die Kühlwirkung des Luftstroms im Arbeitsspalt sowie die Wärmeabfuhr über die Werkzeugelektrode und das Werkstück sind nicht ausreichend um die an der Wirkstelle entstehende Wärmebildung abzu-leiten.

Der Einfluss der Ausschaltdauer t_{off} auf den relativen Elektrodenverschleiß ϑ bei der Bearbeitung von TiB_2 ist aufgrund der hohen Streuung der Ergebnisse zu vernachlässigen. Dies trifft ebenfalls für beide Werkstoffe sowie deren Spaltweiten s_L zu und stimmt mit dem Ergebnis der Effektanalyse überein, bei der für diese Zielgrößen keine hoch signifikanten Effekte identifiziert wurden, siehe Tabelle 6-3.

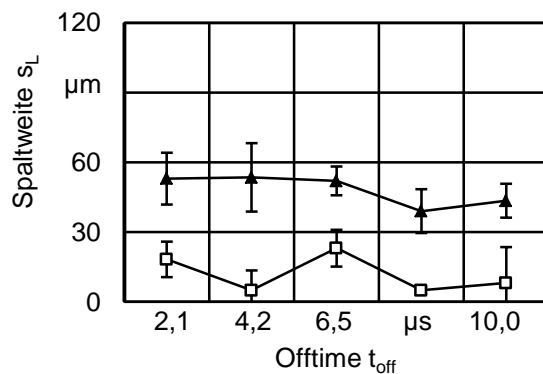
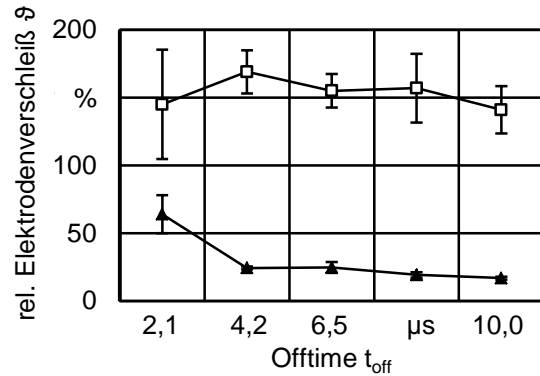
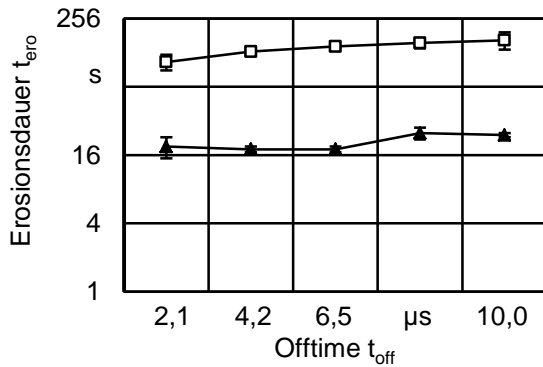
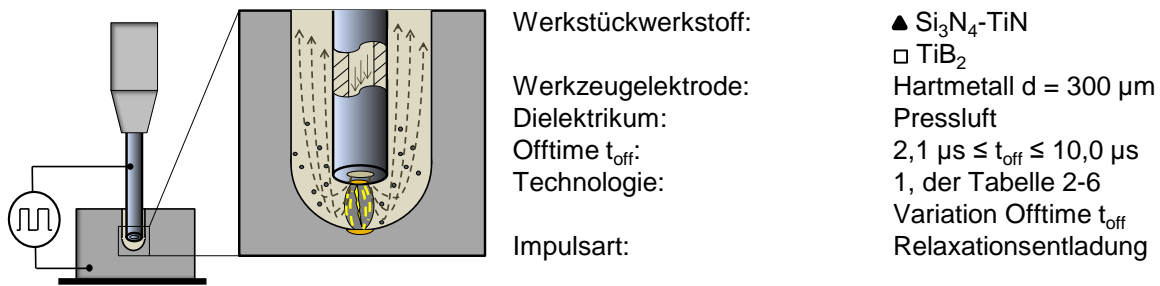


Bild 6-6: Einfluss der Ausschaltdauer t_{off} auf die Erosionsdauer t_{ero} , den relativen Elektrodenverschleiß ϑ und die Spaltweite s_L

Durch den Anstieg der Ausschaltdauer t_{off} erfolgt eine Reduzierung des Energieumsatzes basierend auf der Herabsetzung der Entladeanzahl und der Verlängerung der Pausen zwischen den Entladephasen. Unter den verwendeten Parameterkombinationen der Untersuchungen werden folgende Erkenntnisse zur Ausschaltdauer t_{off} abgeleitet:

- Mit Verlängerung der Ausschaltdauer t_{off} wird die Abtragrate V_W herabgesetzt.
- Bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ bewirkt eine steigende Ausschaltdauer t_{off} die Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ .
- Die Änderung der Ausschaltdauer t_{off} hat keinen signifikanten Einfluss auf die Spaltweite.

6.2.3 Spüldruck

Die Änderung des Spüldrucks p_p bewirkt bei den verwendeten Prozessstellgrößen, deren Einstellungen abtrag- und verschleißoptimiert sind, keine Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} , Bild 6-7. Die Erosionsdauer von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ beträgt über den gesamten Verlauf ca. $t_{\text{ero}} = 20 \text{ s}$. Hingegen führt eine Steigerung des Spüldrucks p_p bei der Bearbeitung von TiB_2 im Bereich von $10 \text{ bar} \leq p_p \leq 40 \text{ bar}$ zu einer Erhöhung der Erosionsdauer t_{ero} , die ab einem

Spüldruck $p_p \geq 40$ bar wieder abnimmt. Der relative Elektrodenverschleiß ϑ und die Spaltweite s_L weisen hierzu ein analoges Verhalten auf.

Dem abzuleiten sind unzureichende Spülbedingungen unterhalb $p_p \leq 40$ bar, welche aufgrund entstehender Kurzschlussentladungen innerhalb des Arbeitsspalts zu einem erhöhten Regelverhalten der Vorschubachsen führen. Die geringen Spaltweiten s_L bei TiB_2 erschweren bei der Regelbewegung der Vorschubachse die Positionierung der Werkzeugelektrode am Bohrungsgrund. Hierdurch kommt es zu Folgeentladungen an den Mantelflächen der Bohrung, die eine Aufweitung dieser und einen erhöhten relativen Elektrodenverschleiß ϑ verursachen. Ab einem Spüldruck $p_p > 50$ bar erfolgt, zurückzuführen auf bessere Spülbedingungen, eine Stabilisierung des Prozesses.

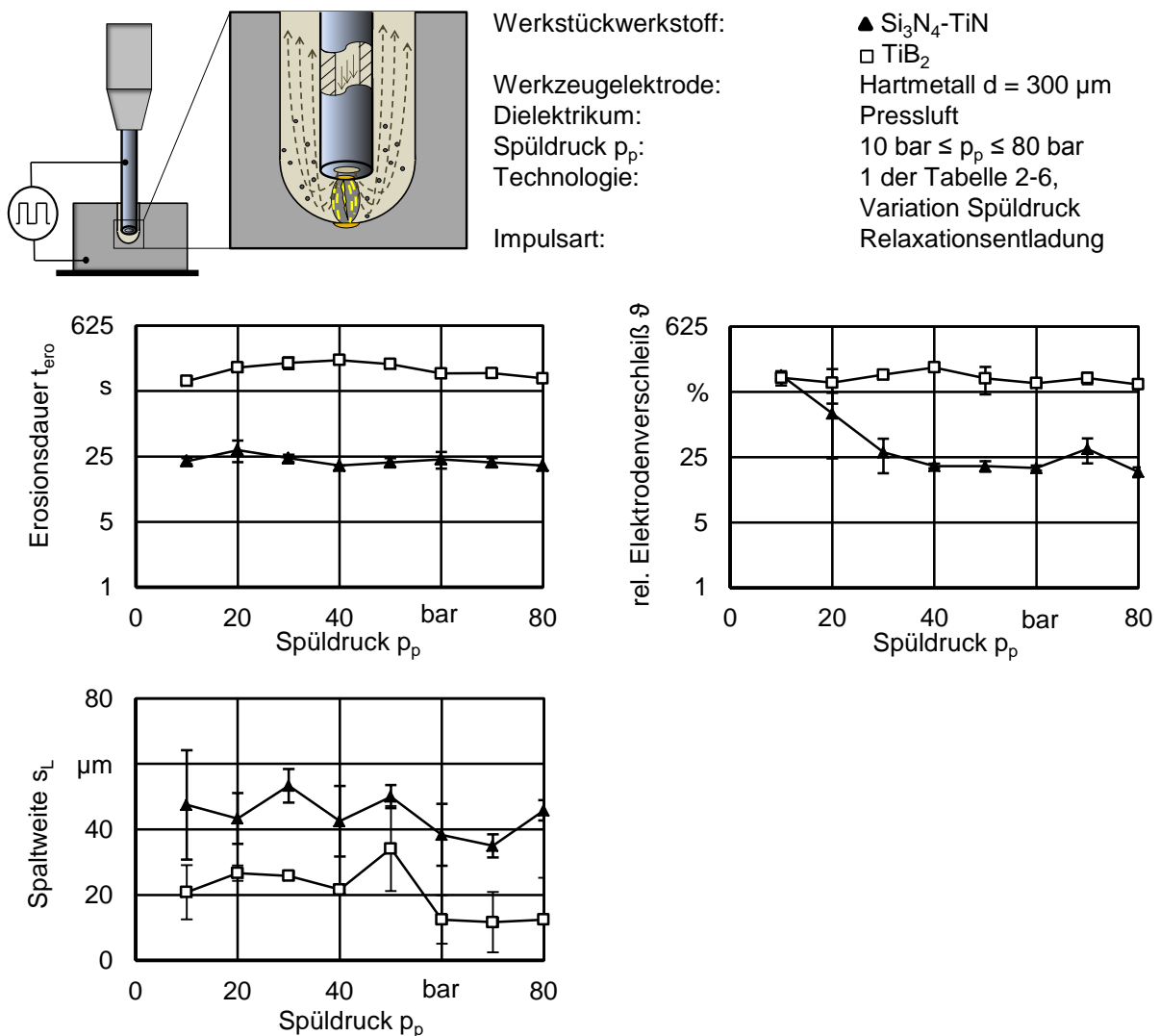


Bild 6-7: Einfluss des Spüldrucks p_p auf die Erosionsdauer t_{ero} , den relativen Elektrodenverschleiß ϑ und die Spaltweite s_L

Bei Si_3N_4 -TiN hingegen hat die Erhöhung des Spüldrucks im Bereich $10 \text{ bar} \leq p_p \leq 40 \text{ bar}$ eine erhebliche Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes von $\vartheta = 183 \%$ auf $\vartheta = 20 \%$ zur Folge. Eine Steigerung des Spüldrucks $p_p \geq 40 \text{ bar}$ bewirkt hingegen nur eine leichte Herabsetzung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ . Die Spaltweiten s_L werden nahezu konstant mit zunehmendem Spüldruck verringert. Des Weiteren führt ein hoher Spüldruck p_p zur Senkung der Standardabweichungen der Spaltweite s_L , wodurch eine Ver-

besserung der Genauigkeit für die Herstellung reproduzierbarer Bohrungsdurchmesser d_B realisiert wird.

Diese Eigenschaften sind auf vorteilhaftere Spülbedingungen mit steigendem Spüldruck p_p zurückzuführen, die neben einem effizienten Abtransport der Abtragpartikel zu einer hohen Kühlwirkung beitragen. Die bei niedrigem Spüldruck p_p gefertigten Bohrungen weisen einen großen Anteil wiedererstarteten Werkstück- und Elektrodenwerkstoffs am Bohrungsrand auf, welcher mit zunehmendem Spüldruck p_p auf wenige Rückstände reduziert wurde.

Durch einen steigenden Spüldruck auf $p_p = 80$ bar und die verwendeten Parameterkombinationen werden folgende Erkenntnisse für Si_3N_4 -TiN sowie TiB_2 abgeleitet:

- Der Einfluss auf die Erosionsdauer t_{ero} ist zu vernachlässigen.
- Mit zunehmendem Spüldruck p_p wird der relative Elektrodenverschleiß ϑ bei Si_3N_4 -TiN erheblich reduziert, bei TiB_2 hat dieser keinen signifikanten Einfluss.
- Die Formgenauigkeit wird durch die Verringerung der Spaltweiten s_L und kleinere Standardabweichungen verbessert.

6.2.4 Leerlaufspannung

Die Ergebnisse der Effektanalyse zeigen, dass die Erhöhung der Leerlaufspannung von $u_0 = 60$ auf $u_0 = 100$ V keine signifikante Änderung der Zielgrößen bewirkt, siehe Tabelle 6-1. Hingegen belegen die in Bild 6-8 aufgeführten Ergebnisse zum Prozessverhalten bei der Variation der Leerlaufspannung im Bereich $60 \text{ V} \leq u_0 \leq 220 \text{ V}$, dass Leerlaufspannungen $u_0 > 100$ V Einfluss auf die Zielgrößen haben. Insbesondere bei der Bearbeitung von TiB_2 führt die Erhöhung der Leerlaufspannung u_0 zu einer annähernd konstanten Reduzierung der Erosionsdauer von $t_{\text{ero}} = 180$ s bei $u_0 = 60$ V auf $t_{\text{ero}} = 96$ s bei $u_0 = 220$ V.

Hinsichtlich des Werkstoffs Si_3N_4 -TiN hat die Erhöhung der Leerlaufspannung u_0 eine geringfügige Verkürzung der Erosionsdauer von $t_{\text{ero}} = 24$ s bei $u_0 = 60$ V auf $t_{\text{ero}} = 20$ s bei $u_0 = 180$ V zur Folge. Leerlaufspannungen über $u_0 = 180$ V führen bei Si_3N_4 -TiN zu keinen Änderungen der Erosionsdauer t_{ero} . Das unterschiedliche Prozessverhalten von TiB_2 und Si_3N_4 -TiN ist auf dessen spezifischen elektrischen Widerstand ρ_{el} zurückzuführen. TiB_2 weist mit $\rho_{\text{el}} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega\text{cm}$ gegenüber zu Si_3N_4 -TiN mit $\rho_{\text{el}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ } \Omega\text{cm}$ einen deutlich geringeren spezifischen elektrischen Widerstand ρ_{el} auf. Hierdurch erfolgen eine bessere Ausbildung des elektrischen Felds und eine zunehmende Emission von Ladungsträgern aus den Elektroden, welche einen höheren Energieumsatz verursachen durch eine stärkere Beschleunigung der Elektronen im negativen Streamer. Demzufolge hat die Leerlaufspannung u_0 bei der Bearbeitung von TiB_2 einen größeren Einfluss auf die Erosionsdauer t_{ero} als bei Si_3N_4 -TiN. Der relative Elektrodenverschleiß ϑ weist ein synchrones Verhalten zur Erosionsdauer t_{ero} auf.

Bei TiB_2 führt die steigende Leerlaufspannung u_0 zur Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes von $\vartheta = 192$ % bei $u_0 = 60$ V auf $\vartheta = 92$ % bei $u_0 = 220$ V. Dies ist auf die kürzere Erosionsdauer t_{ero} bei zunehmender Leerlaufspannung u_0 zurückzuführen, welche gleichzeitig der Eingriffszeit der Werkzeugelektrode im Werkstück entspricht. Aufgrund von Passiventladungen zwischen den Mantelflächen der Werkzeugelektrode und der Bohrung gehen lange Eingriffszeiten mit einem erhöhten relativen Elektrodenverschleiß ϑ einher, welcher durch die Herabsetzung der Erosionsdauer t_{ero} reduziert wird. Da durch die Erhöhung der Leerlaufspannung u_0 bei der Bearbeitung von Si_3N_4 -TiN keine erhebliche Reduzierung der

Erosionsdauer t_{ero} erfolgt, hat diese einen zu vernachlässigen Einfluss auf den relativen Elektrodenverschleiß ϑ .

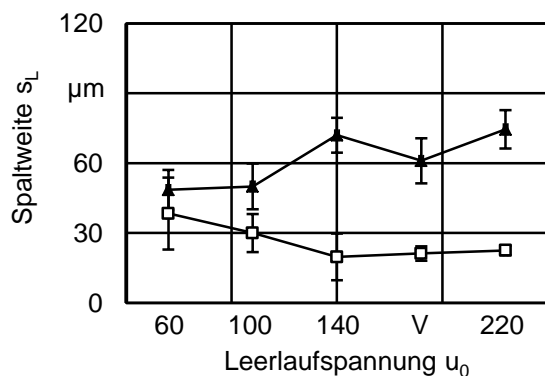
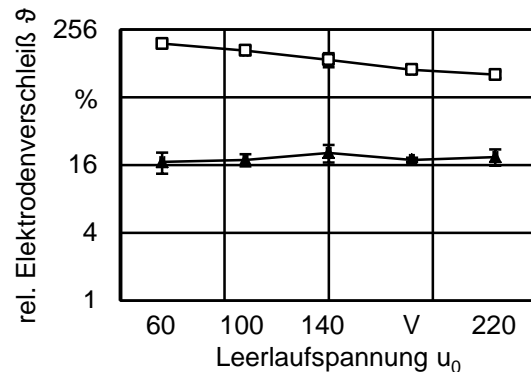
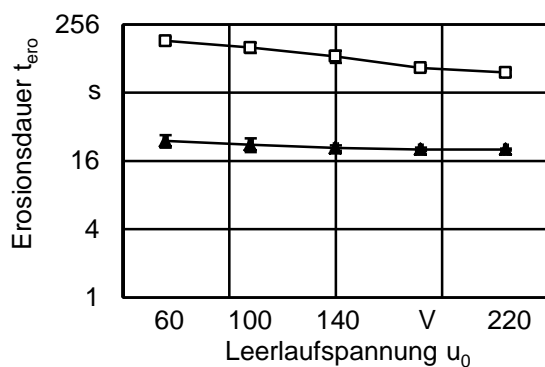
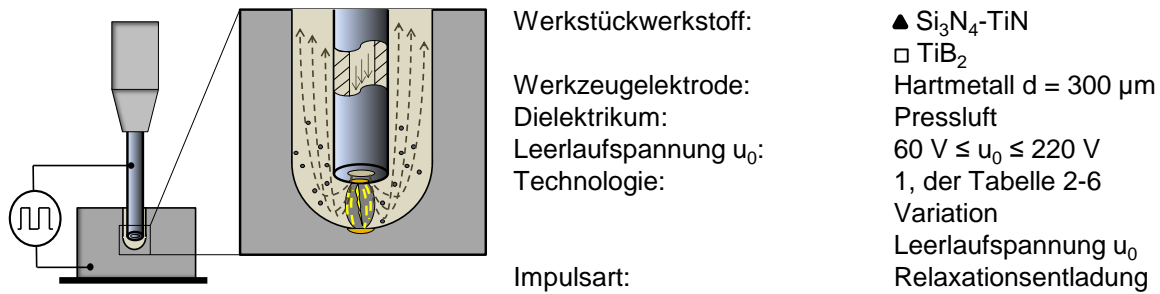


Bild 6-8: Einfluss der Leerlaufspannung u_0 auf die Erosionsdauer t_{ero} , den relativen Elektrodenverschleiß ϑ und die Spaltweite s_L

Die bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 entstehenden Spaltweiten s_L weisen ein gegenläufiges Verhalten bei der Erhöhung der Leerlaufspannung u_0 auf. So bewirkt diese bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, aufgrund der steigenden Feldstärken E_{el} , eine kontinuierliche Weitung der Bohrung und somit eine Vergrößerung der Spaltweite von $s_L = 23 \mu\text{m}$ bei $u_0 = 60 \text{ V}$ auf $38 \mu\text{m}$ bei $u_0 = 220 \text{ V}$. Zurückzuführen auf das in Kapitel 6.1.3 beschriebene Abtragverhalten von TiB_2 , erfolgt durch die Erhöhung der Leerlaufspannung u_0 und somit der Feldstärke E_{el} sowie des Spitzenstroms \hat{i} keine Aufweitung der Bohrung. Wie Bild 6-8 zeigt, führt dies sogar zu einer Reduzierung des Bohrungsdurchmessers. Dieser Effekt ist ebenfalls eine Folge der kürzeren Erosionsdauer t_{ero} und des geringeren Elektrodenverschleißes ϑ , beides führt zu einem stabilen Prozessverhalten. Die Vorschubachse übt geringe Regelbewegungen aus und der Erosionsprozess findet vorwiegend an der Stirnseite der Werkzeugelektrode statt, wodurch Erosionsvorgänge an der Mantelfläche der Werkzeugelektrode eingeschränkt werden.

Mit steigender Leerlaufspannung u_0 , die zu einer Erhöhung des Spitzenstroms \hat{i} pro Einzelentladung und der elektrischen Feldstärke E_{el} führt, werden folgende Erkenntnisse für das trockenfunkenerosive Feinbohren von Si_3N_4 -TiN und TiB_2 abgeleitet:

- Die Erosionsdauer t_{ero} wird bei TiB_2 erheblich, bei Si_3N_4 -TiN geringfügig reduziert.
- Der relative Elektrodenverschleiß ϑ sinkt parallel zur Erosionsdauer t_{ero} , aufgrund der geringeren Eingriffszeit der Werkzeugelektrode, mit zunehmender Leerlaufspannung u_0 .
- Eine geringe Spaltweite s_L wird für Si_3N_4 -TiN durch eine niedrige, bei TiB_2 durch eine hohe Leerlaufspannung u_0 realisiert.
- Bei TiB_2 hat eine steigende Leerlaufspannung u_0 eine Stabilisierung des Erosionsprozesses zur Folge.

6.2.5 Ladestrom

Die Prozessstellgröße Ladestrom i_L beeinflusst die Zeit der Aufladung des Kondensators über die Anstiegsflanke der Ladespannung u_L . Eine steile Anstiegsflanke der Ladespannung u_L hat das frühzeitige Erreichen der eingestellten Leerlaufspannung u_0 und somit eine schnellere Entladung des Kondensators sowie dadurch eine Erhöhung der Entladefrequenz f_e zur Folge. In der Effektanalyse wurde der Ladestrom i_L nicht betrachtet, er wird jedoch wegen des Einflusses auf die Entladefrequenz f_e in der Detailuntersuchung mit analysiert. Bild 6-9 zeigt den Einfluss des Ladestroms i_L auf die Zielgrößen.

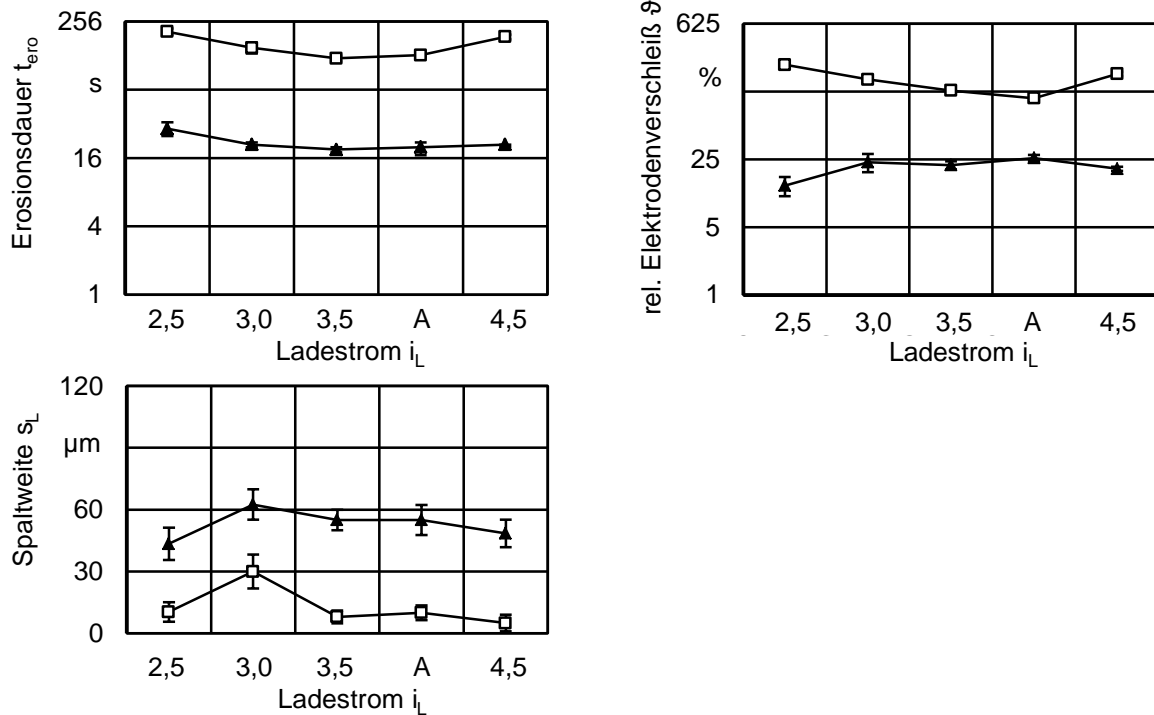
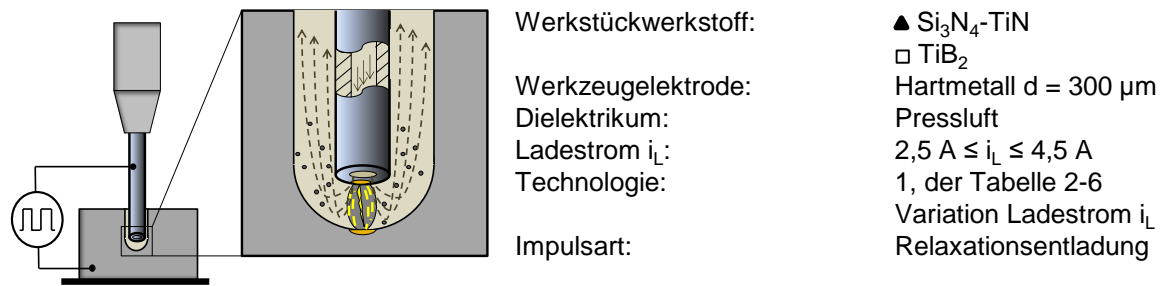


Bild 6-9: Einfluss des Ladestroms i_L auf die Erosionsdauer t_{ero} , den relativen Elektrodenverschleiß ϑ und die Spaltweite s_L

Die Variation des Ladestroms im Bereich von $2,5 \text{ A} \leq i_L \leq 4,5 \text{ A}$ führt bei beiden Werkstoffen Si_3N_4 -TiN und TiB_2 zu einem Kurvenverlauf, welcher seinen Minimum für die Erosionsdauer t_{ero} bei $i_L = 3,5 \text{ A}$ hat. Einstellungen des Ladestroms i_L größer und kleiner $i_L = 3,5 \text{ A}$ bewirken die Erhöhung der Erosionsdauer t_{ero} . Dies ist auf die abtragoptimale Entladefrequenz f_e zurückzuführen, die in Abhängigkeit von der eingestellten beziehungsweise aufgrund der Durchschlagsfestigkeit E_D des Arbeitsspalt s_L erreichten Leerlaufspannung u_0 vorgegeben ist. Ein zu hoch gewählter Ladestrom i_L bewirkt die Verlängerung der Erosionsdauer t_{ero} infolge eines instabil werdenden Prozesses, bei dem eine erhöhte Anzahl an Fehlentladungen vorliegt.

Bei der Bearbeitung von Si_3N_4 -TiN weist der relative Elektrodenverschleiß ϑ sein Minimum bei einem Ladestrom $i_L = 2,5 \text{ A}$ mit $\vartheta = 16 \%$ auf. Liegt der Ladestrom zwischen $3 \text{ A} \leq i_L \leq 4,5 \text{ A}$ beträgt der relative Elektrodenverschleiß $20 \% \leq \vartheta \leq 25 \%$, ohne erkennbaren Einfluss des Ladestroms i_L . Je nach Güte und Stabilität des Erosionsprozesses beim Feinbohren, beispielsweise beeinflusst durch Kurzschlüsse und unregelmäßig entladende Kondensatoren, sind Schwankungen des relativen Elektrodenverschleißes ϑ von 5 % innerhalb der Toleranz. Demzufolge hat der Ladestrom i_L für die Bearbeitung von Si_3N_4 -TiN und inner-

halb des betrachteten Parameterbereichs keinen Einfluss auf den relativen Elektrodenverschleiß ϑ .

Hingegen führt die Erhöhung des Ladestroms i_L bei der Bearbeitung von TiB_2 zu einem erheblichen Einfluss auf den relativen Elektrodenverschleiß ϑ . So bewirkt die Erhöhung des Ladestroms von $i_L = 2,5$ A auf $i_L = 4$ A eine Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes von $\vartheta = 236$ % auf ein Minimum von $\vartheta = 107$ %. Die Verbesserung der Verschleißwerte mit zunehmendem Ladestrom i_L ist auf die kürzeren Erosionsdauern t_{ero} und somit auf die geringeren Eingriffszeiten der Werkzeugelektrode im Werkstück zurückzuführen. Wie die Erosionsdauer t_{ero} , steigt auch der relative Elektrodenverschleiß ϑ bei einem zu hoch gewählten Ladestrom i_L wieder an. Dieses Verhalten ist, wie zuvor beschrieben, auf Kurzschlussentladungen zurückzuführen.

Die entstehenden Spaltweiten s_L von Si_3N_4 -TiN zeigen einen ähnlichen Verlauf wie der relative Elektrodenverschleiß ϑ . Dies verdeutlicht einen Zusammenhang zwischen dem Abbrand der Hartmetallelektrode und der Spaltweite s_L . Ein geringer relativer Elektrodenverschleiß ϑ , wie bei einem Ladestrom $i_L = 2,5$ A mit $\vartheta = 16$ %, führt zu Spaltweiten von $s_L = 43$ μm . Bei einem Ladestrom $i_L \geq 3$ A streuen die Werte der Spaltweite zwischen 48 $\mu m \leq s_L \leq 62$ μm . Die hohe Streuung der Ergebnisse ist ebenfalls eine Folge der abweichenden Prozessstabilität. Durch einen höheren Verschleiß der Werkzeugelektrode kommt es zu einer stärkeren Kontamination des Arbeitsspalts durch Abtragpartikel, welches ein vermehrtes Auftreten von Passiventladungen zwischen Werkzeugelektroden- und Mantelfläche der Bohrung zur Folge hat und zur Aufweitung dieser führt.

Bei TiB_2 hingegen bewirkt die Erhöhung des Ladestroms i_L eine geringfügige Reduzierung der Spaltweite im Bereich von $s_L = 10$ μm bis $s_L = 8$ μm . Ein Ausnahme bildet der Ladestrom $i_L = 2,5$ A, bei welchem Spaltweiten $s_L = 30$ μm mit einer hohen Standardabweichung s von $s = 8$ μm entstehen. Die Ursache hierfür ist die vorliegende Parameterkombination, welche aufgrund der nicht aufeinander abgestimmten Regelstellgrößen zu einer erhöhten Regelbewegung der Werkzeugelektrode führt. Diese hat beim Zurückregeln der Werkzeugelektrode Erosionsvorgänge an der Bohrungswand zur Folge, die zur Aufweitung der Bohrung führen.

Unter den Parameterkombinationen der Untersuchungen werden folgende Erkenntnisse zum Ladestrom i_L abgeleitet:

- Die abtragoptimale Entladefrequenz f_e wird bei einem Ladestrom $i_L = 3,5$ A erreicht.
- Der Einfluss des Ladestroms i_L auf den relativen Elektrodenverschleiß ϑ ist bei der Bearbeitung von Si_3N_4 -TiN zwischen 3 A $\leq i_L \leq 4,5$ A zu vernachlässigen.
- Bei TiB_2 führt ein hoher Ladestrom i_L zur starken Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ .
- Die Größe der Spaltweite s_L geht bei Si_3N_4 -TiN mit dem relativen Elektrodenverschleiß ϑ einher.

6.3 Regelungsspezifische Prozessstellgrößen

Zusätzlich zu den unter Kapitel 6.2 betrachteten energie- und frequenzbeeinflussenden Prozessstellgrößen sowie dem Spüldruck, werden nachfolgend die Regelparameter untersucht. Im Einzelnen sind dies die Prozessstellgrößen

- Servoverstärkung des Antriebs (Gain) und
- Spaltweitenkomprimierung (Compression).

Die Versuchsdurchführung erfolgt mittels Variation der Regelparameter Gain und Compression bei konstanten Parameterkombinationen der Technologie 1, Tabelle 6-2, für die Herstellung 1 mm tiefer Durchgangsbohrungen in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 . Ebenso wie bei den unter Kapitel 6.2 durchgeführten Untersuchungen werden die Zielgrößen

- Erosionsdauer t_{ero} ,
- relativer Elektrodenverschleiß ϑ sowie
- oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo} am Bohrungseintritt und unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu} am Bohrungsaustritt, aus denen die Spaltweite s_L berechnet wird, betrachtet.

Beim konventionellen Feinbohren hat die Änderung der regelspezifischen Prozessstellgrößen aufgrund der Elektrodenbewegung einen großen Einfluss auf die Auswirkungen entstehender Gasblasen und Abtragpartikel sowie demzufolge auf den Erosionsprozess. Da beim funkenerosiven Feinbohren eine geringe Änderung der Regelparameter zu einer erheblichen Veränderung des Prozessverhaltens führen kann, werden diese über den gesamten Einstellbereich mit geringen Faktorstufen variiert und untersucht. Hierdurch soll gewährleistet werden, dass der für das trockenfunkenerosive Feinbohren optimale Einstellbereich identifiziert wird.

Beide Prozessstellgrößen Gain und Compression werden durch den Maschinenhersteller verschlüsselt in % angegeben. Der genaue Regelalgorithmus der Regelstellgrößen ist nicht bekannt, ebenso unbekannt ist, ob durch eine Änderung weitere Prozessparameter beeinflusst werden.

6.3.1 Servoverstärkung des Antriebs

Die Servoverstärkung des Antriebs (Gain) ist eine Stellgröße, welche Einfluss auf die Regelbewegung des Achssystems und somit auf die Elektrodenbewegung hat. Die Prozessstellgröße Gain kann im Bereich $\text{Gain} = 10\%$ bis $\text{Gain} = 100\%$ variiert werden, wobei durch einen geringen Gain-Wert das Achssystem träge wird und bei einem hohen Gain-Wert dynamische Regelbewegungen die Folge sind. Bild 6-10 zeigt den Einfluss der Servoverstärkung des Antriebs, variiert in 10 Stufen im Bereich $10\% \leq \text{Gain} \leq 100\%$, auf die Erosionsdauer t_{ero} , den relativen Elektrodenverschleiß ϑ und die Spaltweite s_L .

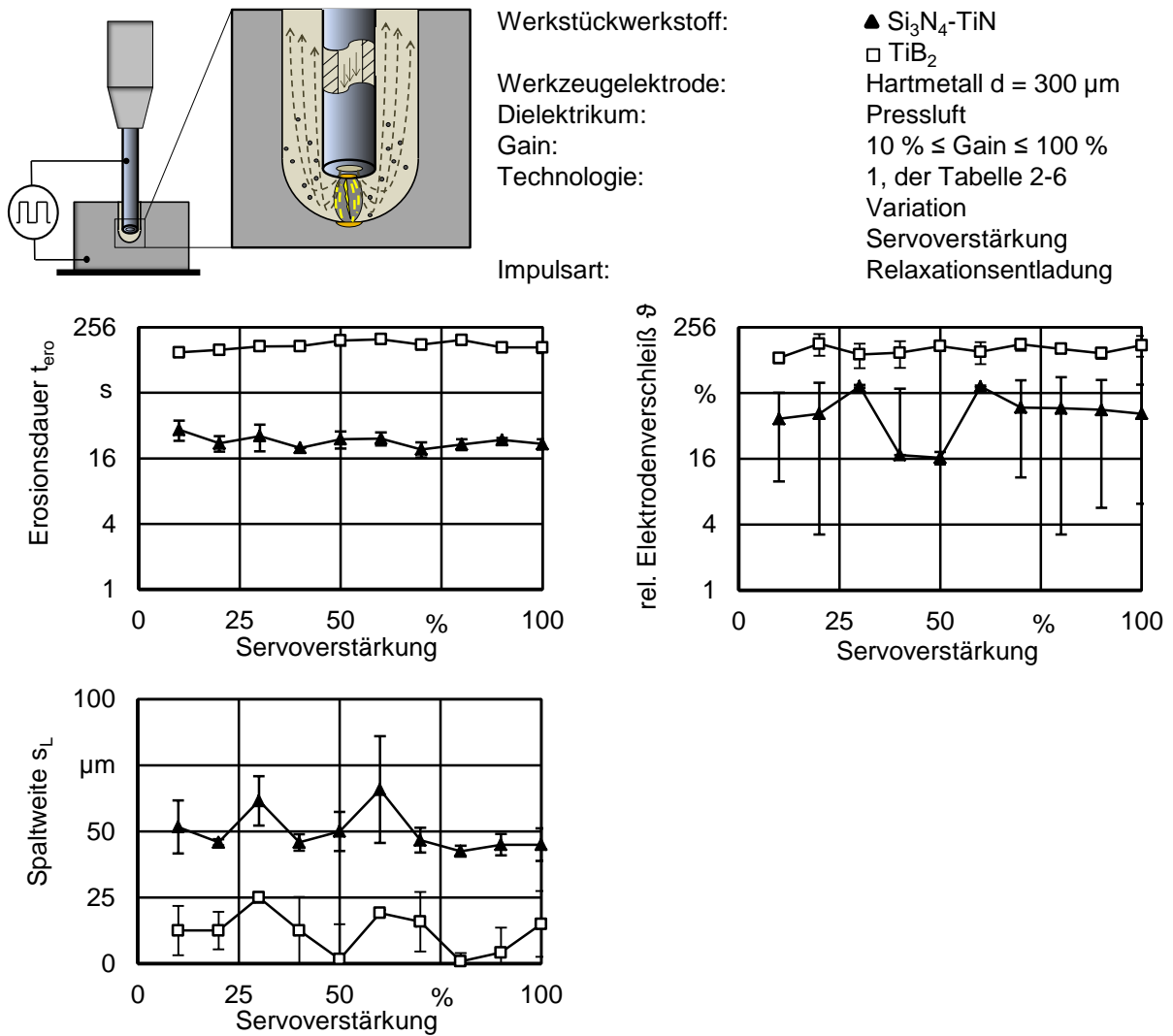


Bild 6-10: Einfluss der Servoverstärkung des Antriebs auf die Erosionsdauer t_{ero} , den relativen Elektrodenverschleiß ϑ und die Spaltweite s_L

Der Einfluss der Servoverstärkung des Antriebs auf die betrachteten Zielgrößen Erosionsdauer t_{ero} , relativer Elektrodenverschleiß ϑ und Spaltweite s_L ist für beide Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 geringfügig. Dies ist damit zu erklären, dass bei der trockenfunkenerosiven Bohrbearbeitung aufgrund der wenigen Kurzschlussentladungen und des gleichmäßigen Prozessverlaufs eine geringfügige Vorschubregelung erforderlich ist. Eine höhere Geschwindigkeit und Amplitude der Vorschubregelung bewirken daher keine prozessrelevante Änderung der Bedingungen im Arbeitsspalt.

Dennoch sind prozessoptimale Einstellwerte von der Servoverstärkung des Antriebs für die verwendeten Parameterkombinationen erkennbar. Eine abtrag- und verschleißoptimale Einstellung wird für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ bei Gain = 40 % mit einer Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 20$ s, dem relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta = 17$ % und einer Spaltweite $s_L = 45 \mu\text{m}$ erreicht. Zudem weist der Erosionsprozess unter Gain = 40 % eine hohe Stabilität auf, welche durch die geringe Streuung der Ergebnisse belegt wird. Für TiB_2 zeigen die Ergebnisse, dass eine träge Achsregelung von Gain = 10 % zu einem Minimum der Erosionsdauer mit $t_{\text{ero}} = 150$ s und einem relativen Elektrodenverschleiß von $\vartheta = 134$ % führt. Hingegen sind die erreichten Spaltweiten mit $s_L = 12 \mu\text{m}$ für die Bearbeitung von TiB_2 hoch.

Zusammenfassend sind folgende Erkenntnisse zum Einfluss der Prozessstellgröße Gain unter den Einstellungen der untersuchten Prozesskombination abzuleiten:

- Die Änderung der Servoverstärkung des Antriebs hat, aufgrund der hohen Prozessstabilität beim trockenfunkenerosiven Feinbohren, einen geringfügigen Einfluss auf die betrachteten Zielgrößen.
- Für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ ist die Einstellung von Gain = 40 % abtrag- und verschleißoptimal.
- Ein Minimum der Erosionsdauer t_{ero} und des relativen Elektrodenverschleißes ϑ wird bei TiB_2 mit Gain = 10 % erreicht.

6.3.2 Spaltweitenkomprimierung

Die Prozessstellgröße Spaltweitenkomprimierung (Compression) beeinflusst den frontalen Arbeitsspalt s_{Lf} und kann im Bereich von Compression = 10 % bis Compression = 80 % variiert werden. Eine geringe Spaltweitenkomprimierung führt zu einem großen, ein hoher Einstellwert zu einem geringen frontalen Arbeitsspalt s_{Lf} . Bei der Versuchsdurchführung konnte die Spaltweitenkomprimierung bei der Bearbeitung von TiB_2 über den gesamten Einstellbereich bis Compression = 80 % variiert werden. Hingegen lag das Maximum für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ bei Compression = 50 %, darüber hinaus kam es zum Kontakt zwischen Werkzeugelektrode und Werkstück sowie zum Abbruch des Erosionsprozesses. Bild 6-11 zeigt die Ergebnisse zum Einfluss der Spaltweitenkomprimierung auf die Zielgrößen Erosionsdauer t_{ero} , relativer Elektrodenverschleiß ϑ und Spaltweite s_{L} .

Für die Erosionsdauer t_{ero} und den relativen Elektrodenverschleiß ϑ sind bei der Bearbeitung von TiB_2 aufgrund der streuenden Ergebnisse keine Tendenzen zu einem hohen oder geringen frontalen Arbeitsspalt s_{Lf} zu erkennen. Die abtrag- und verschleißoptimale Einstellung der Spaltweitenkomprimierung liegt bei einer Compression = 20 % mit einer Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 136$ s und einem relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta = 133$ %. Hingegen wird durch die Erhöhung der Spaltweitenkomprimierung um eine Faktorstufe auf Compression = 30 %, ein Maximum mit $t_{\text{ero}} = 178$ s und $\vartheta = 202$ % erreicht.

Bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ führt die Erhöhung der Spaltweitenkomprimierung zur Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} bis zu einem Minimum bei Compression = 40 %, bei welchem die Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 15$ s beträgt. Bei einer Compression > 50 % kommt der Prozess aufgrund von Kurzschlüssen und dem Festschweißen der Werkzeugelektrode mit dem Werkstück zum Erliegen. Der geringste relative Elektrodenverschleiß ϑ wird für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ bei einer Compression = 20 % realisiert. Tendenziell ist festzustellen, dass der relative Elektrodenverschleiß ϑ bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ zunimmt mit Reduzierung des frontalen Arbeitsspalts s_{Lf} .

Die Ergebnisse verdeutlichen die Empfindlichkeit des trockenfunkenerosiven Feinbohrprozesses gegenüber Änderungen des frontalen Arbeitsspalts s_{Lf} sowie die Unterschiede bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 . Ursachen für das in Bild 6-11 dargestellte Prozessverhalten sind die durch den frontalen Arbeitsspalt s_{Lf} beeinflussten Spül- und Kühlbedingungen sowie die Durchschlagsfestigkeit E_{D} des Dielektrikums.

Durch die Reduzierung des frontalen Arbeitsspalts s_{Lf} kommt es zu einer frühzeitigen Entladung der Kondensatoren, was eine geringe Entladeenergie W_e pro Einzelentladung sowie die Erhöhung der Entladefrequenz f_e zur Folge hat. Ist die Entladeenergie W_e zu gering um den Spalling-Effekt bei TiB_2 auszulösen, kommt es zur Herabsetzung der Abtragrate V_{W} . Die Compression = 20 % führt zu einem optimalen frontalen Arbeitsspalt s_{Lf} unter den verwend-

ten Parameterkombinationen, die eine Kondensatoraufladung bis zu einer Spalling-Effekt auslösenden Entladeenergie W_e und einem ausreichenden Luftstrom zur Kühlung der Werkzeugelektrode realisieren.

Bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ hingegen geht mit der Reduzierung des frontalen Arbeitsspalts s_{Lf} und der daraus resultierenden Erhöhung der Entladefrequenz f_e eine Steigerung der Abtragrates V_W einher. Aufgrund der steigenden thermischen Belastung der Werkzeugelektrode, entstehend aus dem geringeren Durchfluss des Dielektrikums, als Folge der Reduzierung des frontalen Arbeitsspalts s_{Lf} , kommt es zu einem erhöhten relativen Elektrodenverschleiß ϑ mit Vergrößerung der Spaltweitenkomprimierung.

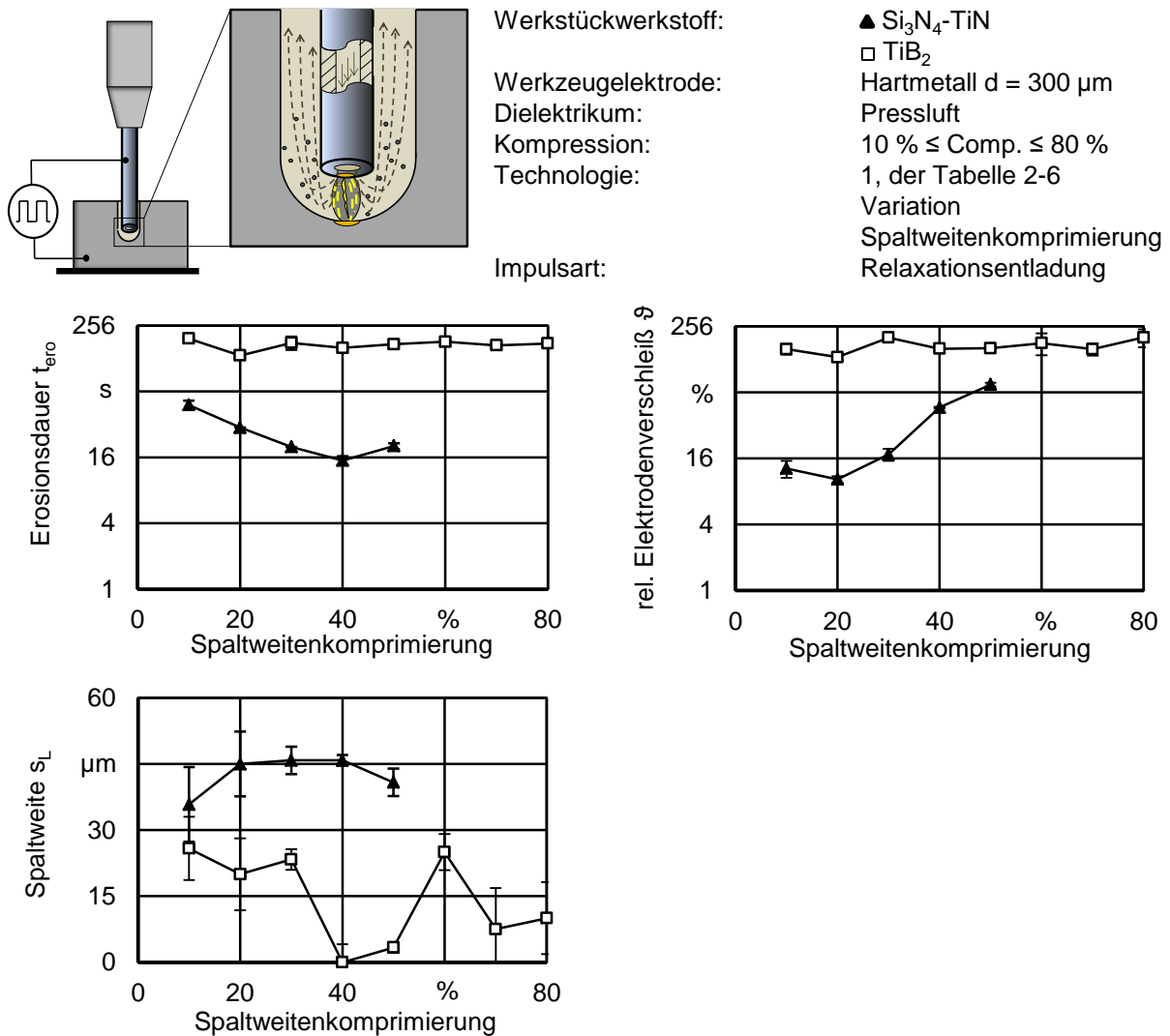


Bild 6-11: Einfluss der Spaltweitenkomprimierung auf die Erosionsdauer t_{ero} , den relativen Elektrodenverschleiß ϑ und die Spaltweite s_L

Folgende Erkenntnisse werden bezüglich des Einflusses der Spaltweitenkomprimierung abgeleitet:

- Die Änderung des frontalen Arbeitsspalts s_{Lf} hat erheblichen Einfluss auf die Erosionsdauer t_{ero} und den relativen Elektrodenverschleiß ϑ .
- Für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ ist die Einstellung von Compression = 40 % abtragoptimal.

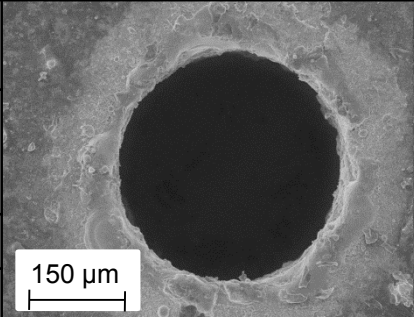
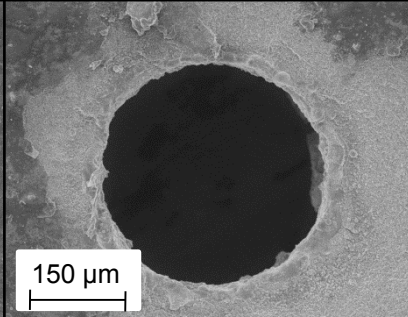
- Ein geringer relativer Elektrodenverschleiß ϑ wird bei einer Compression = 20 % für Si_3N_4 -TiN erreicht.
- Ein Minimum der Erosionsdauer t_{ero} und des relativen Elektrodenverschleißes ϑ wird bei TiB_2 mit Compression = 20 % realisiert.

6.4 Festlegung Parameterkombination

Auf Basis der durch die Effektanalyse und die Detailuntersuchung erarbeiteten Erkenntnisse zur Prozessbeeinflussung durch die technologischen sowie die regelspezifischen Prozessstellgrößen erfolgt die Ableitung von Parameterkombinationen für Si_3N_4 -TiN und TiB_2 . Die Einstellung der Prozessparameter wird unter der Berücksichtigung einer abtrags- und verschleißoptimierten Technologie, welche die Fertigung von Bohrungen mit hoher Prozesssicherheit gewährleistet, durchgeführt. Hierfür werden die Parameterkombinationen ausgewählt, die eine geringe Erosionsdauer t_{ero} und einen niedrigen relativen Elektrodenverschleiß ϑ besitzen oder einen Kompromiss zwischen beiden bilden.

Tabelle 6-5 zeigt die aus den betrachteten Prozessstellgrößen generierte optimale Fertigungstechnologie für das trockenfunkenerosive Feinbohren von Si_3N_4 -TiN mit Pressluft als Dielektrikum sowie die daraus folgenden Erosionsergebnisse.

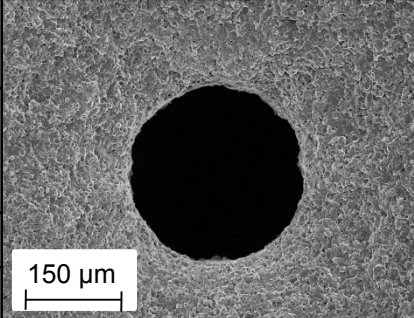
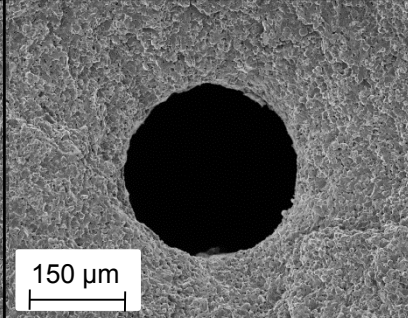
Tabelle 6-5: Abtrags- und verschleißoptimierte Parameterkombination für das trockenfunkenerosive Feinbohren von Si_3N_4 -TiN mit Luft als Dielektrikum

Parameterkombination für Si_3N_4 -TiN						
Entladekapazität C_e	Einschalt-dauer t_{on}	Ausschalt-dauer t_{off}	Spül-druck p_s	Leerlauf-spannung u_0	Gain	Compres-sion
10 nF	6,5 μs	4,2 μs	80 bar	60 V	40 %	30 %
Erosionsergebnis						
		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsaus-tritt			
Erosionsdauer t_{ero}	16 s					
relativer Elektrodenverschleiß ϑ	9 %					
Spaltweite s_L	34 μm					
		150 μm	150 μm			

Die mit dieser Technologie gefertigten Bohrungen weisen eine hohe geometrische Qualität am Bohrungseintritt und -austritt auf, bei einer Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 16$ s, einem relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta = 9$ % sowie einer entstehenden Spaltweite s_L von 34 μm .

In Tabelle 6-6 sind die Parameterkombination und die Ergebnisse der abtrags- und verschleißoptimierten Technologie für TiB₂ bezüglich des trockenfunkenerosiven Feinbohrens mit Pressluft als Dielektrikum dargestellt.

Tabelle 6-6: Abtrags- und verschleißoptimierte Parameterkombination für das trockenfunkenerosive Feinbohren von TiB₂ mit Luft als Dielektrikum

Parameterkombination für TiB ₂						
Entladekapazität C _e	Einschalt-dauer t _{on}	Ausschalt-dauer t _{off}	Spül-druck p _s	Leerlauf-spannung u ₀	Gain	Compres-sion
10 nF	11,5 µs	2,1 µs	80 bar	180 V	10 %	30 %
Erosionsergebnis						
		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsausritt			
Erosionsdauer t _{ero}	120 s					
relativer Elektrodenverschleiß ϑ	183 %					
Spaltweite s _L	7 µm					
				150 µm	150 µm	

Die Erosionsdauer t_{ero} und der relative Elektrodenverschleiß ϑ betragen unter der zusammengestellten Technologie t_{ero} = 120 s und ϑ = 183 % bei einer Spaltweite s_L = 7 µm. Das dabei entstehende Bohrloch weist sowohl am Bohrungseintritt also auch am Bohrungsausritt eine sehr hohe geometrische Qualität sowie einen scharfkantigen Bohrungsrund auf.

Die Vorteile der unter Kapitel 6 durchgeführten Vorgehensweise zur Ableitung von Fertigungstechnologien über die Identifikation der Haupteffekte aller Faktoren sowie der Betrachtung des Prozessverhaltens bei der Variation sind:

- Eine gezielte Auswahl prozessrelevanter Prozessstellgrößen.
- Die vollständige Identifikation der Haupteffekte aller betrachteten Faktoren, trotz eines geringen Versuchsumfangs.
- Die systematische Erarbeitung eines Prozessverständnisses, welches die Ableitung unterschiedlicher Fertigungstechnologien ermöglicht.

7 Ausprägung der Abtragpartikel

7.1 Vorgehensweise

Anhand der Betrachtung der entstehenden Abtragpartikel beim trockenfunkenerosiven Feinbohren sollen weitere Erkenntnisse über das Abtragverhalten der Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 erarbeitet sowie der Spalling- und Melting-Effekt nachgewiesen werden. Hierfür sind Abtragpartikel mit den in Kapitel 6.4 abgeleiteten optimierten sowie einer höher energetischen Parameterkombination gesammelt werden um diese messtechnisch zu untersuchen.

Das Auffangen der Abtragpartikel erfolgt über ein Papierfiltertuch, welches umschließend an die Spannzange der Werkzeugelektroden und der Werkstückaufnahme befestigt ist und Partikelgrößen bis minimal $0,5 \mu\text{m}$ filtert. Für jeden Werkstoff und Parameterkombination erfolgt die Fertigung von 30 Durchgangsbohrungen in 1 mm starke Proben mit $300 \mu\text{m}$ dicken Rohrelektroden, bestehend aus Hartmetall, und Pressluft als Dielektrikum. Anschließend werden die Abtragpartikel mit Wasser aus dem Papierfiltertuch gespült. Das Wasser-Abtragpartikelgemisch wird auf Trägerplatten erwärmt, welches zum Verdampfen des Wassers und zum Anhaften der Abtragpartikel auf den Trägerplatten führt.

Die messtechnische Auswertung der Abtragpartikel sowie die Ermittlung von deren Elementbestandteilen erfolgt mittels nachstehender Geräte:

- Energiedispersives Röntgenmikroskop
des Typs DXP-X10P der Firma XIA LLC, Hayward, USA
- Sputter Beschichtungsanlage
des Typs S150B der Firma EDWARDS, Crawley, England
- Rasterelektronenmikroskop
des Typs REM LEO 1455 VP der CARL ZEISS AG, Oberkochen

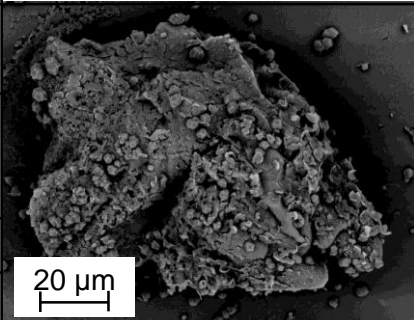
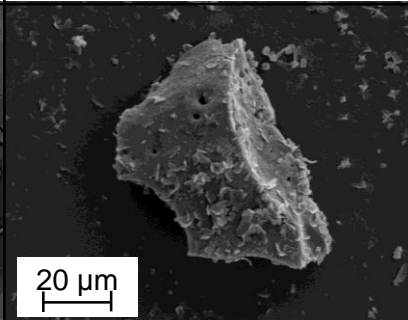
Durch eine energiedispersive Röntgenanalyse der Abtragpartikel und die unter Kapitel 4.2.1 durchgeführten Untersuchungen zum Grundwerkstoff der Keramiken, werden prozessbedingte Änderungen dieser sowie die Anteile des Elektrodenwerkstoffs in den Abtragpartikeln identifiziert. Die Aufnahmen des Rasterelektronenmikroskops ermöglichen die Identifikation von thermisch beeinflusstem Werkstoff sowie Mikrorissen und Bruchkanten an den Korngrenzen der Keramiken. Anhand dieser Informationen werden Rückschlüsse auf die vorliegenden Abtragmechanismen der jeweiligen Keramiken abgeleitet und weitere Erkenntnisse zum Werkstoffverhalten beim trockenfunkenerosiven Feinbohren erarbeitet.

7.2 Werkstückwerkstoff $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$

Die entstehenden Abtragpartikel bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, mit den unter Kapitel 6.4 abgeleiteten optimalen Parameterkombinationen, weisen flache, teilweise leicht gekrümmte Geometrien auf, [Tabelle 7-1](#). Der überwiegend auftretende Partikeldurchmesser d_p liegt bei $d_p \leq 100 \mu\text{m}$, kleinere Partikel sind nur geringfügig vorhanden. Die EDX-Analyse bestätigt Titan und Silizium als Hauptbestandteile der Abtragpartikel, welche dem Grundwerkstoff entsprechen. Lediglich stellenweise an den Oberflächen haben die Abtragpartikel geringfügige Anteile aufgeschmolzenen und wieder erstarrten Elektrodenwerkstoffs. Im Gegensatz zum Grundwerkstoff, der einen Stickstoffanteil $> 22 \%$ aufweist, sind in den Abtragpartikeln keine Stickstoffanteile mehr zu identifizieren. Demzufolge ist es prozessbedingt zu einer chemischen Lösung des gebundenen Stickstoffs im Grundwerkstoff und zu einer gasförmigen

Entweichung in Form von Stickstoff N_2 gekommen. Dies deutet auf Temperaturen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren $> 1850^\circ\text{C}$ hin, da bei keramischen Si_3N_4 ab Temperaturen $\geq 1850^\circ\text{C}$ die Zersetzung in Silizium Si und Stickstoff N_2 beginnt [TEL07].

Tabelle 7-1: Abtragpartikel von Si_3N_4 -TiN mit optimaler Parameterkombination

Parameterkombination für Si_3N_4 -TiN						
Entladekapazität C_e	Einschalt-dauer t_{on}	Ausschalt-dauer t_{off}	Spül-druck p_s	Leerlauf-spannung u_0	Gain	Compression
10 nF	6,5 μs	4,2 μs	80 bar	60 V	40 %	30 %
Erosionsergebnis						
		Abtragpartikel Vergrößerung 2000-fach	Abtragpartikel Vergrößerung 2000-fach			
Erosionsdauer t_{ero}	16 s					
relativer Elektrodenverschleiß ϑ	9 %					
Spaltweite s_L	34 μm					

Die flache und leicht gekrümmte Form sowie die Partikelgröße bis $d_p \leq 100 \mu\text{m}$, welche im Widerspruch zu den Ausprägungen der Spaltweiten $s_L = 34 \mu\text{m}$ steht, weisen auf eine Ansammlung kleiner verschmolzener Abtragpartikel im Arbeitsspalt hin, die im gesamten herausgelöst werden. Im Gegensatz zu der EDX-Analyse der Schliffbilder in Kapitel 4.2.1, können die einzelnen Siliziumnitrid- und Titanitridphasen nicht in den Abtragpartikeln unterschieden werden. Dies bestätigt den Melting-Effekt als Hauptabtragmechanismus bei der Bearbeitung von Si_3N_4 -TiN.

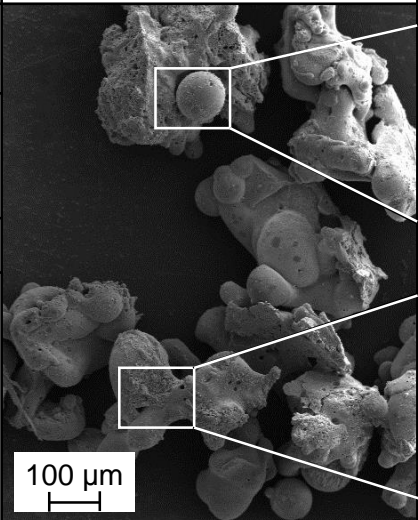
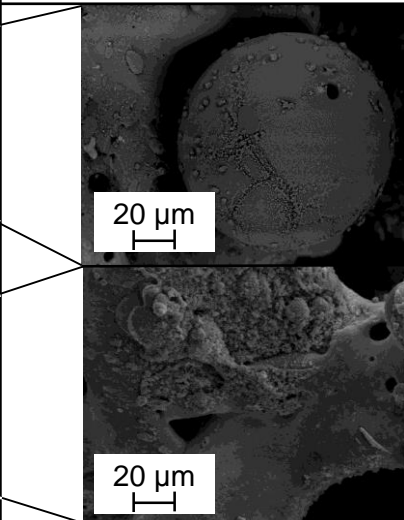
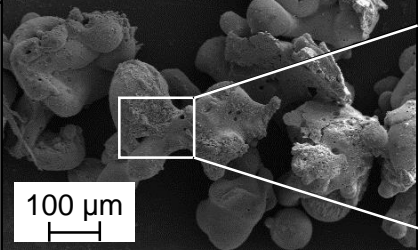
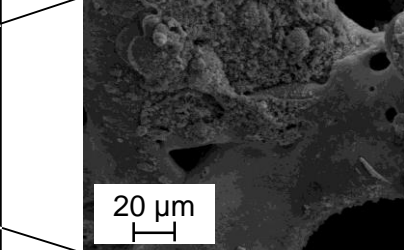
Trotz entstehender Bruchkanten an den Partikelrändern, die als Nachweis für eine Thermochockwirkung dienen, kann diese Wirkung bei den vorliegenden Abtragpartikeln aufgrund der verschmolzenen Phasen ausgeschlossen werden. Die Bruchkanten entstehen beim mechanischen Lösen der angelagerten Abtragpartikel am Bohrungsrand, zurückzuführen auf den entwichenen Stickstoff, denn dieser lässt den Rand sehr porös und bruchempfindlich werden.

In Tabelle 7-2 sind die Bearbeitungsergebnisse mit den entstandenen Abtragpartikeln unter Verwendung der hochenergetischen Parameterkombination aufgeführt. Das Erosionsergebnis unterscheidet sich zur optimalen Parameterkombination um eine zwei Sekunden geringere Erosionsdauer t_{ero} , einen 23 % höheren relativen Elektrodenverschleiß ϑ und um 15 μm größere Spaltweiten s_L .

Die entstehenden Abtragpartikel weisen Partikeldurchmesser d_p bis zu $d_p = 500 \mu\text{m}$ mit flachen bis teilweisen runden Konturen auf. Des Weiteren entstehen kugelförmige Abtragpartikel, welche eine glatte, teils mit Mikrorissen gesäumte Oberfläche zeigen. An anderen Stel-

len haben die Abtragpartikel eine unregelmäßige poröse Oberflächen, vereinzelte Luft einschlüsse und scharfe Bruchkanten.

Tabelle 7-2: Abtragpartikel von Si₃N₄-TiN mit hochenergetischer Parameterkombination

hochenergetische Parameterkombination für Si ₃ N ₄ -TiN						
Entladekapazität C _e	Einschalt-dauer t _{on}	Ausschalt-dauer t _{off}	Spül-druck p _s	Leerlauf-spannung u ₀	Gain	Compres-sion
48 nF	4,2 μs	27,4 μs	80 bar	250 V	40 %	30 %
Erosionsergebnis						
		Abtragpartikel Vergrößerung 200-fach	Abtragpartikel Vergrößerung 2000-fach			
Erosionsdauer t _{ero}	14 s					
relativer Elektroden-verschleiß ϑ	32 %					
Spaltweite s _L	49 μm					
						

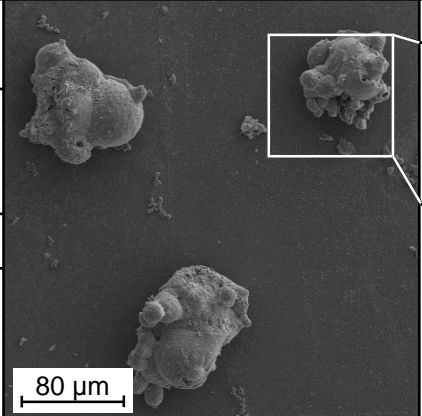
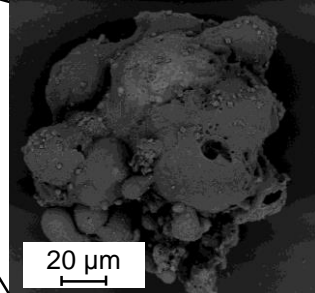
Die EDX-Analyse zeigt ein vergleichbares Ergebnis zu den optimalen Parameterkombinationen, dennoch sind punktuell höhere Anteile des Elektrodenwerkstoffs bei den hochenergetischen Parameterkombinationen zu erkennen. Dieses Ergebnis stimmt mit dem Verschleißverhalten der Werkzeugelektrode, welches bei den hochenergetischen Parameterkombinationen wesentlich höher ist, überein.

7.3 Werkstückwerkstoff TiB₂

Die entstehenden Abtragpartikel bei der Bearbeitung von TiB₂, mit der in Kapitel 6.4 optimierten Parameterkombination, weisen Partikeldurchmesser d_p zwischen 20 μm ≤ d_p ≤ 100 μm auf. Angesichts der teilweise geringen Partikelgröße erfolgt die Untersuchung der Elementbestandteile über die EDX-Analyse ausschließlich bei größeren Partikeln.

Von der Geometrie her weisen die großen Abtragpartikel eine flache Form mit runden Tropfenformationen und glatten Oberflächen auf, was auf Schmelzvorgänge des Werkstoffs hindeutet, Tabelle 7-3. Des Weiteren sind Luft einschlüsse, die typischerweise bei thermischen Fertigungsverfahren entstehen und eine Folge aufgeschmolzenen und wiedererstarteten Werkstoffs sind, an den Abtragpartikeln zu erkennen. Vorerst deuten diese Hinweise auf den Melting-Effekt bei TiB₂ hin, wodurch auch die entstehende Partikelgröße, trotz geringer Spaltweiten s_L, zu erklären ist.

Tabelle 7-3: Abtragpartikel von TiB₂ mit optimalen Parameterkombination

Parameterkombination für TiB ₂						
Entladekapazität C _e	Einschalt-dauer t _{on}	Ausschalt-dauer t _{off}	Spül-druck p _s	Leerlauf-spannung u ₀	Gain	Compres-sion
10 nF	11,5 μs	2,1 μs	80 bar	180 V	10 %	30 %
Erosionsergebnis						
		Abtragpartikel Vergrößerung 400-fach	Abtragpartikel Vergrößerung 2000-fach			
Erosionsdauer t _{ero}	120 s					
relativer Elektroden- verschleiß ϑ	183 %					
Spaltweite s _L	7 μm					

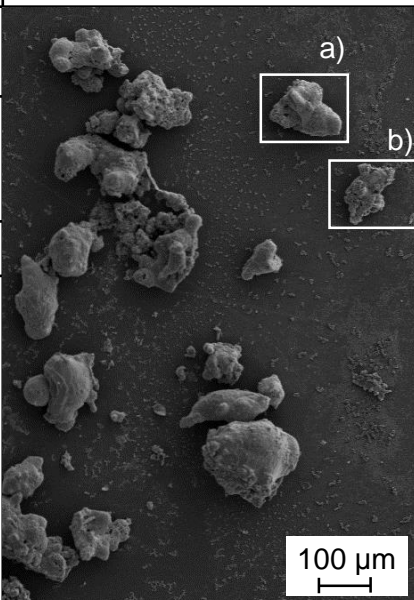
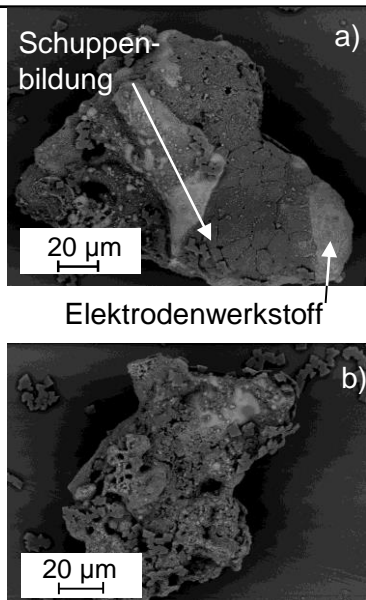
Die EDX-Analyse zeigt flächendeckende Bestandteile von Titan und Bor, welches aus dem bearbeiteten TiB₂ stammt, bzw. den Nachweis von Titanborid erbringt. Allerdings bestehen die Abtragpartikel überwiegend aus Wolfram und demzufolge aus dem Werkstoff der Hartmetallelektrode Wolframcarbid. Dies ist auf den hohen relativen Elektrodenverschleiß ϑ zurückzuführen bei dem annähernd doppelt so viel Elektrodenwerkstoff abgetragen wird wie vom zu bearbeitenden Keramikwerkstoff. Der Werkstoffanalyse zufolge bestehen die Abtragpartikel aus einem Gemenge aufgeschmolzenen und wieder erstarrten Elektrodenwerkstoffs sowie gleichmäßig verteilten Keramikpartikeln.

Durch die Erhöhung des Energieanteils der Entladungen, mittels der in [Tabelle 7-4](#) aufgeführten Parameterkombination, wird die Zusammensetzung der entstehenden Abtragpartikel deutlicher. Runde Tropfenformationen und glatte Oberflächen, so wie diese bei den Abtragpartikeln mit der optimierten Parameterkombination entsteht, wurden unter den hochenergetischen Prozessparametern reduziert und sind ausschließlich partiell vorhanden. An diesen Stellen bestätigt die EDX-Analyse einen hohen Wolframanteil, welcher auf den Elektrodenwerkstoff hinweist. Die Oberfläche der Abtragpartikel zeigt eine löchrige poröse Erscheinung, die optisch den Schlifffildern des unbehandelten TiB₂ Werkstoffs entsprechen, vgl. [Bild 4-2](#).

Des Weiteren sind vereinzelt auf der Oberfläche der Abtragpartikel freigelegte TiB₂ Keramikkörner vorhanden, welche ihre typische flache und rechteckige Form ohne ersichtlichen thermischen Einfluss besitzen. An den Bohrungsrändern sowie an den Mantelflächen der in TiB₂ gefertigten Bohrungen ist die Anordnung dieser freigelegten Keramikkörner mit Bruchkanten an den Korngrenzen zu erkennen, was auf ein Herauslösen ohne Ausschmelzvorgänge hindeutet vgl. [Bild 6-4](#).

Auffallend sind schuppenähnliche Gebiete auf den Partikeln und flächendeckende Mikrorisse mit Risslängen l_R von $l_R \approx 10 \mu\text{m}$ welche der unter Kapitel 4.2.1 ermittelten Korngröße der TiB_2 Keramik entsprechen. Die Rissbildung entlang der Korngrenzen ist eine Folge entstehender thermischer Spannungen, welche eine Voraussetzung für den Spalling-Effekt sind.

Tabelle 7-4: Abtragpartikel von TiB_2 mit hochenergetischen Parameterkombination

hochenergetische Parameterkombination für TiB_2						
Entladekapazität C_e	Einschalt-dauer t_{on}	Ausschalt-dauer t_{off}	Spül-druck p_s	Leerlauf-spannung u_0	Gain	Compres-sion
48 nF	4,2 μs	27,4 μs	80 bar	250 V	40 %	30 %
Erosionsergebnis						
		Abtragpartikel Vergrößerung 200-fach	Abtragpartikel Vergrößerung 2000-fach			
Erosionsdauer t_{ero}	110 s					
relativer Elektrodenverschleiß ϑ	223 %					
Spaltweite s_L	18 μm					

7.4 Werkstoffspezifische Abtragmechanismen

Anhand der im Stand der Technik, unter Kapitel 2.4.2, dargelegten charakteristischen Abtragmechanismen für keramische Werkstoffe sowie der durchgeführten Betrachtung entstehender Abtragpartikel werden folgende Erkenntnisse für die Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 abgeleitet:

Titannitrid infiltriertes Siliciumnitrid $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$

Das für die Untersuchungen verwendete $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ ist eine nach Tabelle 4-2 zusammengesetzte Mischkeramik, deren Abtragpartikel durch das trockenfunkenerosive Feinbohren typische Merkmale des Melting-Effekts aufweisen. Im Einzelnen sind dies:

- Flache Abtragpartikel mit großen Partikeldurchmessern d_p , welche durch ein schichtweises Erstarren des aufgeschmolzenen Werkstoffs an den Werkzeugelektroden- und Werkstückoberflächen entstehen und anschließend abplatzen.

- Runde Formen und Konturen mit teilweise hohlen, nichtkristallinen Kugeln, die durch das Aufschmelzen und Wiedererstarren des keramischen Werkstoffs entstehen.
- Agglomerierte Verschmelzung des Elektrodenwerkstoffs mit dem Werkstückwerkstoff.

Neben den nachgewiesenen Eigenschaften des Melting-Effekts haben die Abtragpartikel von Si_3N_4 -TiN Merkmale, welche auf die Oxidation und Dekomposition der Werkstoffbestandteile hinweisen. Dabei reagieren keramische Bestandteile mit dem verwendeten Dielektrikum, wodurch Gase freigesetzt werden. Bei der Si_3N_4 -TiN Keramik kommt es aufgrund des thermischen Prozesses zu einer Reaktion, welche zur gasförmigen Freisetzung des Stickstoffs führt und eine poröse Oberfläche der Abtragpartikel zur Folge hat.

Demgemäß liegt bei der Si_3N_4 -TiN Keramik eine Kombination aus mehreren Abtragmechanismen vor, wobei der Melting-Effekt den überwiegenden Anteil bildet.

Titanborid TiB_2

Das verwendete TiB_2 ist ein reiner keramischer Werkstoff mit geringen Kohlenstoffanteilen und einem äquivalenten Korndurchmesser d_v bis zu $d_v = 10 \mu\text{m}$, siehe Tabelle 4-2. Die Ergebnisse der untersuchten Abtragpartikel weisen auf den Werkstoffabtrag durch Thermoschock, dem Spalling-Effekt, mit folgenden Eigenschaften hin:

- Flache und kugelförmige Abtragpartikel mit Partikeldurchmessern d_p $20 \mu\text{m} \leq d_p \leq 200 \mu\text{m}$, deren Zusammensetzung hauptsächlich aus agglomeriertem Elektrodenwerkstoff und Keramikkörnern besteht.
- Vereinzelt verschmolzene Phasen des Grundwerkstoffs mit dem Elektrodenwerkstoff, da es aufgrund der hohen Wärmezufuhr während des Erosionsprozesses zu einem Aufschmelzen des Werkstückwerkstoffs kommt.
- Kleine Bruchstücke und Keramikkörner des Werkstückwerkstoffs in den Abtragpartikeln.
- Kantige und unregelmäßige Oberfläche auf den Abtragpartikeln.

Des Weiteren zeigen die in TiB_2 gefertigten Bohrungen sehr geringe Spaltweiten s_L und an den Bohrungsrändern sowie an der Mantelfläche keine Hinweise auf Schmelzvorgänge. Dies sind, wie bereits in den Untersuchungen des Kapitels 6 erwähnt, Merkmale für den Werkstoffabtrag über Thermoschockwirkung. Die durch den Spalling-Effekt abgetragenen Keramikkörner und Bruchstücke des Werkstückwerkstoffs werden von dem verflüssigten Elektrodenwerkstoff aufgenommen und zu großen Abtragpartikeln verschmolzen. Dieses spröde Werkstoffgemisch haftet an der Werkzeugelektrode schichtweise fest und nimmt deren Form an, bis es aufgrund mechanischer Kräfte, beispielweise verursacht durch den Luftstrom der Spülung, gelöst wird. Damit sind die flache Form der Abtragpartikel und die vorhandenen Bruchkanten zu erklären.

8 Einfluss prozessfördernder Gase auf die Prozesskenngrößen und das Arbeitsergebnis

Für die Analyse des Prozessverhaltens unterschiedlicher Gase als Dielektrikum für das trockenfunkenerosive Feinbohren werden die Haupteffekte der Prozessparameter, analog der Vorgehensweise des Kapitels 6.1.2, untersucht. Ausgehend von Parameterkombinationen, welche das trockenfunkenerosive Feinbohren in den Werkstoffen $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 unter dem entsprechenden Gas ermöglichen, erfolgt die Festlegung der oberen und unteren Faktorstufe für die Faktoren:

- Entladekapazität C_e ,
- Einschaltdauer t_{on} ,
- Ausschaltdauer t_{off} ,
- Ladestrom i_L und
- Leerlaufspannung u_0 .

Anhand eines aus den Faktorstufen abgeleiteten Versuchsplans werden 1 mm tiefe Durchgangsbohrungen mit 300 μm dicken Rohrelektroden, bestehend aus Hartmetall, in den Werkstoffen $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 , gefertigt. Anschließend erfolgen die messtechnische Auswertung der Bearbeitungsergebnisse und die Gegenüberstellung der Haupteffekte einzelner Faktoren auf die Zielgrößen:

- Erosionsdauer t_{ero} ,
- relativer Elektrodenverschleiß ϑ ,
- obere Bohrungsdurchmesser d_{Bo} am Bohrungseintritt und
- unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}
am Bohrungsaustritt aus denen die Spaltweite s_L errechnet wird.

Über die Auswertung der Zielgrößen können Aussagen zum Einfluss des untersuchten Gases auf die Prozessgüte und das entstehende Erosionsergebnis getroffen werden. Auf der Grundlage der in Kapitel 4.2.3 dargelegten Erkenntnisse und Eigenschaften unterschiedlicher Gase, die als thermische Prozessgase z. B. für die Laser-, Plasma- und Schweißbearbeitung verwendet werden, kommen folgende Gase zum Einsatz:

- Argon Ar,
- Helium He,
- Sauerstoff O_2 und
- Stickstoff N_2 .

Anhand der Effektanalyse werden Erkenntnisse zum Verhalten einzelner Prozessstellgrößen unter dem Einsatz von Prozessgasen als Dielektrikum erarbeitet sowie relevante Prozessstellgrößen für die weiterführende Prozessoptimierung identifiziert.

8.1 Einfluss von Argon

Die Festlegung der Faktorstufen erfolgt unter Berücksichtigung einer hohen zu erzielenden Abtragrate V_w sowie eines möglichst geringen relativen Elektrodenverschleißes ϑ . Für das Prozessgas Argon können für beide Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 dieselbe untere und obere Faktorstufe und demzufolge die gleichen Versuchspläne verwendet werden. Die zur Er-

stellung des Versuchsplans eingesetzten Faktoren mit der unteren und oberen Faktorstufe sind in Tabelle 8-1 sowie der daraus gebildete Versuchsplan in Tabelle 8-2 aufgelistet.

Tabelle 8-1: Einteilung der Faktorstufen zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 mit Argon als Prozessgas

Faktoren	Einheit	untere Faktorstufe	obere Faktorstufe
Entladekapazität C_e	nF	10	33
Einschalt-dauer t_{on}	μs	10	13,3
Ausschalt-dauer t_{off}	μs	154	133,4
Ladestrom i_L	A	4	5
Leerlaufspannung u_0	V	200	220

Tabelle 8-2: Versuchsplan zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 mit Argon als Prozessgas

Technologie	Entlade-kapazität C_e	Einschalt-dauer t_{on}	Ausschalt-dauer t_{off}	Ladestrom i_L	Leerlauf-spannung u_0
1	10 nF	10 μs	154 μs	5 A	220 V
2	33 nF	10 μs	154 μs	4 A	200 V
3	10 nF	13,3 μs	154 μs	4 A	220 V
4	33 nF	13,3 μs	154 μs	5 A	200 V
5	10 nF	10 μs	133,4 μs	5 A	200 V
6	33 nF	10 μs	133,4 μs	4 A	220 V
7	10 nF	13,3 μs	133,4 μs	4 A	200 V
8	33 nF	13,3 μs	133,4 μs	5 A	220 V

Die Erosionsergebnisse mit den in Tabelle 8-2 aufgelisteten Technologien sind in Bild 8-1 für die Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 gegenübergestellt.

Im Vergleich zu den Erosionsergebnissen des Kapitels 6 mit Luft als Dielektrikum, bei welchem, zurückzuführen auf den Werkstückwerkstoff, erhebliche Unterschiede in den zu erzielenden Erosionsdauern t_{ero} vorliegen, sind unter Argon keine signifikanten Abweichungen zu erkennen. Die Ergebnisse bei der Untersuchung der Erosionsdauer t_{ero} weisen für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 tendenziell vergleichbare Werte in Abhängigkeit von den Technologien auf. Dabei werden deutlich längere Zeiten für die Fertigung der Durchgangsbohrungen benötigt. Diese liegen in Bereichen zwischen $152 \text{ s} \leq t_{ero} \leq 418 \text{ s}$ für TiB_2 und $192 \text{ s} \leq t_{ero} \leq 351 \text{ s}$ für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$. Eine Ausnahme bildet Technologie 5, bei welcher die größte Differenz der Erosionsdauer t_{ero} zwischen $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 vorliegt. Dabei erreicht die Erosionsdauer t_{ero} ihren Maximalwert bei der Bearbeitung von TiB_2 mit $t_{ero} = 418 \text{ s}$ sowie eine hohe Standardabweichung s von $s = 62 \text{ s}$, was auf einen instabilen Erosionsprozess mit der verwendeten Parameterkombination zurückzuführen ist.

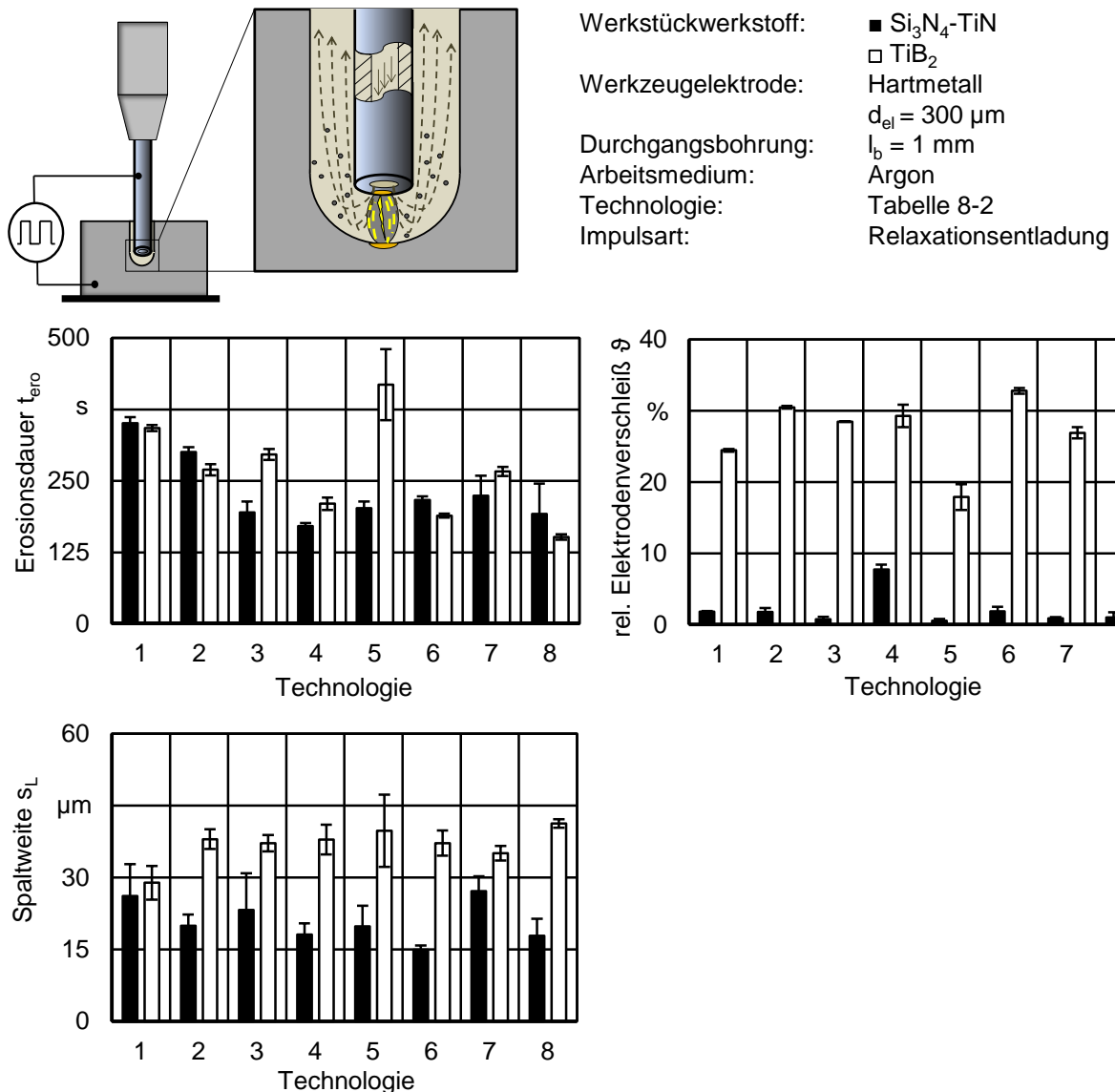


Bild 8-1: Einfluss unterschiedlicher Technologien (Tabelle 8-2) auf die Zielgrößen Erosionsdauer t_{ero} , Spaltweite s_L und relativer Elektrodenverschleiß ϑ mit Argon als Dielektrikum

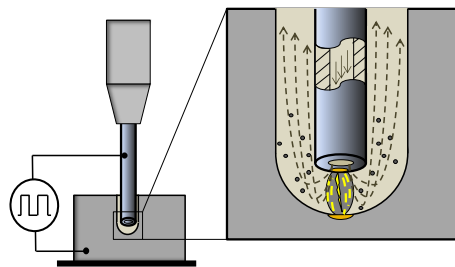
Beim relativen Elektrodenverschleiß ϑ und den erzielten Spaltweiten s_L sind ebenfalls erhebliche Unterschiede mit Argon gegenüber Luft festzustellen. Es werden geringere Verschleißwerte, trotz langer Eingriffszeiten der Werkzeugelektrode im Werkstück, realisiert. Der erzielte relative Elektrodenverschleiß ϑ entspricht bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ bei allen Parameterkombinationen $\vartheta \leq 1,8 \%$. Eine Ausnahme bildet Technologie 4 mit einem relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta = 8 \%$. Der geringste Verschleißwert wird unter Technologie 5 erreicht mit $\vartheta = 0,5 \%$. Bei TiB_2 liegt der relative Elektrodenverschleiß ϑ in einem Bereich zwischen $18 \% \leq \vartheta \leq 37 \%$, welcher im Gegensatz zur Bearbeitung mit Luft gering ist.

Die Spaltweiten s_L sind bei allen Technologien bei TiB_2 mit $29 \mu\text{m} \leq s_L \leq 41 \mu\text{m}$ höher im Vergleich zu $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit $14 \mu\text{m} \leq s_L \leq 27 \mu\text{m}$.

Zurückzuführen auf die unter Kapitel 4.2.3 beschriebenen Eigenschaften von Argon, insbesondere die geringe Durchschlagsfestigkeit $E_D = 0,65 \text{ kV/mm}$, kommt es zu frühzeitigen,

hochfrequenten Funkenentladungen, die eine geringe Energiedichte aufweisen und demzufolge eine geringe Wärmeeinbringung in das Werkstück bewirken. Aufgrund der gestreuten Plasmawolke sowie der daraus hervorgehenden geringen Energiedichte ist die entstehende Prozesswärme nicht ausreichend um eine Thermoschockwirkung und somit den Spalling-Effekt bei TiB_2 auszulösen. Es erfolgt eine gleichmäßige Erwärmung des Werkstückwerkstoffs, was zur Aufschmelzung und vorwiegenden Verdampfung dessen führt. Dies bewirkt die langen Erosionszeiten t_{ero} und die für die Funkenerosion durchschnittlichen Funkenweiten s_L . Auf die unterschiedlich hohen Schmelztemperaturen T_s von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit $T_s = 2151 \text{ K}$ gegenüber zu TiB_2 mit $T_s = 3243 \text{ K}$ sind die Abweichungen in den Ergebnissen zurückzuführen. Hierdurch entstehen für TiB_2 , verursacht durch eine steigende Energiezufuhr als Folge der längeren Erosionsdauern t_{ero} , ein höherer relativer Elektrodenverschleiß ϑ und größere Spaltweiten s_L als bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$.

In Bild 8-2 sind die mit der Technologie 1 aus Tabelle 8-2 gefertigten Mikrobohrungen mit vergrößerter Aufnahme des Bohrungsrandes dargestellt.



Werkstückwerkstoff:	$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, TiB_2
Werkzeugelektrode:	Hartmetall
	$d_{\text{el}} = 300 \mu\text{m}$
Durchgangsbohrung:	$l_b = 1 \text{ mm}$
Arbeitsmedium:	Argon
Technologie:	Technologie 1 der Tabelle 8-2
Impulsart:	Relaxationsentladung

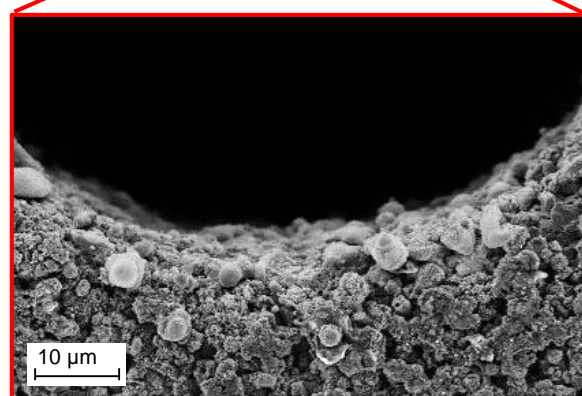
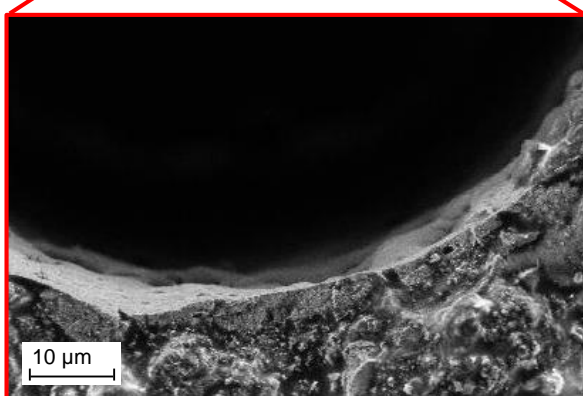
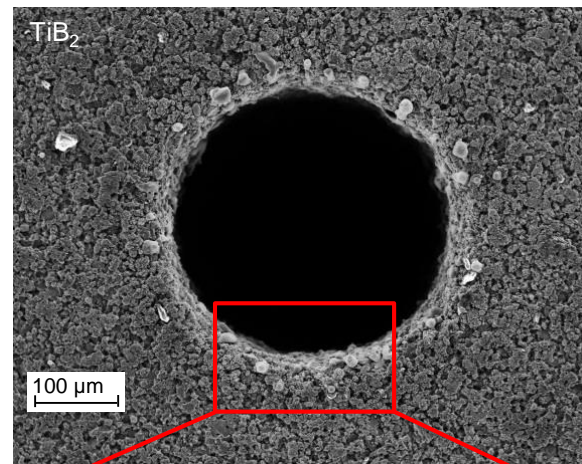
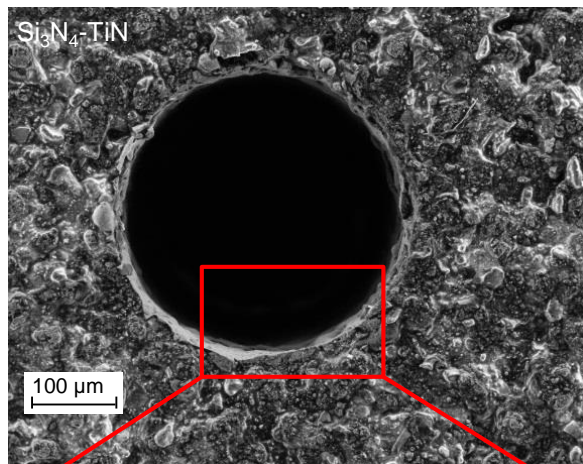


Bild 8-2: Mikrobohrungen einschließlich vergrößerter Aufnahme des Bohrungsrandes in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 mit Argon als Dielektrikum

Die Bohrungen weisen eine hohe geometrische Genauigkeit mit scharfkantigen Bohrungseingängen auf. An den Bohrungskanten sind die thermischen Einflüsse zu erkennen, in Form einer weißen Schicht bei Si₃N₄-TiN und aufgeschmolzenen Keramikpartikeln bei TiB₂, welche, wie oben beschrieben, Aufschmelz- und Verdampfungsvorgänge verdeutlichen. Da Argon als reaktionsträges Edelgas keine chemischen Reaktionen mit der Umgebung eingeht, entstehen keine Oxidation der Werkstoffbestandteile, welche Einfluss auf den trockenfunkenerosiven Feinbohrprozess haben. Der geringe relative Elektrodenverschleiß ϑ mit Argon gegenüber Luft als Dielektrikum ist ebenfalls darauf zurückzuführen.

In Tabelle 8-3 sind alle ermittelten Haupteffekte für Si₃N₄-TiN und TiB₂ des trockenfunkenerosiven Feinbohrens mit Argon als Dielektrikum zusammengefasst. Tabelle 6-4 gibt eine Übersicht zur Einteilung der Haupteffekte in Tabelle 8-3.

Tabelle 8-3: Übersicht der Haupteffekte beim trockenfunkenerosiven Feinbohren mit Argon als Dielektrikum

Faktor	Erosionsdauer t_{ero}	relativer Elektrodenverschleiß ϑ	oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}
Si₃N₄-TiN				
Kapazität C_e 10 nF → 33 nF	— -10 %	↓↓↓ 103 %	↑↑ -6 %	— -1 %
Einschaltdauer t_{on} 10 μs → 13,3 μs	↑↑↑ -31 %	↓↓↓ 55 %	— 1 %	— -1 %
Ausschaltdauer t_{off} 154 μs → 133,4 μs	↑↑ -20 %	↑↑↑ -96 %	— -2 %	— -0 %
Ladestrom i_L 4 A → 5 A	— -2 %	↓↓↓ 72 %	— -0 %	— -1 %
Leerlaufspannung u_0 200 V → 220 V	— 6 %	↑↑↑ -68 %	— -1 %	— -0 %
TiB₂				
Kapazität C_e 10 nF → 33 nF	↑↑↑ -47 %	↓↓↓ 28 %	— 2 %	— 2 %
Einschaltdauer t_{on} 10 μs → 13,3 μs	↑↑↑ -27 %	↓↓↓ 14 %	— 2 %	— -0 %
Ausschaltdauer t_{off} 154 μs → 133,4 μs	— -9 %	— 2 %	— 1 %	— 2 %
Ladestrom i_L 4 A → 5 A	↓ 9 %	↑↑↑ -9 %	— -0 %	— 0 %
Leerlaufspannung u_0 200 V → 220 V	↑↑ -17 %	↓↓↓ 16 %	— -2 %	— 0 %

Die Erhöhung der Kapazität C_e von der unteren zur oberen Faktorstufe bewirkt eine Verlängerung der Entladedauer t_e von $t_e = 0,4 \mu\text{s}$ auf $t_e = 0,72 \mu\text{s}$ und hat einen hoch signifikanten Einfluss auf den relativen Elektrodenverschleiß ϑ sowie bei TiB₂ auf die Erosionsdauer t_{ero} . Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Effekte aller Faktoren für den relativen Elektrodenverschleiß ϑ von Si₃N₄-TiN aufgrund der geringen Werte und die gegen Null strebende Standardabweichung s zu vernachlässigen sind, weil diese keine relevante Änderung verursa-

chen. Da TiB_2 mit $\lambda = 93 \text{ W/mK}$ eine nahezu dreifach höhere Wärmeleitfähigkeit λ als $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit $\lambda = 30 \text{ W/mK}$ aufweist, wird mehr Wärme über das Werkstück abgeleitet. Durch die Verlängerung der Entladedauer t_e kommt es zu einer Erhöhung der Energiezufuhr, was die Aufschmelzung und Verdampfung von TiB_2 ansteigen lässt.

Den gleichen Effekt bewirkt die Erhöhung der Einschaltdauer t_{on} , welche Einfluss auf die Entladephasen sowie die Anzahl nachfolgender Entladungen und demzufolge die Höhe der Energie, die in das Werkstück eingebracht wird, bestimmt. Für beide Werkstoffe bewirkt die Erhöhung der Einschaltdauer t_{on} von $t_{\text{on}} = 10 \mu\text{s}$ auf $t_{\text{on}} = 13,3 \mu\text{s}$ eine hoch signifikante Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} . Hingegen verursacht die Herabsetzung der Ausschaltdauer t_{off} , welche die Dauer der Pausen zwischen den Entladephasen regelt und somit ebenfalls Einfluss auf die Menge der Energie hat, welche in das Werkstück eingebracht wird, bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ lediglich eine Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} . Dies ist ebenfalls auf die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit λ der Keramiken zurückzuführen. Bei TiB_2 ist die Reduzierung der Ausschaltdauer t_{off} von $t_{\text{off}} = 154 \mu\text{s}$ auf $t_{\text{off}} = 133,4 \mu\text{s}$ aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit nicht ausreichend um Stauwärme zu produzieren. Demzufolge ist die Ausschaltdauer t_{off} für die Bearbeitung von TiB_2 mit Argon als Dielektrikum und der verwendeten Parameterkombination zu lang eingestellt und bietet Potential zur Steigerung der Abtragleistung.

Der Ladestrom i_L , welcher bei Erhöhung zu einer Steigerung der Entladefrequenz f_e führen kann, bewirkt ausschließlich auf den relativen Elektrodenverschleiß ϑ eine hoch signifikante Änderung. Ebenfalls die Leerlaufspannung u_0 , über die der Spitzenstrom \hat{i} in Abhängigkeit von der Kapazität C_e eingestellt wird. Zurückzuführen auf die geringen Standardabweichungen des relativen Elektrodenverschleißes ϑ verursachen die Änderungen der Faktoren keine relevanten Änderungen an den Zielgrößen. Des Weiteren hat keine der durchgeführten Faktoränderungen einen signifikanten Einfluss auf den oberen und unteren Bohrungsdurchmesser. Dies verdeutlicht die hohe Prozessstabilität durch den Einsatz von Argon als Dielektrikum.

8.2 Einfluss von Helium

Beim Einsatz von Helium als Dielektrikum werden für die Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 zur Gewährleistung einer hohen Prozessstabilität bei der Durchführung der Effektanalyse unterschiedliche, auf den jeweiligen Werkstoff angepasste, Startparameter verwendet. Die zur Erstellung des Versuchsplans eingesetzten Faktoren mit der unteren und oberen Faktorstufe für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ sind in Tabelle 8-4 sowie der daraus gebildete Versuchsplan in Tabelle 8-5 aufgelistet. Tabelle 8-6 und Tabelle 8-7 beinhalten die verwendeten Faktorstufen sowie den daraus abgeleiteten Versuchsplan für TiB_2 .

Tabelle 8-4: Einteilung der Faktorstufen zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von Si_3N_4 -TiN mit Helium als Prozessgas

Faktoren	Einheit	untere Faktorstufe	obere Faktorstufe
Entladekapazität C_e	nF	15	33
Einschaltdauer t_{on}	μs	4,2	5,6
Ausschaltdauer t_{off}	μs	2,7	1,78
Ladestrom i_L	A	2	3
Leerlaufspannung u_0	V	150	180

Tabelle 8-5: Versuchsplan zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von Si_3N_4 -TiN mit Helium als Prozessgas

Technologie	Entladekapazität C_e	Einschaltdauer t_{on}	Ausschaltdauer t_{off}	Ladestrom i_L	Leerlaufspannung u_0
1	15 nF	4,2 μs	2,7 μs	3 A	180 V
2	33 nF	4,2 μs	2,7 μs	2 A	150 V
3	15 nF	5,6 μs	2,7 μs	2 A	180 V
4	33 nF	5,6 μs	2,7 μs	3 A	150 V
5	15 nF	4,2 μs	1,78 μs	3 A	150 V
6	33 nF	4,2 μs	1,78 μs	2 A	180 V
7	15 nF	5,6 μs	1,78 μs	2 A	150 V
8	33 nF	5,6 μs	1,78 μs	3 A	180 V

Tabelle 8-6: Einteilung der Faktorstufen zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von TiB_2 mit Helium als Prozessgas

Faktoren	Einheit	untere Faktorstufe	obere Faktorstufe
Entladekapazität C_e	nF	10	15
Einschaltdauer t_{on}	μs	15,4	20,5
Ausschaltdauer t_{off}	μs	5,6	7,5
Ladestrom i_L	A	2,5	4
Leerlaufspannung u_0	V	170	180

Tabelle 8-7: Versuchsplan zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von TiB₂ mit Helium als Prozessgas

Technologie	Entladekapazität C _e	Einschalt-dauer t _{on}	Ausschalt-dauer t _{off}	Ladestrom i _L	Leerlaufspannung u ₀
1	10 nF	15,4 μs	5,6 μs	4 A	180 V
2	15 nF	15,4 μs	5,6 μs	2,5 A	170 V
3	10 nF	20,5 μs	5,6 μs	2,5 A	180 V
4	15 nF	20,5 μs	5,6 μs	4 A	170 V
5	10 nF	15,4 μs	7,5 μs	4 A	170 V
6	15 nF	15,4 μs	7,5 μs	2,5 A	180 V
7	10 nF	20,5 μs	7,5 μs	2,5 A	170 V
8	15 nF	20,5 μs	7,5 μs	4 A	180 V

Die Erosionsergebnisse der in Tabelle 8-5 und Tabelle 8-7 aufgelisteten Technologien für die Werkstoffe Si₃N₄-TiN und TiB₂ sowie mit Helium als Dielektrikum sind in Bild 8-3 gegenübergestellt. Die mit den unterschiedlichen Technologien erreichten Erosionsdauern t_{ero} weisen erhebliche Differenzen auf, in einem Bereich für Si₃N₄-TiN von 79 s ≤ t_{ero} ≤ 728 s und für TiB₂ von 105 s ≤ t_{ero} ≤ 410 s. In Abhängigkeit von den Technologien sind die Unterschiede zwischen den erzielten Erosionsdauern t_{ero} bei TiB₂ geringer als bei Si₃N₄-TiN.

Trotz langer Eingriffszeiten der Werkzeugelektrode im Werkstück sind die Werte für den relativen Elektrodenverschleiß ϑ mit Helium als Dielektrikum gegenüber Luft gering. Sie liegen in Bereichen für Si₃N₄-TiN mit 1,9 % ≤ ϑ ≤ 35 % und TiB₂ mit 21 % ≤ ϑ ≤ 43 %, wobei keine Zusammenhänge zwischen der Erosionsdauer t_{ero} und dem relativen Elektrodenverschleiß ϑ ersichtlich sind. Die entstehenden Spaltweiten s_L weisen vergleichbare Größen für Si₃N₄-TiN und TiB₂ auf, in Bereichen für Si₃N₄-TiN von 32 μm ≤ s_L ≤ 64 μm sowie für TiB₂ von 38 μm ≤ s_L ≤ 52 μm.

Begründet in der hohen erforderlichen Ionisierungsenergie, von E_i = 24,59 eV, zeigen die einzelnen Funkenentladungen große Spitzenströme î und Energien W_e auf. Bedingt durch die niedrige Dichte ρ und die geringe Molmasse M von Helium, woraus ein schwacher Plasmadruck am Fußpunkt der Entladung folgt, bewirken die Funkenentladungen eine unzureichende Energiedichte um die Keramikwerkstoffe zu verdampfen, wie dies bei Argon geschieht. Des Weiteren erfolgt die Entziehung der Prozesswärme über den Gasstrom des Heliums, das in einem Temperaturbereich 300 K ≤ T ≤ 8000 K eine sehr hohe thermische Leitfähigkeit κ und demzufolge eine gute Kühlwirkung aufweist.

Die Folgen sind das Aufschmelzen und Wiedererstarren des Werkstückwerkstoffs, sowie ein geringer relativer Elektrodenverschleiß ϑ. Wie auch unter Argon kommt es aufgrund der Reaktionsträgheit des Edelgases Helium zu keiner chemischen Reaktion mit der Umgebung, wodurch Oxidations- und Dekompositionseffekte an Werkzeug- und Werkstückelektrode unterbunden werden.

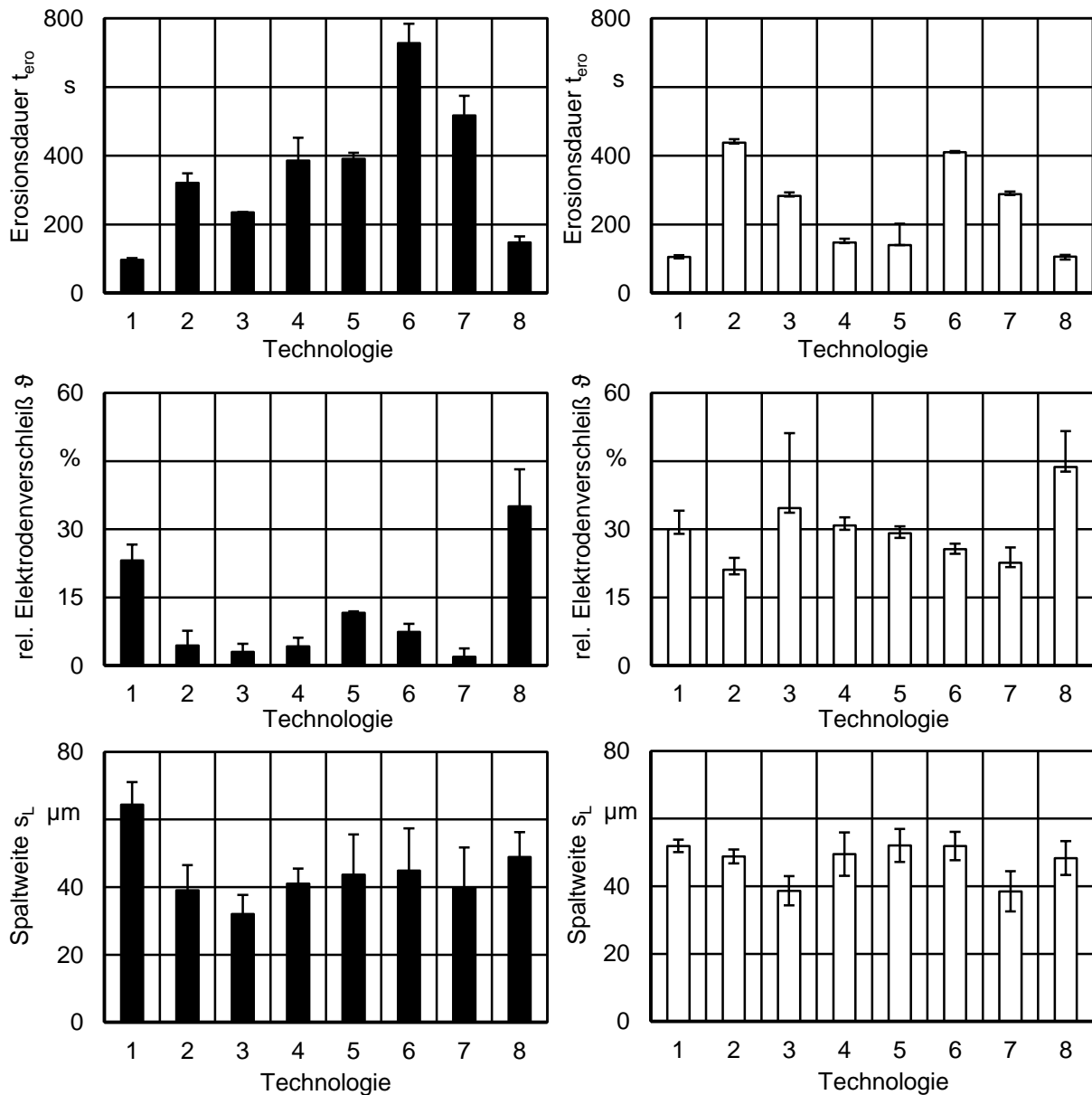
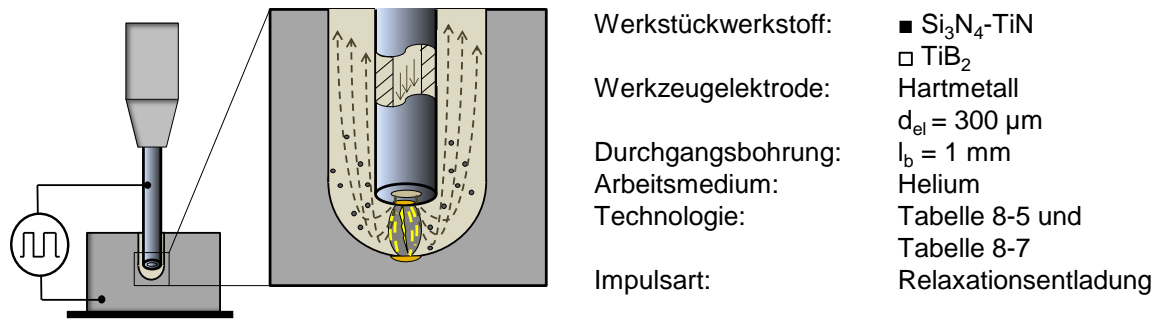
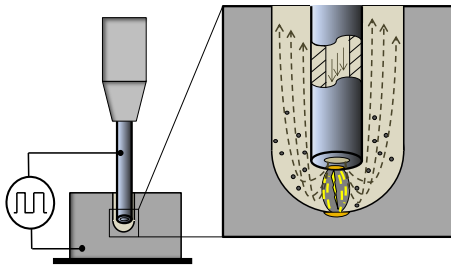


Bild 8-3: Einfluss unterschiedlicher Technologien (Tabelle 8-5 und Tabelle 8-7) auf die Zielgrößen Erosionsdauer t_{ero} , Spaltweite s_L und relativer Elektrodenverschleiß ϑ mit Helium als Dielektrikum

Das **Bild 8-4** zeigt mit Helium als Dielektrikum gefertigte Bohrungen in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 einschließlich vergrößerter Aufnahmen des Bohrungsrandes. Die Bohrungen weisen visuell eine hohe Formgenauigkeit mit einer scharfen Bohrungseintrittskante auf, welche teilweise verdeckt ist mit aufgeschmolzenem und wieder erstarrtem Werkstückwerkstoff. Auf der

Werkstückoberfläche und am Bohrungseingang von TiB_2 sind die einzelnen Keramikkörner aufgrund der thermischen Einflüsse und der daraus erfolgten Schmelzvorgänge nicht mehr zu identifizieren. Ein großer Anteil des aufgeschmolzenen Werkstückwerkstoffs wird über den Gasstrom der Spülung aus dem Arbeitsspalt geschleudert und haftet auf der Werkstückoberfläche in der Umgebung der Bohrung. Dies ist auf die hohe Expansion von Helium nach Austritt aus der Bohrung zurückzuführen, wodurch der Werkstückwerkstoff nicht weit genug entfernt, sondern im flüssigen Zustand auf die Oberfläche transportiert wird und dort wieder erstarrt.



Werkstückwerkstoff:	Si_3N_4-TiN , TiB_2
Werkzeugelektrode:	Hartmetall
	$d_{el} = 300 \mu m$
Durchgangsbohrung:	$l_b = 1 mm$
Arbeitsmedium:	Helium
Technologie Si_3N_4-TiN :	Technologie 3 der Tabelle 8-5
Technologie TiB_2 :	Technologie 1 der Tabelle 8-7
Impulsart:	Relaxationsentladung

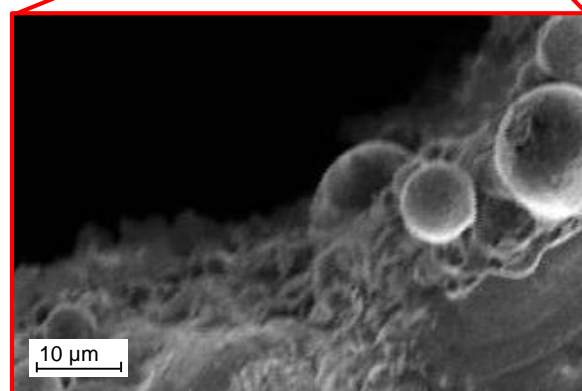
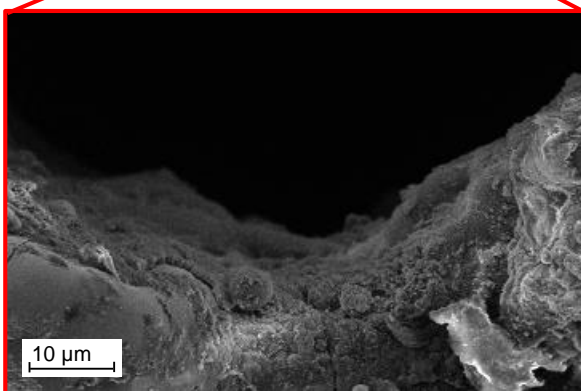
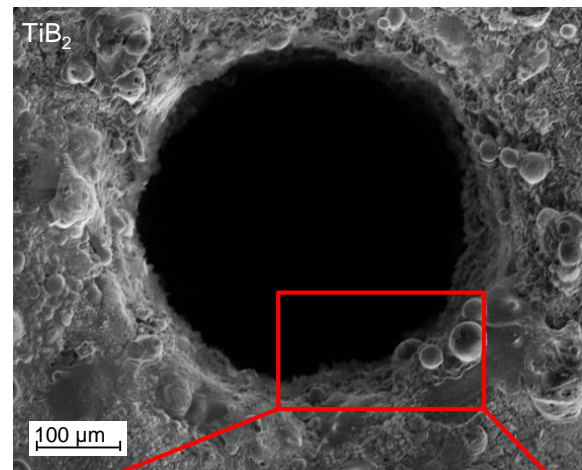
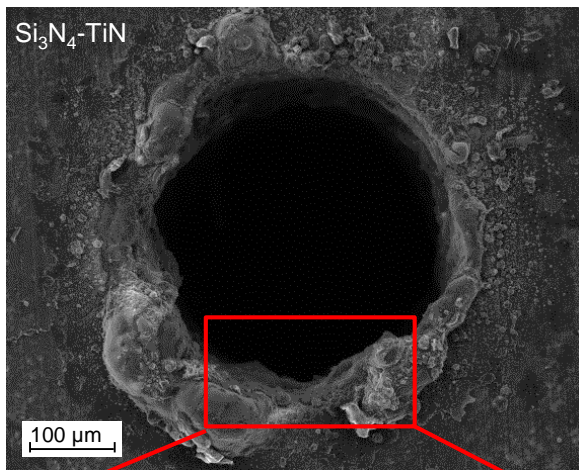


Bild 8-4: Mikrobohrungen einschließlich vergrößerter Aufnahme des Bohrungsrandes in Si_3N_4-TiN und TiB_2 mit Helium als Dielektrikum

In Tabelle 8-8 sind alle ermittelten Haupteffekte für Si_3N_4-TiN und TiB_2 des trockenfunkenerosiven Feinbohrens mit Helium als Dielektrikum zusammengefasst. Tabelle 6-4 gibt eine Übersicht zur Einteilung der Haupteffekte in Tabelle 8-8.

Tabelle 8-8: Übersicht der Hauteffekte beim trockenfunkenerosiven Feinbohren mit Helium als Dielektrikum

Faktor	Erosionsdauer t_{ero}	relativer Elektrodenverschleiß ϑ	oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}
Si₃N₄-TiN				
Kapazität C_e 15 nF → 33 nF	↓↓↓↓ 24 %	— 25 %	— 2 %	— -3 %
Einschaltdauer t_{on} 4,2 μs → 5,6 μs	↑↑ -18 %	— -5 %	↑ -6 %	— -2 %
Ausschaltdauer t_{off} 2,7 μs → 1,78 μs	↓↓↓↓ 53 %	↓↓ 47 %	— -3 %	— 2 %
Ladestrom i_L 2 A → 3 A	↑↑↑ -55 %	↓↓↓↓ 126 %	↓↓↓↓ 12 %	— 1 %
Leerlaufspannung u_0 150 V → 180 V	↑↑↑ -29 %	↓↓↓↓ 102 %	↓ 6 %	— 1 %
TiB₂				
Kapazität 10 nF → 15 nF	↓↓↓↓ 30 %	— 4 %	— 2 %	— 2 %
Einschaltdauer t_{on} 15,4 μs → 20,5 μs	↑↑↑ -28 %	— 22 %	↑↑ -3 %	↓ -4 %
Ausschaltdauer t_{off} 5,6 μs → 7,5 μs	— -3 %	— 4 %	— -0 %	— 1 %
Ladestrom i_L 2,5 A → 4 A	↑↑↑ -96 %	↓ 25 %	↓ 3 %	— 3 %
Leerlaufspannung u_0 170 V → 180 V	↑ -11 %	↓ 25 %	— 1 %	— 1 %

Die Änderung der Kapazität C_e bei Si₃N₄-TiN von $C_e = 15$ nF auf $C_e = 33$ nF und bei TiB₂ von $C_e = 10$ nF auf $C_e = 15$ nF bewirkt eine hoch signifikante Steigerung der Erosionsdauer t_{ero} . Dabei erfolgt die Erhöhung der Entladeenergien W_e der einzelnen Funkenentladungen über die Entladedauern t_e , dies führt zur Erhöhung des Wärmeeintrags in das Werkstück. Gleichzeitig wird die Entladefrequenz f_e durch die längeren Entladevorgänge reduziert. Hierdurch kommt es zu einem vermehrten Aufschmelzen des Werkstückwerkstoffs und zu einer Minimierung der Pausenanzahl zwischen den Entladungen, welche für den Abtransport und die Bildung der Abtragpartikel erforderlich sind. Dies führt trotz Erhöhung des Energiegehalts zur Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} , infolge einer gesenkten Entladefrequenz f_e .

Durch die Erhöhung der Einschaltdauer t_{on} bei Si₃N₄-TiN von $t_{\text{on}} = 4,2$ μs auf $t_{\text{on}} = 5,6$ μs und bei TiB₂ von $t_{\text{on}} = 15,4$ μs auf $t_{\text{on}} = 20,5$ μs wird ein hoch signifikanter Effekt für die Verkürzung der Erosionsdauer t_{ero} realisiert. Dies ist auf die Steigerung der Anzahl der Entladungen, bedingt durch die Verlängerung der Entladephasen, zurückzuführen, welche über den Zeitraum der Erosionsdauer t_{ero} zu einer Erhöhung der Entladefrequenz f_e führt. Somit wird aufgrund einer zunehmenden Anzahl der Pausen zwischen den Entladungen mehr Werkstückwerkstoff aus der Bohrung heraustransportiert, was schnellere Erosionsdauern t_{ero} bewirkt.

Eine Änderung der Ausschaltdauer t_{off} , innerhalb des betrachteten Bereichs zwischen $5,6 \mu\text{s} \leq t_{\text{off}} \leq 7,6 \mu\text{s}$, hat bei der Bearbeitung von TiB_2 keinen Einfluss auf die untersuchten Zielgrößen. Dies deutet auf eine prozessstabile Parameterkombination hin, bei der die Verlängerung der Pausenzeiten zwischen den Entladephasen um $\Delta t_{\text{off}} = 2 \mu\text{s}$ weder zu einer Verbesserung der Kühlwirkung noch zu einer erheblichen Herabsetzung der Entladefrequenz f_e führen. Bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ hingegen wird durch die Änderung der Ausschaltdauer t_{off} von $t_{\text{off}} = 2,7 \mu\text{s}$ auf $t_{\text{off}} = 1,78 \mu\text{s}$, zurückzuführen auf einen instabil werdenden Prozess, die Erosionsdauer t_{ero} und der relative Elektrodenverschleiß ϑ entscheidend erhöht. Dies ist eine Folge entstehender Prozesswärme, welche nicht ausreichend über das Werkstück, den Fluidstrom und die Werkzeugelektrode abgeleitet werden kann und zum Verschleiß letzterer führt. Die starke Bildung von verflüssigten Werkstück- und Werkzeugwerkstoff und somit die Kontamination des Arbeitsspalts führt, um diese zu kompensieren, zu vermehrten Regelbewegungen der Vorschubachse und somit zur Erhöhung der Erosionsdauer t_{ero} .

Die Steigerung des Ladestroms i_L , welche die Aufladung des Kondensators beschleunigt und somit die Entladefrequenz f_e erhöht, hat für beide Keramiken eine hoch signifikante Verbesserung der Erosionsdauer t_{ero} zur Folge. Bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ kommt es aufgrund der entstehenden Prozesswärme, verursacht durch die gestiegene Anzahl der Funkenentladungen und der niedrigen Wärmeleitfähigkeit λ des Werkstückwerkstoffs, zu einer erheblichen Steigerung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ . Die hierdurch entstehenden Abtragpartikel haben die Bildung von Passiventladungen am Bohrungseingang zur Folge, was zur Aufweitung des oberen Bohrungsdurchmessers d_{Bo} führt. Ein ähnlicher Effekt wird bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ durch die Erhöhung des Spitzenstroms \hat{i} über die Leerlaufspannung u_0 realisiert, was ebenfalls zur hoch signifikanten Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} und Steigerung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ führt. Da es durch die Erhöhung der betrachteten Faktoren zu keiner Zunahme der Energiedichte am Fußpunkt der Entladungen kommt, haben diese einen zu vernachlässigenden Einfluss auf den oberen und unteren Bohrungsdurchmesser sowie die daraus resultierende Funkenspaltweite s_L .

8.3 Einfluss von Sauerstoff

Für die Durchführung der Effektanalyse mit Sauerstoff als Dielektrikum werden für die Keramiken $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 unterschiedliche Parameterkombinationen zur Gewährleistung einer gleichbleibenden Prozessstabilität, die auf den jeweiligen Werkstoff angepasst sind, eingesetzt. Dabei erfolgt bei TiB_2 die Verwendung energetisch höherer Parameterkombination für die Ausgangseinstellung und längerer Pausdauern t_{off} gegenüber denen von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$. Die zur Erstellung des Versuchsplans eingesetzten Faktoren mit der unteren und oberen Faktorstufe für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ sind in Tabelle 8-9 sowie der daraus gebildete Versuchsplan in Tabelle 8-10 aufgelistet. Tabelle 8-11 und Tabelle 8-12 beinhalten die verwendeten Faktorstufen sowie den daraus abgeleiteten Versuchsplan für TiB_2 .

Tabelle 8-9: Einteilung der Faktorstufen zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit Sauerstoff als Prozessgas

Faktoren	Einheit	untere Faktorstufe	obere Faktorstufe
Entladekapazität C_e	nF	10	15
Einschaltdauer t_{on}	μs	4,2	8,7
Ausschaltdauer t_{off}	μs	3,2	7,5
Ladestrom i_L	A	1,2	1,8
Leerlaufspannung u_0	V	60	100

Tabelle 8-10: Versuchsplan zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit Sauerstoff als Prozessgas

Technologie	Entladekapazität C_e	Einschaltdauer t_{on}	Ausschaltdauer t_{off}	Ladestrom i_L	Leerlaufspannung u_0
1	10 nF	4,2 μs	3,2 μs	1,8 A	100 V
2	15 nF	4,2 μs	3,2 μs	1,2 A	60 V
3	10 nF	8,7 μs	3,2 μs	1,2 A	100 V
4	15 nF	8,7 μs	3,2 μs	1,8 A	60 V
5	10 nF	4,2 μs	7,5 μs	1,8 A	60 V
6	15 nF	4,2 μs	7,5 μs	1,2 A	100 V
7	10 nF	8,7 μs	7,5 μs	1,2 A	60 V
8	15 nF	8,7 μs	7,5 μs	1,8 A	100 V

Tabelle 8-11: Einteilung der Faktorstufen zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von TiB_2 mit Sauerstoff als Prozessgas

Faktoren	Einheit	untere Faktorstufe	obere Faktorstufe
Entladekapazität C_e	nF	33	48
Einschaltdauer t_{on}	μs	11,5	13,3
Ausschaltdauer t_{off}	μs	23,7	20,5
Ladestrom i_L	A	1,5	2
Leerlaufspannung u_0	V	110	120

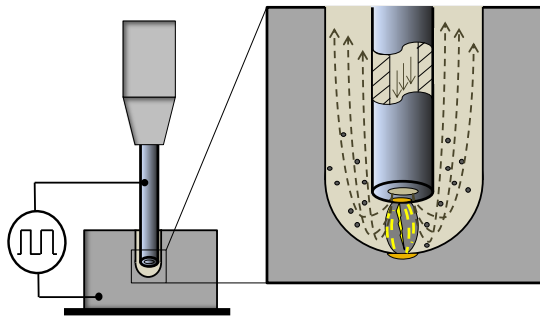
Tabelle 8-12: Versuchsplan zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von TiB₂ mit Sauerstoff als Prozessgas

Technologie	Entladekapazität C _e	Einschalt-dauer t _{on}	Ausschalt-dauer t _{off}	Ladestrom i _L	Leerlaufspannung u ₀
1	33 nF	11,5 μs	23,7 μs	2 A	120 V
2	48 nF	11,5 μs	23,7 μs	1,5 A	110 V
3	33 nF	13,3 μs	23,7 μs	1,5 A	120 V
4	48 nF	13,3 μs	23,7 μs	2 A	110 V
5	33 nF	11,5 μs	20,5 μs	2 A	110 V
6	48 nF	11,5 μs	20,5 μs	1,5 A	120V
7	33 nF	13,3 μs	20,5 μs	1,5 A	110 V
8	48 nF	13,3 μs	20,5 μs	2 A	120 V

Wie die Ergebnisse in [Bild 8-5](#) zeigen, führt der Einsatz von Sauerstoff als Dielektrikum unter den verwendeten Parameterkombinationen zu einer erheblichen Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero}. Dabei werden für die Fertigung von 1 mm tiefen Durchgangsbohrungen, für die unterschiedlichen Technologien und Werkstoffe, Zeiten erreicht in Bereichen für Si₃N₄-TiN von 9 s ≤ t_{ero} ≤ 15 s und TiB₂ von 20 s ≤ t_{ero} ≤ 57 s.

Trotz der geringen Eingriffszeiten hat der Einsatz von Sauerstoff einen hohen relativen Elektrodenverschleiß ϑ in Bereichen für Si₃N₄-TiN 21 % ≤ ϑ ≤ 56 % und TiB₂ 92 % ≤ ϑ ≤ 245 % zur Folge. Dabei sind keine Zusammenhänge zwischen der Erosionsdauer t_{ero} und dem relativen Elektrodenverschleiß ϑ zu erkennen. Dies gilt ebenfalls für die entstehenden Spaltweiten s_L bei der Bearbeitung von Si₃N₄-TiN und TiB₂. Beispielsweise werden unter Technologie 1 für die Bearbeitung von Si₃N₄-TiN die geringste Erosionsdauer mit t_{ero} = 9 s und Spaltweite s_L = 28 μm bei einem hohen relativen Elektrodenverschleiß von ϑ = 38 % erreicht. Auffallend ist, dass die minimal erreichte Spaltweite von Si₃N₄-TiN mit s_L = 22 μm geringer ist, als die von TiB₂ mit s_L = 33 μm (vgl. [Bild 8-5](#)).

Im Gegensatz zu Helium und Argon ist Sauerstoff ein Aktivgas, welches chemische Reaktionen mit der Umgebung, dem Elektroden- und Werkstückwerkstoff, eingeht. Die geringen erzielten Erosionsdauern t_{ero} sind auf die Dissoziationsenergie E_B von Sauerstoff zurückzuführen, welche bei der Rekombination eine Erhöhung des Wärmeeintrags in das Werkstück verursacht. Die hohe Oxidationswirkung von Sauerstoff hat dabei eine unterstützende Wirkung für den Werkstoffabtrag, ebenso die hohe Molmasse von M ≈ 32 g/mol und die Dichte mit ρ = 1,4276 kg/m³, welches zu einem hohen Staudruck an den Fußpunkten der Funkenentladungen führt. Die einzelnen Funkenentladungen weisen, aufgrund der genannten Eigenschaften von Sauerstoff, eine hohe Energiedichte auf. Des Weiteren verursacht die, im Gegensatz zu Helium und Argon, höhere Durchschlagfestigkeit E_D mit E_D = 2,9 kV/mm aufgrund einer stärkeren Aufladung der Kondensatoren, größere Entladeenergien bei Folgeentladungen.



Werkstückwerkstoff: ■ $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$
 □ TiB_2
 Werkzeugelektrode: Hartmetall
 $d_{el} = 300 \mu\text{m}$
 Durchgangsbohrung: $l_b = 1 \text{ mm}$
 Arbeitsmedium: Sauerstoff
 Technologie: Tabelle 8-10 und
 Tabelle 8-12
 Impulsart: Relaxationsentladung

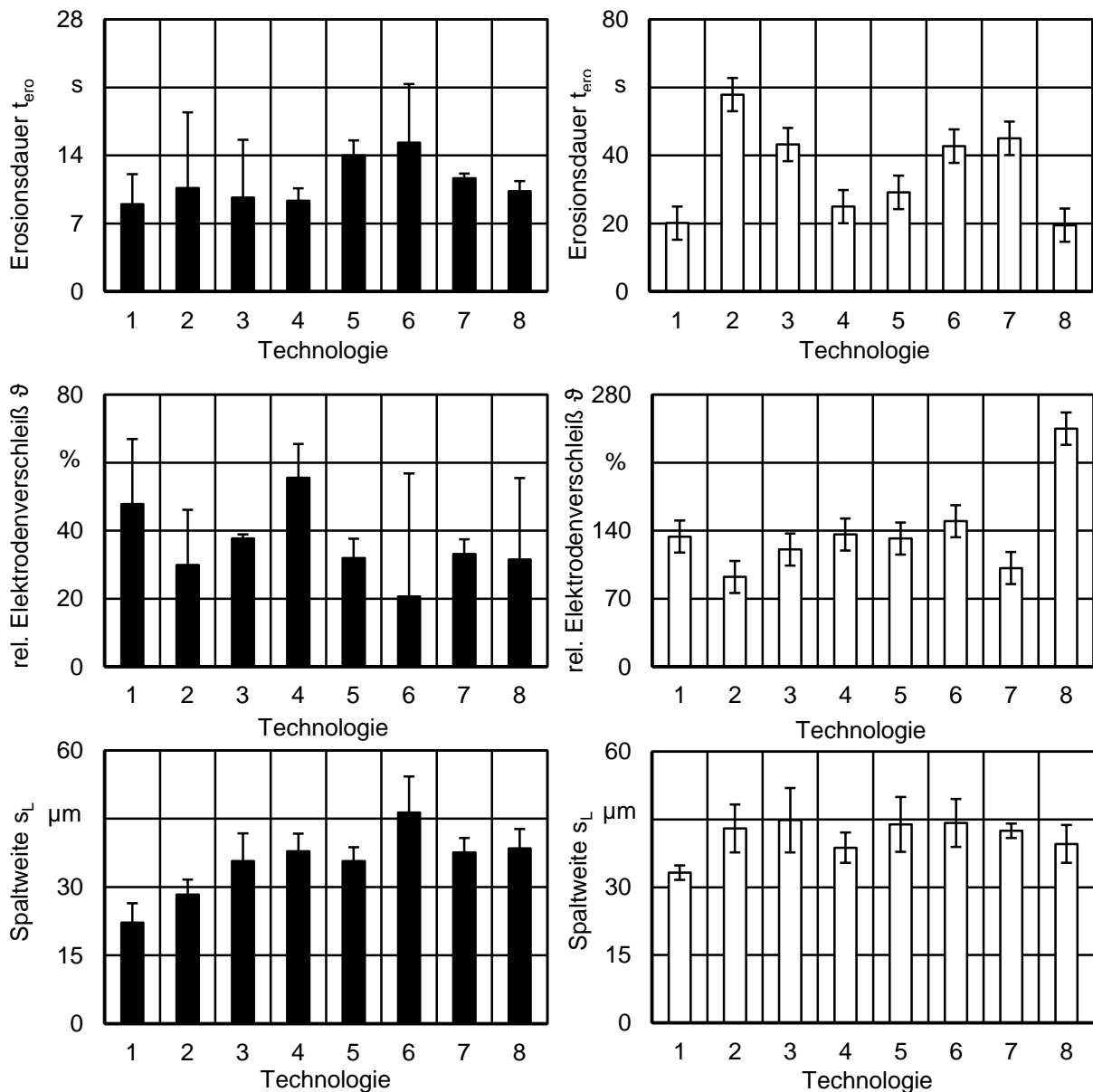
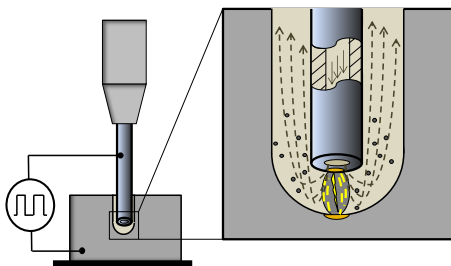


Bild 8-5: Einfluss unterschiedlicher Technologien (Tabelle 8-10 und Tabelle 8-12) auf die Zielgrößen Erosionsdauer t_{ero} , Spaltweite s_L und relativer Elektrodenverschleiß ϑ mit Sauerstoff als Dielektrikum

Neben der Erhöhung des Abtrags am Werkstück haben die Eigenschaften von Sauerstoff ebenfalls die Steigerung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ zur Folge. Dieser hingegen hat unter Verwendung von Sauerstoff gegenüber anderen Gasen einen untergeordneten Einfluss auf die Prozessstabilität. Trotz hoher Abtrag- und Verschleißraten entstehen bei

Sauerstoff keine Kurzschlüsse, welche zu erhöhten Regelbewegungen der Vorschubachse führen. Kurzschlüsse sind überwiegend zurückzuführen auf elektrisch leitfähige Partikel im Arbeitsspalt, an denen es zu frühzeitigen Funkenentladungen kommt. Sauerstoff als Dielektrikum bewirkt durch Oxidation die Herabsetzung der elektrischen Leitfähigkeit entstehender Abtragpartikel und somit eine Verbesserung der Prozessstabilität aufgrund ausbleibender Fehlentladungen.

Bild 8-6 zeigt mit Sauerstoff als Dielektrikum gefertigte Bohrungen in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 , einschließlich vergrößerter Aufnahmen des Bohrungsrandes. Die Bohrungen weisen eine hohe Formtreue sowie an den Stellen, die nicht von aufgeschmolzenem und wieder erstarrtem Werkstoff bedeckt sind, eine scharfe Eintrittskante auf. Durch den hohen Wärmeeintrag in das Werkstück erfolgt eine starke Aufschmelzung von Werkstück- und Elektrodenwerkstoff, was zu hohen Abtrag- und Verschleißraten führt.



Werkstückwerkstoff:	$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, TiB_2
Werkzeugelektrode:	Hartmetall
	$d_{el} = 300 \mu\text{m}$
Durchgangsbohrung:	$l_b = 1 \text{ mm}$
Arbeitsmedium:	Sauerstoff
Technologie $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$:	Technologie 2 der Tabelle 8-10
Technologie TiB_2 :	Technologie 4 der Tabelle 8-12
Impulsart:	Relaxationsentladung

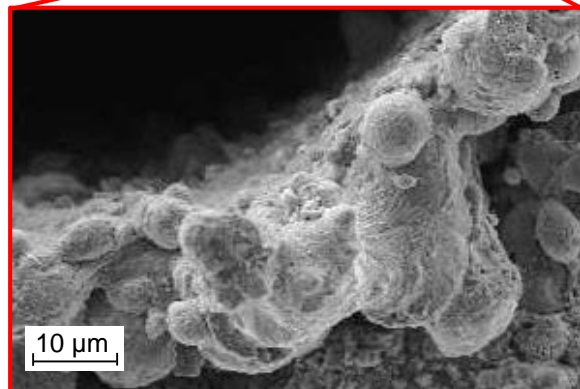
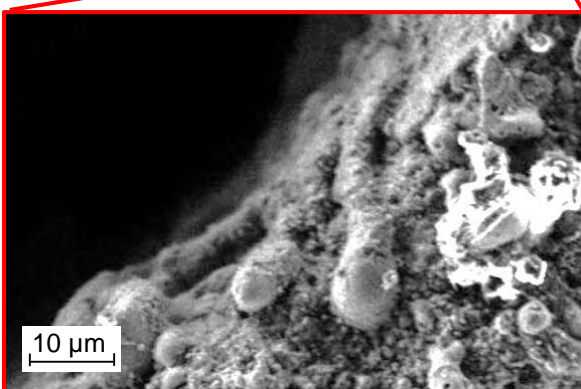
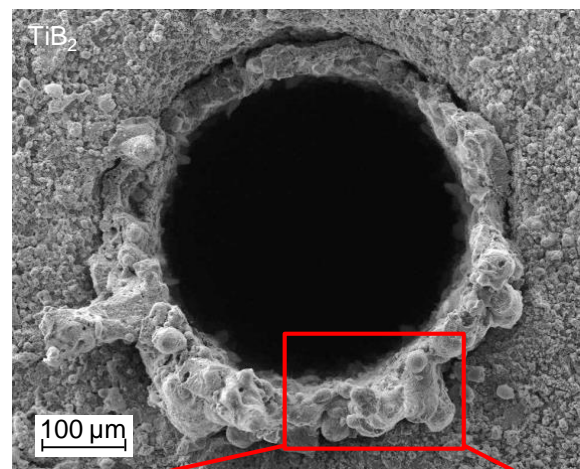
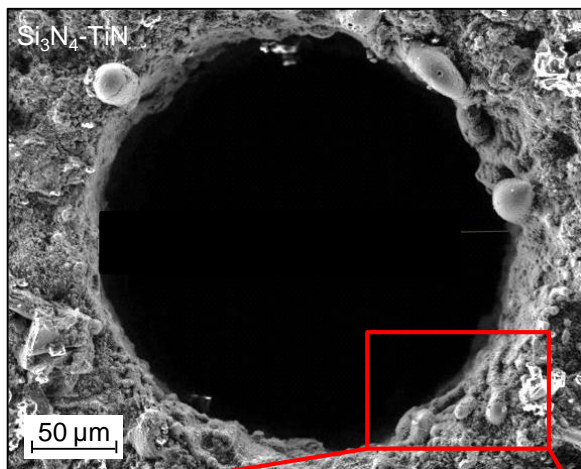


Bild 8-6: Mikrobohrungen einschließlich vergrößerter Aufnahme des Bohrungsrandes in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 mit Sauerstoff als Dielektrikum

Der für die Untersuchungen eingesetzte Spüldruck p_p des Sauerstoffs von $p_p = 80$ bar ist unter den verwendeten Parametereinstellungen, insbesondere bei den hoch energetischen von TiB_2 , nicht ausreichend um den großen Anteil des aufgeschmolzenen Werkstoffs aus der Bohrung zu transportieren. Des Weiteren hat Sauerstoff eine geringe Kühlwirkung, zurückzuführen auf die niedrige thermische Leitfähigkeit von $\lambda_w = 0,254$ mW/cmK und die spezifische Wärmekapazität von $c_p = 0,919$ kJ/kgK, welche zu einer schwachen Abkühlung und Erstarrung des aufgeschmolzenen Werkstoffs führen. Folgen daraus sind das Anhaften des abgetragenen Werkstoffs an den Mantelflächen und am Eintritt der Bohrung sowie Ablagerungen auf dem Werkstück. Die vergrößerten Aufnahmen des Bohrungsrandes zeigen den aufgeschmolzenen und wieder erstarrten Werkstoff, welcher runde, kugelförmige Konturen aufweist, als Beleg für den Schmelzvorgang.

In Tabelle 8-13 sind alle ermittelten Haupteffekte für Si_3N_4 -TiN und TiB_2 des trockenfunkenerosiven Feinbohrens mit Sauerstoff als Dielektrikum zusammengefasst. Tabelle 6-4 gibt eine Übersicht zur Einteilung der Haupteffekte in Tabelle 8-13.

Tabelle 8-13: Übersicht der Haupteffekte beim trockenfunkenerosiven Feinbohren mit Sauerstoff als Dielektrikum

Faktor	Erosionsdauer t_{ero}	relativer Elektrodenverschleiß ϑ	oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}
Si_3N_4-TiN				
Kapazität C_e 10 nF → 15 nF	— 3 %	— -8 %	— 3 %	— 2 %
Einschaltdauer t_{on} 4,2 μ s → 8,7 μ s	↑↑↑ -18 %	↓↓↓ 19 %	↓↓↓ 4 %	— -0 %
Ausschaltdauer t_{off} 154 μ s → 133,4 μ s	↓↓↓ 28 %	↑↑↑ -37 %	↓↓↓ 7 %	— 2 %
Ladestrom i_L 3,2 A → 7,5 A	↑↑ -10 %	↓↓↓ 31 %	↑↑ -5 %	— 2 %
Leerlaufspannung u_0 60 V → 100 V	— -3 %	— -9 %	— -3 %	↑ 5 %
TiB_2				
Kapazität C_e 33 nF → 48 nF	— 5 %	↓↓↓ 24 %	— 1 %	— -0 %
Einschaltdauer t_{on} 11,5 μ s → 13,3 μ s	— -12 %	↓ 17 %	— -0 %	— 1 %
Ausschaltdauer t_{off} 23,7 μ s → 20,5 μ s	— -7 %	↓↓↓ 26 %	— 3 %	— -1 %
Ladestrom i_L 1,5 A → 2 A	↑↑↑ -67 %	↓↓↓ 33 %	↑ -5 %	— 1 %
Leerlaufspannung u_0 110 V → 120 V	↑↑ -22 %	↓↓↓ 34 %	— -3 %	— 2 %

Die Effektanalyse zeigt, dass die Erhöhung der Entladekapazität C_e der Kondensatoren keinen signifikanten Einfluss auf die betrachteten Zielgrößen aufweist. Da der Erosionsprozess unter Sauerstoff zurückzuführen ist auf die Oxidationswirkung und die elektrische Isolierung

der Abtragpartikel eine hohe Stabilität aufweist, erfolgt eine gleichmäßige Auf- und Entladung der Kondensatoren. Wie bei allen verwendeten Gasen ist die Durchschlagfestigkeit E_D von Sauerstoff mit $E_D = 2,9 \text{ kV/mm}$ gegenüber der von deionisiertem Wasser mit $E_D = 65 \text{ kV/mm}$ geringer, wodurch eine frühzeitige Entladung der Kondensatoren erfolgt [HAY15]. Die für Sauerstoff maximal zu realisierende Entladekapazität C_e , bei der es zu einer frühzeitigen Entladung kommt, wird durch alle eingesetzten Kondensatoren abgedeckt. Demzufolge bewirkt die Erhöhung der Entladekapazität C_e keine signifikante Änderung bei beiden Werkstoffen.

Die Veränderung der Einschaltdauer t_{on} , welche die Länge der Entladephase bestimmt, von $t_{on} = 4,2 \mu\text{s}$ auf $t_{on} = 8,7 \mu\text{s}$ führt bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ zu einer erheblichen Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} . Dabei erfolgt die Steigerung der Entladefrequenz f_e und somit der Energieeintrag in das Werkstück durch die Verlängerung der Entladephase. Folgen daraus sind die Steigerung der Abtrag- und Verschleißrate sowie Formabweichungen des Bohrungseintritts, zurückzuführen auf die eingebrachte Wärme. Bei TiB_2 bewirkt die Steigerung der Einschaltdauer von $t_{on} = 11,5 \mu\text{s}$ auf $t_{on} = 13,3 \mu\text{s}$ keinen signifikanten Effekt auf die betrachteten Zielgrößen. Dies ist damit zu begründen, dass der betrachtete Bereich der Einschaltdauer t_{on} unter der verwendeten Parameterkombination ein Optimum aufweist, was durch die hohe Stabilität des Erosionsprozesses bestätigt wird.

Das Gleiche gilt bei TiB_2 für die Ausschaltdauer t_{off} , welche die Länge der Entladepause zwischen den Entladephasen bestimmt. Die Reduzierung der Ausschaltdauer von $t_{off} = 23,7 \mu\text{s}$ auf $t_{off} = 20,5 \mu\text{s}$ hat keinen Einfluss auf die betrachteten Zielgrößen und die vorliegenden Bedingungen. Hingegen bewirkt die Änderung der Ausschaltdauer t_{off} bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ von $t_{off} = 154 \mu\text{s}$ auf $t_{off} = 133,4 \mu\text{s}$ einen Effekt zur Steigerung der Erosionsdauer t_{ero} um ca. 28 % bei gleichzeitiger Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ um 37 %. Dieses unkonventionelle Prozessverhalten bei der Verringerung der Ausschaltdauer t_{off} ist auf Reaktionen des Sauerstoffs unter den vorliegenden Bedingungen zurückzuführen. Des Weiteren erfolgt durch die Reduzierung der Ausschaltdauer t_{off} ein negativer Effekt zur Beeinflussung des oberen Bohrungsdurchmessers, welcher aufgrund der geringen Standardabweichungen zu vernachlässigen ist.

Durch die Erhöhung des Ladestroms i_L erfolgt eine schnellere Aufladung der Kondensatoren, was eine Steigerung der Entladefrequenz f_e zur Folge hat. Tabelle 8-13 zeigt, dass die Tendenz der Effekte bei der Änderung des Ladestroms i_L für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 gleich ist. Somit bewirkt die Erhöhung des Ladestroms i_L einen positiven Effekt auf die Erosionsdauer t_{ero} , bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ von $i_L = 3,2 \text{ A}$ auf $i_L = 7,5 \text{ A}$ um 10 % und bei TiB_2 von $i_L = 1,5 \text{ A}$ auf $i_L = 2 \text{ A}$ um 67 %. Die Steigerung der Entladefrequenz f_e verursacht die Erhöhung des Energieumsatzes und die Zunahme der Abtrag- und Verschleißrate. Der negative Effekt durch die Erhöhung des Ladestroms i_L von 31 % bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und 33 % bei TiB_2 führt zu einer erheblichen Steigerung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ .

Die Änderung der Leerlaufspannung von $u_0 = 60 \text{ V}$ auf $u_0 = 100 \text{ V}$ hat keinen signifikanten Effekt bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ unter der verwendeten Parameterkombination und Sauerstoff als Dielektrikum zur Folge. Bei TiB_2 hingegen verursacht die Steigerung der Leerlaufspannung von $u_0 = 110 \text{ V}$ auf $u_0 = 120 \text{ V}$ die Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} um 22 % und die Erhöhung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ um 34 %. Dies ist auf die Steigerung des Spitzenstroms \hat{i} zurückzuführen, welcher über die Leerlaufspannung u_0 reguliert

wird und das Abtragvolumen sowie die Kratertiefe I_K der einzelnen Entladungen beeinflusst. Demzufolge bewirkt die Erhöhung der Leerlaufspannung u_0 bei der Verwendung von Relaxationsentladungen die Zunahme der Entladeenergie W_e (vgl. Kapitel 2.1.3).

8.4 Einfluss von Stickstoff

Die Effektanalyse mit Stickstoff als Dielektrikum findet unter Verwendung der Ausgangsparameter statt, welche auf die zu bearbeitenden Werkstoffe Si_3N_4 -TiN und TiB_2 angepasst sind. Demzufolge werden verschiedene Parametereinstellungen für die jeweiligen Keramiken eingesetzt, deren Unterschiede im Einstellbereich der Ausschaltdauer t_{off} und des Ladestroms i_L liegen. Dabei erfolgt für TiB_2 die Verwendung einer Parametereinstellung mit deutlich geringeren Entladefrequenzen f_e gegenüber denen von Si_3N_4 -TiN. Die zur Erstellung des Versuchsplans eingesetzten Faktoren mit der unteren und oberen Faktorstufe für Si_3N_4 -TiN sind in Tabelle 8-14 sowie der daraus gebildete Versuchsplan in Tabelle 8-15 aufgelistet. Tabelle 8-16 und Tabelle 8-17 beinhalten die verwendeten Faktorstufen sowie den abgeleiteten Versuchsplan für TiB_2 .

Tabelle 8-14: Einteilung der Faktorstufen zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessparametern beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von Si_3N_4 -TiN mit Stickstoff als Prozessgas

Faktoren	Einheit	untere Faktorstufe	obere Faktorstufe
Entladekapazität C_e	nF	10	33
Einschaltdauer t_{on}	μs	7,5	8,7
Ausschaltdauer t_{off}	μs	20,5	17,8
Ladestrom i_L	A	3	4
Leerlaufspannung u_0	V	160	180

Tabelle 8-15: Versuchsplan zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessparametern beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von Si_3N_4 -TiN mit Stickstoff als Prozessgas

Technologie	Entladekapazität C_e	Einschaltdauer t_{on}	Ausschaltdauer t_{off}	Ladestrom i_L	Leerlaufspannung u_0
1	10 nF	7,5 μs	20,5 μs	4 A	180 V
2	33 nF	7,5 μs	20,5 μs	3 A	160 V
3	10 nF	8,7 μs	20,5 μs	3 A	180 V
4	33 nF	8,7 μs	20,5 μs	4 A	160 V
5	10 nF	7,5 μs	17,8 μs	4 A	160 V
6	33 nF	7,5 μs	17,8 μs	3 A	180 V
7	10 nF	8,7 μs	17,8 μs	3 A	160 V
8	33 nF	8,7 μs	17,8 μs	4 A	180 V

Tabelle 8-16: Einteilung der Faktorstufen zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von TiB₂ mit Stickstoff als Prozessgas

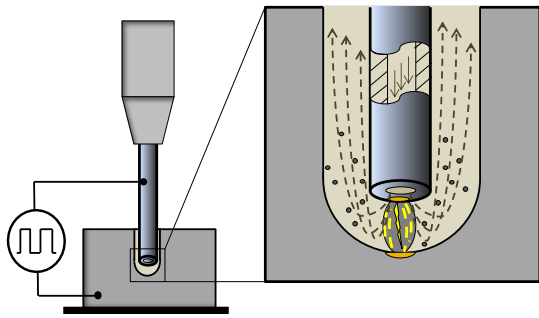
Faktoren	Einheit	untere Faktorstufe	obere Faktorstufe
Entladekapazität C _e	nF	10	33
Einschaltdauer t _{on}	µs	7,5	8,7
Ausschaltdauer t _{off}	µs	205,4	177,8
Ladestrom i _L	A	2	3
Leerlaufspannung u ₀	V	160	180

Tabelle 8-17: Versuchsplan zur Ermittlung der Haupteffekte von Prozessstellgrößen beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von TiB₂ mit Stickstoff als Prozessgas

Technologie	Entladekapazität C _e	Einschaltdauer t _{on}	Ausschaltdauer t _{off}	Ladestrom i _L	Leerlaufspannung u ₀
1	10 nF	7,5 µs	205,4 µs	3 A	180 V
2	33 nF	7,5 µs	205,4 µs	2 A	160 V
3	10 nF	8,7 µs	205,4 µs	2 A	180 V
4	33 nF	8,7 µs	205,4 µs	3 A	160 V
5	10 nF	7,5 µs	177,8 µs	3 A	160 V
6	33 nF	7,5 µs	177,8 µs	2 A	180 V
7	10 nF	8,7 µs	177,8 µs	2 A	160 V
8	33 nF	8,7 µs	177,8 µs	3 A	180 V

Das folgende Bild 8-7 zeigt die Ergebnisse der in Tabelle 8-15 und Tabelle 8-17 aufgeführten Parameterkombinationen für die Werkstoffe Si₃N₄-TiN und TiB₂ hinsichtlich der Herstellung 1 mm tiefer Durchgangsbohrungen und Stickstoff als Dielektrikum.

Die Ergebnisse für die Erosionsdauer t_{ero} weisen unter Stickstoff, gegenüber den betrachteten Gasen Argon, Helium und Sauerstoff, die höchsten Werte auf, sie reichen für Si₃N₄-TiN von 242 s ≤ t_{ero} ≤ 774 s und TiB₂ von 416 s ≤ t_{ero} ≤ 1039 s. Der Erosionsprozess erfolgt dabei mit einer sehr hohen Stabilität und geringer Streuung der Ergebnisse unter den Wiederholungen, woraus niedrige Standardabweichungen hervorgehen.



Werkstückwerkstoff: ■ $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$
 □ TiB_2
 Werkzeugelektrode: Hartmetall
 $d_{el} = 300 \mu\text{m}$
 Durchgangsbohrung: $l_b = 1 \text{ mm}$
 Arbeitsmedium: Stickstoff
 Technologie: Tabellen 8-15 und
 Tabelle 8-17
 Impulsart: Relaxationsentladung

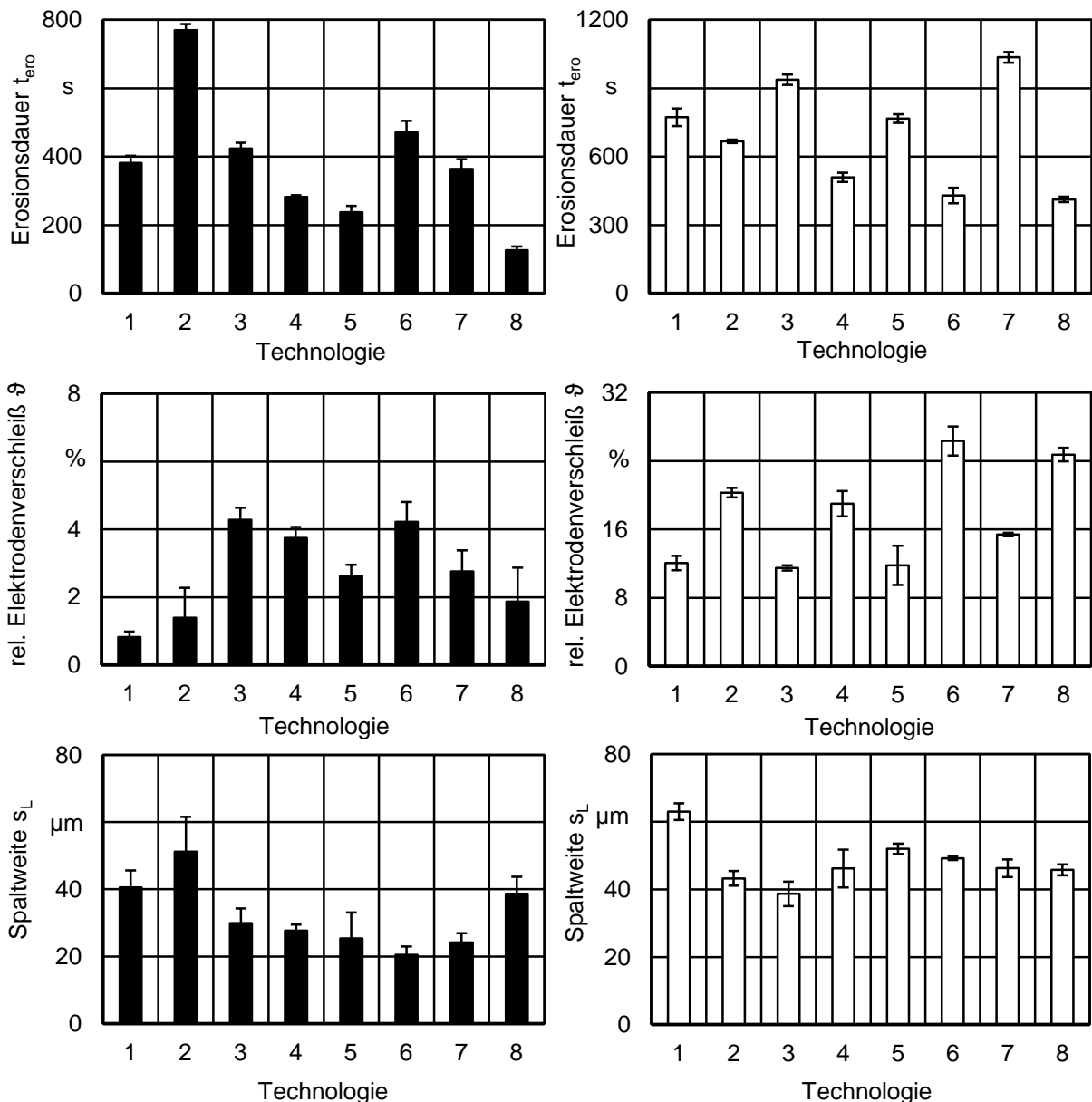


Bild 8-7: Einfluss unterschiedlicher Technologien (Tabelle 8-15 und Tabelle 8-17) auf die Zielgrößen Erosionsdauer t_{ero} , Spaltweite s_L und relativer Elektrodenverschleiß ϑ mit Sauerstoff als Dielektrikum

Trotz langer Erosionsdauern t_{ero} und Eingriffszeiten der Elektrode im Werkstück sind die Werte für den relativen Elektrodenverschleiß ϑ mit Stickstoff als Dielektrikum gegenüber Luft gering. Die verwendeten Technologien weisen Werte für den relativen Elektrodenver-

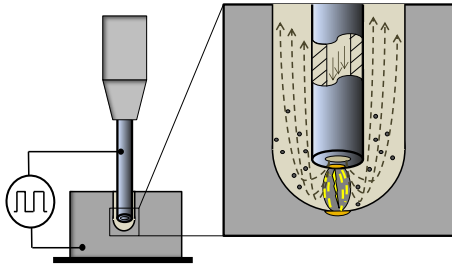
schleiß ϑ in Bereichen von $1,4 \% \leq \vartheta \leq 4,2 \%$ für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und von $21 \% \leq \vartheta \leq 43 \%$ für TiB_2 auf. Dabei bestehen Zusammenhänge zwischen der Erosionsdauer t_{ero} und dem relativen Elektrodenverschleiß ϑ . Bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ gehen lange Erosionsdauern t_{ero} mit einem hohen Verschleißwert einher, Ausnahmen bilden Technologie 1 und 2, wobei diese bei der Bearbeitung von TiB_2 gegenläufig sind. Hier zeigen die Technologien mit hohen Erosionsdauern t_{ero} einen geringen relativen Elektrodenverschleiß ϑ .

Die mit Stickstoff als Dielektrikum erreichten Spaltweiten s_L sind bei TiB_2 mit $39 \mu\text{m} \leq s_L \leq 52 \mu\text{m}$ größer als bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit $20 \mu\text{m} \leq s_L \leq 45 \mu\text{m}$. Dabei sind keine Zusammenhänge der Spaltweiten s_L mit der Erosionsdauer t_{ero} und dem relativen Elektrodenverschleiß ϑ der einzelnen Technologien ersichtlich.

Die Durchschlagfestigkeit E_D von Stickstoff mit $E_D = 3,3 \text{ kV/mm}$ ist identisch mit der von Luft, wodurch die Aufladung der Kondensatoren und somit die Entladeenergien W_e unter denselben Parameterkombinationen gleich sind, allerdings höher als die von Argon, Helium und Sauerstoff. Reiner Stickstoff bewirkt, aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität c_p , eine starke einschnürende Wirkung des Plasmakanals, was zu einer hohen Energiedichte an den Fußpunkten führt. Grundsätzliche Folgen daraus sind entstehende Entladekrater mit geringem Durchmesser und hoher Einbrandtiefe l_K . Da Stickstoff mit $M = 28,014 \text{ g/mol}$ eine geringe Molmasse und eine niedrige dynamische Viskosität η von $\eta = 17,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ aufweist, führt dies durch die starke Einschnürung des Plasmakanals zu Energieverlusten [MAT12, SAV11]. Das Bremsen der Ionen und Elektronen führt zur Ausbildung energiearmer Funkenentladungen, woraus die geringen Abtrag- und Verschleißraten entstehen.

Der Werkstoffabtrag basiert dabei bei beiden Keramiken auf dem Aufschmelzen und Verdampfen geringer Werkstoffanteile, woraus trotz langer Eingriffszeiten der Werkzeugelektrode Bohrungen mit hohen Formgenauigkeiten entstehen. Bild 8-8 zeigt mit Stickstoff als Dielektrikum gefertigte Bohrungen in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 , einschließlich der vergrößerten Aufnahmen des Bohrungsrandes. Diese weisen einen scharfkantigen Bohrungseintritt mit geringen Anteilen anhaftenden Werkstoffs auf, welcher durch die Funkenentladungen aufgeschmolzen und am Bohrungsrand und der Werkstückoberfläche wieder erstarrt ist.

Am Bohrungsrand von TiB_2 sind die einzelnen aufgeschmolzenen Keramikkörner zu erkennen, sie belegen, wie oben beschrieben, die Aufschmelz- und Verdampfungsvorgänge, dennoch ist das Herauslösen ganzer Keramikkörner durch den Spalling-Effekt nicht auszuschließen. Da Stickstoff mit $E_B = 9,78 \text{ eV}$ eine hohe Dissoziationsenergie E_B aufweist, entsteht durch die funkenerosive Bearbeitung keine Dekomposition der Werkstoffbestandteile, welche Einfluss auf den trockenfunkenerosiven Feinbohrprozess hat.



Werkstückwerkstoff: $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, TiB_2
 Werkzeugelektrode: Hartmetall
 $d_{\text{el}} = 300 \mu\text{m}$
 Durchgangsbohrung: $l_b = 1 \text{ mm}$
 Arbeitsmedium: Stickstoff
 Technologie $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$: Technologie 5 der Tabelle 8-15
 Technologie TiB_2 : Technologie 8 der Tabelle 8-17
 Impulsart: Relaxationsentladung

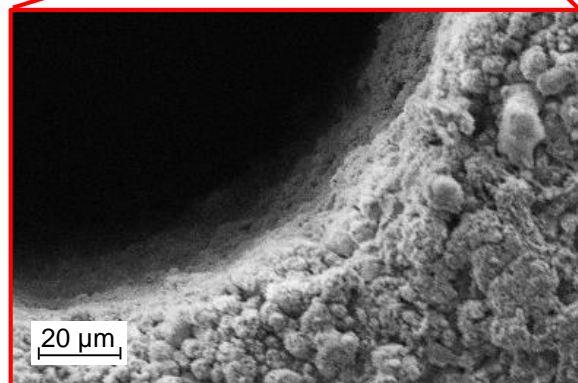
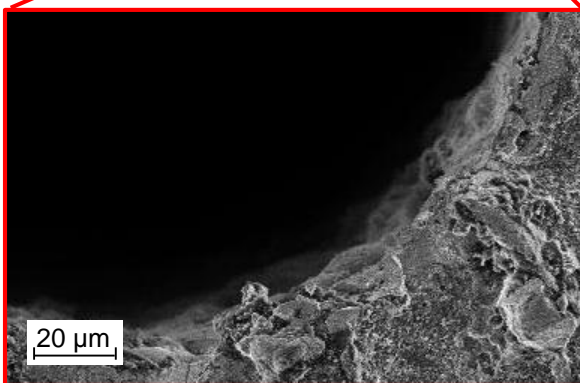
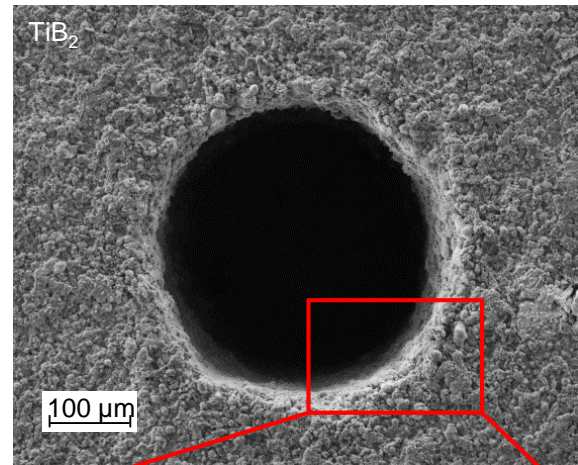
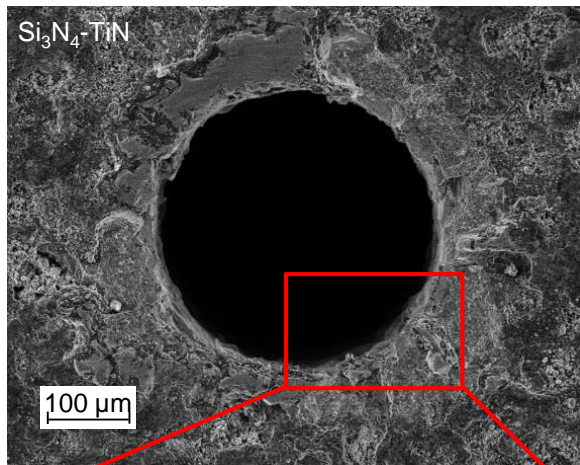


Bild 8-8: Mikrob Bohrungen einschließlich vergrößerter Aufnahme des Bohrungsrandes in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 mit Stickstoff als Dielektrikum

In Tabelle 8-18 sind alle ermittelten Haupteffekte für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 des trockenfunkerosiven Feinbohrens mit Stickstoff als Dielektrikum einschließlich der prozentualen Veränderung der Zielgrößen bei einer Steigerung der Faktoren von der unteren auf die obere Faktorstufe dargestellt. Tabelle 6-4 gibt eine Übersicht zur Einteilung der Haupteffekte in Tabelle 8-18.

Die Erhöhung der Entladekapazität C_e von $C_e = 10 \text{ nF}$ auf $C_e = 33 \text{ nF}$ führt bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ ausschließlich zu einer Erhöhung der Erosionsdauer t_{ero} um den hoch signifikanten Effekt von 16 %. Bei TiB_2 hingegen bewirkt diese Steigerung hoch signifikante Effekte zur Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} um 54 % bei gleichzeitiger Erhöhung des relativen Elektrodenschleisses ϑ um 56 %. Die durch den Anstieg resultierenden längeren Entladedauern t_e der einzelnen Funken führen zur Bildung von Kurzschlüssen, welche bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ durch die Spaltweitenregelung kompensiert werden und die Reduzierung der Abtragrate zur Folge haben. Die verwendeten Parameterkombinationen von TiB_2 dagegen weisen sehr ho-

he Pausen zwischen den Entladephasen auf, wodurch bessere Kühlbedingungen als bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ vorliegen und die Erhöhung der Entladedauer t_e zum Werkstoffabtrag beiträgt. Mit den längeren Entladedauern t_e gehen größere Entladeenergien W_e einher, welche den Werkstoffabtrag von TiB_2 aufgrund der höheren Schmelztemperatur T_s begünstigen, was allerdings zur Steigerung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ führt.

Tabelle 8-18: Übersicht der Haupteffekte beim trockenfunkenerosiven Feinbohren mit Stickstoff als Dielektrikum

Faktor	Erosionsdauer t_{ero}	relativer Elektrodenverschleiß ϑ	oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}
$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$				
Kapazität C_e 10 nF → 33 nF	↓↓↓↓ 16 %	— 7 %	— 5 %	— -18 %
Einschaltdauer t_{on} 7,5 μs → 8,7 μs	↑↑↑ -43 %	↓↓ 33 %	— -3 %	↓ -20 %
Ausschaltdauer t_{off} 20,5 μs → 17,8 μs	↑↑↑ -43 %	— 11 %	↑ -9 %	↓ -21 %
Ladestrom i_L 3 A → 4 A	↑↑↑ -65 %	↑↑ -33 %	— 0 %	— -17 %
Leerlaufspannung u_0 160 V → 180 V	↑↑↑ -17 %	— 6 %	— 2 %	↓ -21 %
TiB_2				
Kapazität C_e 10 nF → 33 nF	↑↑↑ -54 %	↓↓↓↓ 56 %	↑↑↑ -4 %	— 1 %
Einschaltdauer t_{on} 7,5 μs → 8,7 μs	↓↓↓↓ 9 %	— 0 %	↑↑↑ -6 %	— -2 %
Ausschaltdauer t_{off} 205,4 μs → 177,8 μs	↑↑↑ -9 %	↓↓↓↓ 22 %	↓ 2 %	— -1 %
Ladestrom i_L 2 A → 3 A	↑↑↑ -22 %	↑ -8 %	↓↓↓↓ 5 %	— 2 %
Leerlaufspannung u_0 160 V → 180 V	↑↑↑ -15 %	↓↓ 12 %	— 1 %	— 1 %

Die Änderung der Einschaltdauer t_{on} von der unteren Stufe mit $t_{\text{on}} = 7,5 \mu\text{s}$ auf die obere mit $t_{\text{on}} = 8,7 \mu\text{s}$ verursacht die Verlängerung der Entladephase, in der die Funkenentladungen gezündet werden. Dies führt bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, aufgrund der höheren Anzahl von Entladungen, zu einer hoch signifikanten Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} und durch den gestiegenen Energieumsatz zu einem höheren relativen Elektrodenverschleiß ϑ .

Die Herabsetzung der Ausschaltdauer von $t_{\text{off}} = 20,5 \mu\text{s}$ auf $t_{\text{off}} = 17,8 \mu\text{s}$ bewirkt bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ die Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} um 43 %. Dies ist auf die Verkürzung der Pause zwischen den Entladephasen zurückzuführen, wodurch eine Erhöhung der Entladefrequenz f_e realisiert wird. Des Weiteren deutet dieser Effekt darauf hin, dass die Pause zwischen den Entladephasen, unter den verwendeten Parametereinstellungen, nicht optimal ist und reduziert werden kann. Ebenso bewirkt die Herabsetzung der Ausschaltdauer t_{off} die Verkürzung

der Erosionsdauer t_{ero} bei TiB_2 , jedoch erfolgt gleichzeitig die Steigerung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ , was auf eine erhöhte Wärmebildung zurückzuführen ist.

Durch die Verstärkung des Ladestroms i_L , bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ von $i_L = 3 \text{ A}$ auf $i_L = 4 \text{ A}$ und bei TiB_2 von $i_L = 2 \text{ A}$ auf $i_L = 3 \text{ A}$, wird ein hoch signifikanter Effekt für die Verkürzung der Erosionsdauer t_{ero} realisiert. Dies ist zu begründen mit der Steigerung der Anzahl der Entladungen infolge einer schnelleren Kondensatoraufladung, was über den Zeitraum der Erosionsdauer t_{ero} zu einer Erhöhung der Entladefrequenz f_e führt. Somit wird, aufgrund der zunehmenden Anzahl der Entladungen und der damit verbundenen Energiesteigerung, mehr Werkstückwerkstoff abgetragen, was geringere Erosionsdauern t_{ero} zur Folge hat. Bei TiB_2 bewirkt der Anstieg des Ladestroms i_L zudem die Aufweitung des oberen Bohrungsdurchmessers um 5 %. Dies ist auf die Steigerung der Passiventladungen zwischen der Bohrungswand und der Mantelfläche der Werkzeugelektrode zurückzuführen, welche mit der Erhöhung der Anzahl von Entladungen einhergeht.

Die Änderung der Leerlaufspannung von $u_0 = 160 \text{ V}$ auf $u_0 = 180 \text{ V}$ bewirkt die Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} um 17 % bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und 15 % bei TiB_2 . Verursacht werden diese Effekte durch die Steigerung des Spitzenstroms \hat{i} der einzelnen Entladungen, was zur Erhöhung der Entladeenergie W_e führt. Hierdurch wird ein größerer Anteil des Werkstückwerkstoffs bei jeder einzelnen Funkenentladung aufgeschmolzen und herausgelöst, Folge ist der Anstieg des Abtragsvolumens.

9 Optimierte Prozesstechnologien

Die Prozessoptimierung erfolgt auf Basis der unter Kapitel 8 durchgeführten Analyse zum Prozessverhalten der Prozessstellgrößen unter dem Einsatz verschiedener Prozessgase. Dabei werden die in der Effektanalyse als hoch signifikant identifizierten Faktoren detailliert untersucht und aufeinander aufbauend einer abtrag- oder verschleißoptimalen Parameterkombination angenähert. Dies erfolgt unter der Selektion und Zuordnung des jeweiligen Gases als Dielektrikum auf die Keramik $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ sowie TiB_2 , was zu einer prozessfördernden Wirkung für die abtragorientierte Schrupp- oder verschleißorientierte Schlichtbearbeitung führt.

Als Zielgrößen und Qualitätsmerkmale der Parameterkombination werden folgende Merkmale aufgezeichnet oder messtechnisch ausgewertet:

- Erosionsdauer t_{ero} und relativer Elektrodenverschleiß ϑ zur Bewertung des Abtrag- und Verschleißverhaltens zur Schlussfolgerung auf die Prozessgüte,
- Optische Erfassung des Bohrungsein- und -austritts sowie messtechnische Erfassung des oberen und unteren Bohrungsdurchmessers zur Ermittlung von Formabweichungen,
- Ermittlung des arithmetischen Mittenrauwerths der Profilordinate R_a und der Werkstoffzusammensetzung an den Bohrungswänden, zur Identifikation von chemischen Reaktionen des Werkstück- und Elektrodenwerkstoffs mit dem Prozessgas und zur Bewertung der Bohrungsqualität.

Für die optische und messtechnische Erfassung der Bohrungsgeometrie und deren Durchmessers am Bohrungsein- und austritt kommt ein Raster-Elektronen-Mikroskop des Typs JCM-5000 der Firma JEOL GMBH, Deutschland, zum Einsatz. Zur Ermittlung der arithmetischen Mittenrauwerthe der Profilordinate R_a und der Werkstoffzusammensetzung an den Bohrungswänden werden diese mit Hilfe einer Drahterosionsmaschine des Typs AC Vertex 2 der Firma GF AGIECHARMILLES, Losone, Schweiz axial aufgetrennt. Es folgt die Ermittlung der Werkstoffzusammensetzung an den Mantelflächen der Bohrungen über eine energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX) mittels DXP-X10P Detektors der Firma XIA LLC, Hayward, USA sowie die Messung des arithmetischen Mittenrauwerths der Profilordinate R_a über ein optisches 3D-Messsystem der Firma ALICONA IMAGING GMBH, Graz, Österreich.

Für das trockenfunkenerosive Feinbohren der Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 erfolgt die Bereitstellung optimierter Parameterkombinationen, welche zur prozesssicheren Herstellung von Mikrobohrungen unter Verwendung von 300 μm starken Hartmetallelektroden Verwendung finden.

9.1 Prozesstechnologie für Argon

Die Analyse des Prozessverhaltens und die Effektanalyse der unter Kapitel 8.1 durchgeführten Untersuchungen mit Argon als Dielektrikum zeigen, dass bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ geringe Spaltweiten s_L und Verschleißwerte $\vartheta < 1\%$ erreicht werden. Der trockenfunkenerosive Bohrprozess weist dabei eine hohe Stabilität und die entstehenden Bohrungen gute Form- und Wiederholgenauigkeiten auf. Die mit Argon und TiB_2 erzielten Ergebnisse zeigen dagegen weniger gute Werte. Demzufolge wird Argon als Prozessgas zur Ableitung einer Schlichttechnologie für die Bearbeitung des Werkstoffs $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ eingesetzt und TiB_2 nicht weiter verfolgt.

Die unter Kapitel 8.1 durchgeführte Effektanalyse hat ergeben, dass die Erhöhung der Einschaltdauer t_{on} und Ausschaltdauer t_{off} zu einer Steigerung der Abtragrates und zur Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ führen kann. Aufbauend auf der Technologie 8 der Tabelle 8-2 erfolgt die Variation der Einschaltdauer t_{on} im Bereich $10 \mu s \leq t_{on} \leq 15,4 \mu s$, gemäß Bild 9-1. Die Einschaltdauer $t_{on} = 13,3 \mu s$ wird für den folgenden Iterationsschritt beibehalten, da sie zur geringsten Erosionsdauer t_{ero} bei einem minimal zu realisierenden relativen Elektrodenverschleiß ϑ führt.

Die Variation der Ausschaltdauer t_{off} im Bereich $115,5 \mu s \leq t_{off} \leq 177,8 \mu s$ ergibt bei einem Wert von $t_{off} = 154 \mu s$ ein Minimum des relativen Elektrodenverschleißes ϑ hinsichtlich einer geringfügigen Änderung der Erosionsdauer t_{ero} . Das Ergebnis der daraus folgenden Fertigungstechnologie für die verschleißarme trockenfunkenerosive Schlichtbohrbearbeitung von Si_3N_4 -TiN ist in Tabelle 9-1 aufgeführt.

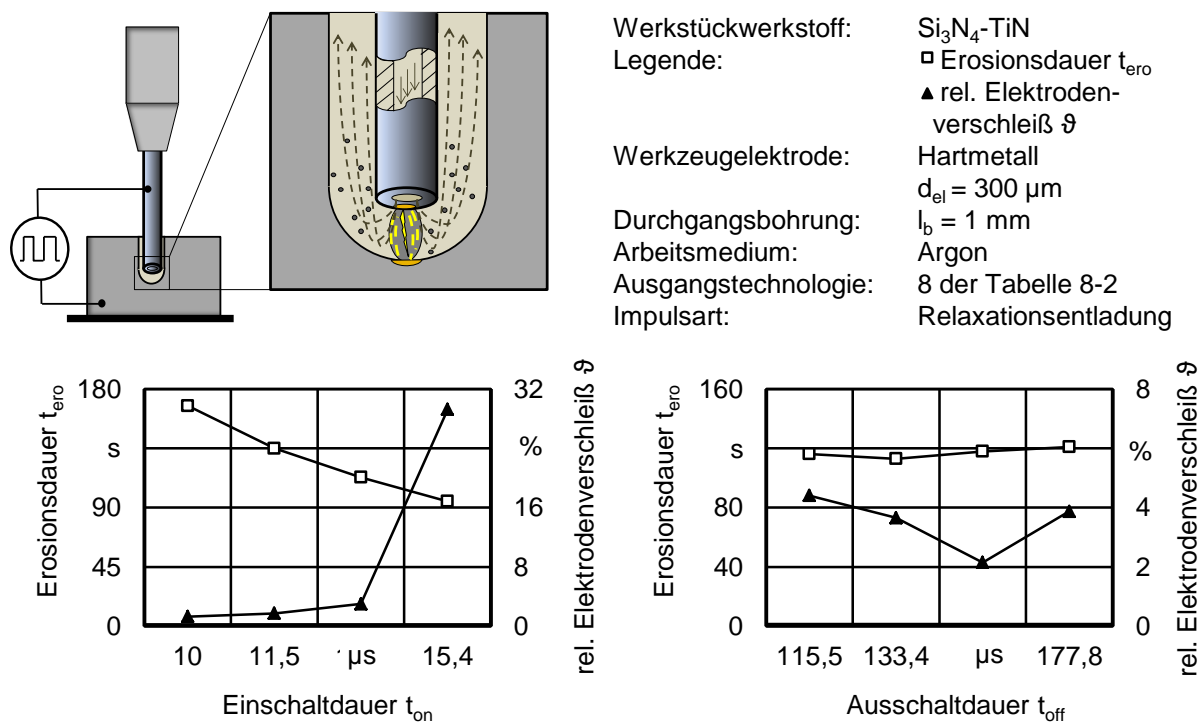


Bild 9-1: Abtrag- und Verschleißoptimierung durch die Feinabstimmung der Faktoren Einschaltdauer t_{on} und Ausschaltdauer t_{off} zum trockenfunkenerosiven Feinbohren von Si_3N_4 -TiN und Argon als Dielektrikum

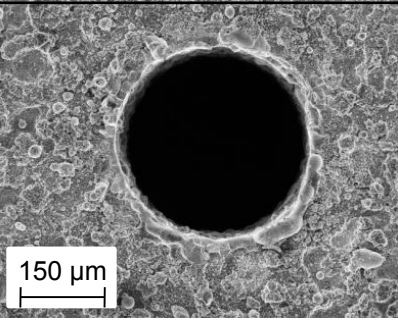
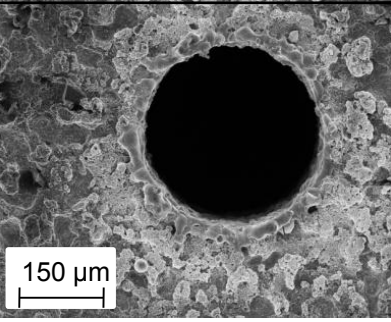
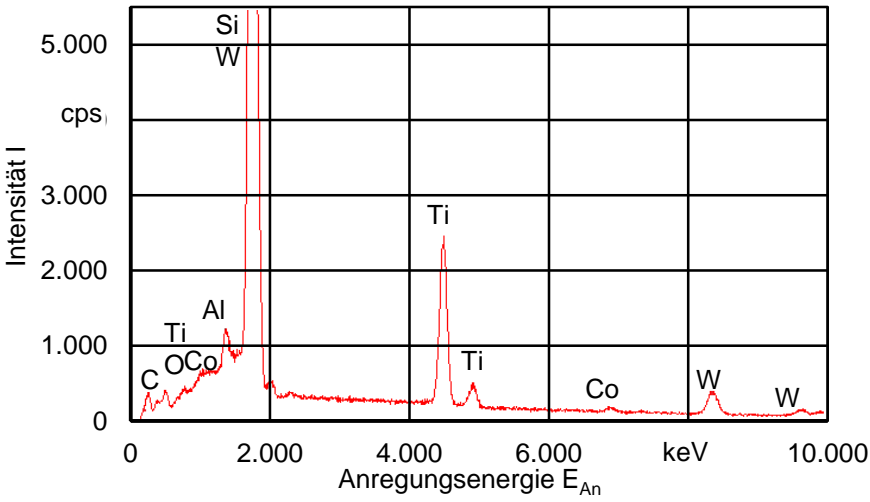
Die Erosionsdauer t_{ero} und der relative Elektrodenverschleiß ϑ weisen für die Fertigung 1 mm tiefer Durchgangsbohrungen, hergestellt mit einer 300 μm starken Hartmetallelektrode, Werte von $t_{ero} = 160 s$ sowie $\vartheta = 0,9 \%$ auf. Der obere und untere Bohrungsdurchmesser haben eine Abweichung von $\Delta d_B = 25 \mu m$, welche auf unterschiedlich lange Eingriffszeiten der Werkzeugelektrode vom Bohrungsein- und -austritt zurückzuführen ist. Passiventladungen zwischen der Mantelfläche, der Bohrungswand und der Werkzeugelektrode führen dabei zu einer geringfügig konischen Form der Bohrung.

Die entstehenden Bohrungen verfügen aufgrund des geringen relativen Elektrodenverschleißes ϑ und der geringen Entladeenergien W_e über eine gleichmäßige runde Kontur sowie eine hohe Formgenauigkeit. Des Weiteren haben die Bohrungen einen scharfkantigen Ein- und

Austritt, welcher auf eine hohe Prozessgüte hindeutet, da ein geringer Anteil von Passiventladungen vorliegt.

An den Bohrungskanten sowie auf dem Werkstück sind wenige Rückstände von aufgeschmolzenem und wieder erstarrtem Werkstoff zu erkennen. Wie die EDX-Analyse zeigt, besteht dieser aus dem Elektrodenwerkstoff, zurückzuführen auf den Wolfram- und Kobaltanteil, sowie aus der $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ Keramik, von welcher das Silizium, Titan und Aluminiumoxid stammen. Der Stickstoff ist aufgrund einer Dekomposition der Werkstoffbestandteile, bei der Gase freigesetzt werden, nicht auf der Mantelfläche der Bohrung nachzuweisen. Wie im Stand der Technik, unter Kapitel 2.4.2, beschrieben, führt der Werkstoffabtrag durch Dekomposition zu einer Erhöhung der Prozessstabilität und zu porösen Oberflächen, wodurch der arithmetische Mittenrauwert der Profildordinate $R_a \approx 2,5 \mu\text{m}$ trotz geringer Entladeenergien begründet ist.

Tabelle 9-1: Bearbeitungsergebnis für das trockenfunkenerosive Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und Argon als Dielektrikum mit verschleißoptimierter Parameterkombination

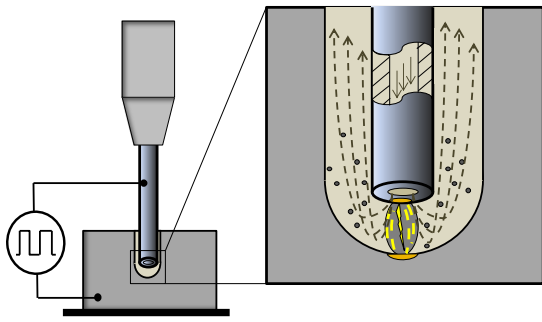
Messwerte $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, Ar		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsausritt
Erosionsdauer t_{ero}	160 s		
rel. Elektrodenverschleiß ϑ	0,9 %		
oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	347 μm		
unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}	322 μm		
arithmetischer Mittenrauwert R_a	2,5 μm		
EDX-Analyse der Bohrungswand			
			

9.2 Prozesstechnologie für Helium

Die unter Kapitel 8.2 durchgeführten Untersuchungen zum Prozessverhalten von Helium als Dielektrikum zum trockenfunkenerosiven Feinbohren ergeben, dass bei der Bearbeitung von TiB_2 bessere Ergebnisse als bei Si_3N_4 -TiN erzielt werden. Helium als reaktionsträges Prozessgas führt bei der Bearbeitung von TiB_2 zu einem geringen relativen Elektrodenverschleiß ϑ und zu einer hohen Prozessstabilität, bedingt durch den Werkstoffabtrag über den Melting-Effekt. Nachteilig sind die bei der Keramik TiB_2 entstehenden großen Spaltweiten s_L , welche für die Schlichtbearbeitung möglichst gering zu erzielen sind.

Die Effektanalyse der Prozessstellgrößen zeigt unter Helium als Dielektrikum, dass die Steigerung der Entladekapazität C_e , der Einschaltdauer t_{on} und des Ladestroms i_L einen hoch signifikanten Einfluss auf die Erosionsdauer t_{ero} haben. Alle weiteren betrachteten Zielgrößen, wie relativer Elektrodenverschleiß ϑ , oberer und unterer Bohrungsdurchmesser, werden dabei nicht beeinflusst.

Ausgehend von der Technologie 4 der Tabelle 8-7 erfolgt eine Detailuntersuchung der Prozessstellgrößen Entladekapazität C_e , Einschaltdauer t_{on} und Ladestrom i_L in den Bereichen $10 \text{ nF} \leq C_e \leq 33 \text{ nF}$, $13,3 \text{ } \mu\text{s} \leq t_{on} \leq 20,5 \text{ } \mu\text{s}$ sowie $3 \text{ A} \leq i_L \leq 5 \text{ A}$ zur Ableitung einer optimalen Parameterkombination. Die Ergebnisse zum Prozessverhalten unter Variation der Prozessparameter sind in Bild 9-2 aufgeführt.



Werkstückwerkstoff: TiB_2
 Legende: \square Erosionsdauer t_{ero}
 \blacktriangle rel. Elektrodenverschleiß ϑ
 Werkzeugelektrode: Hartmetall
 $d_{\text{el}} = 300 \mu\text{m}$
 Durchgangsbohrung: $l_b = 1 \text{ mm}$
 Arbeitsmedium: Helium
 Ausgangstechnologie: 4 der Tabelle 8-7
 Impulsart: Relaxationsentladung

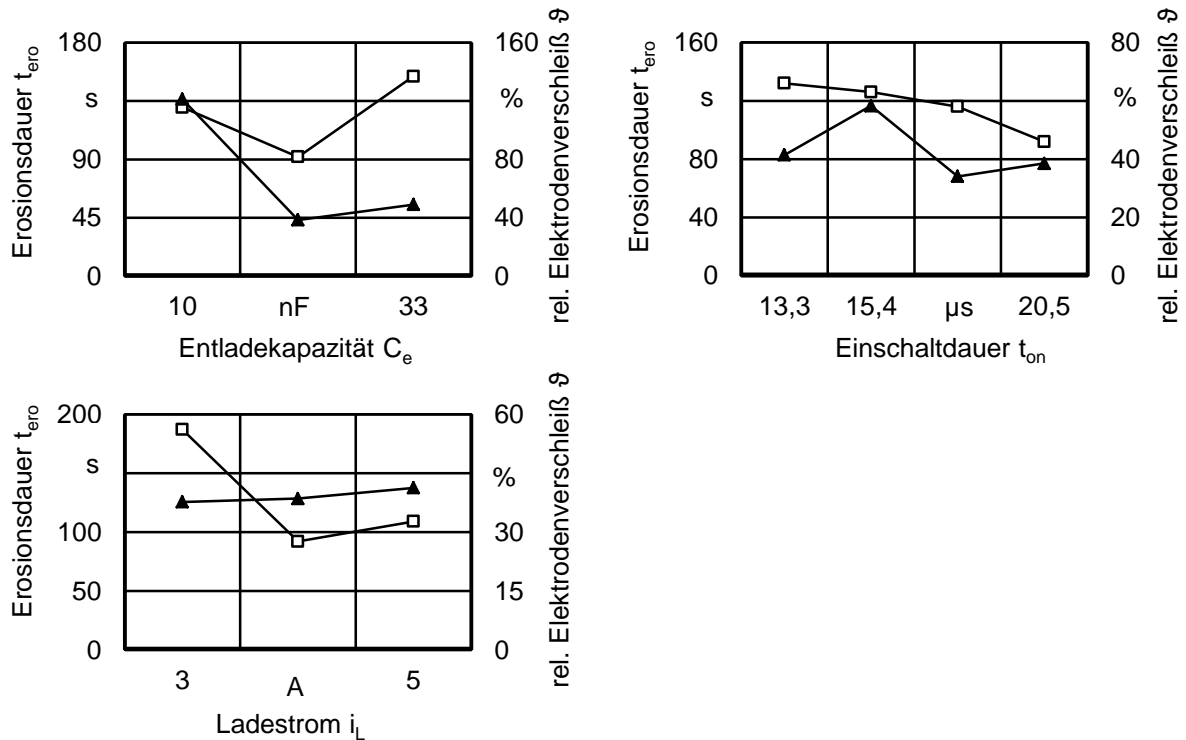
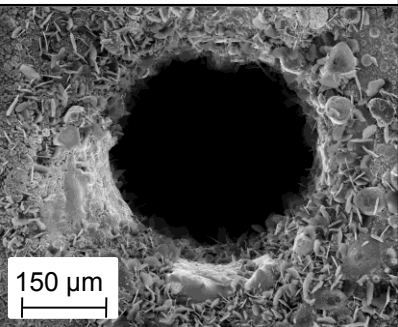
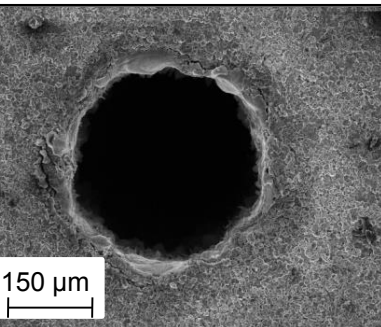
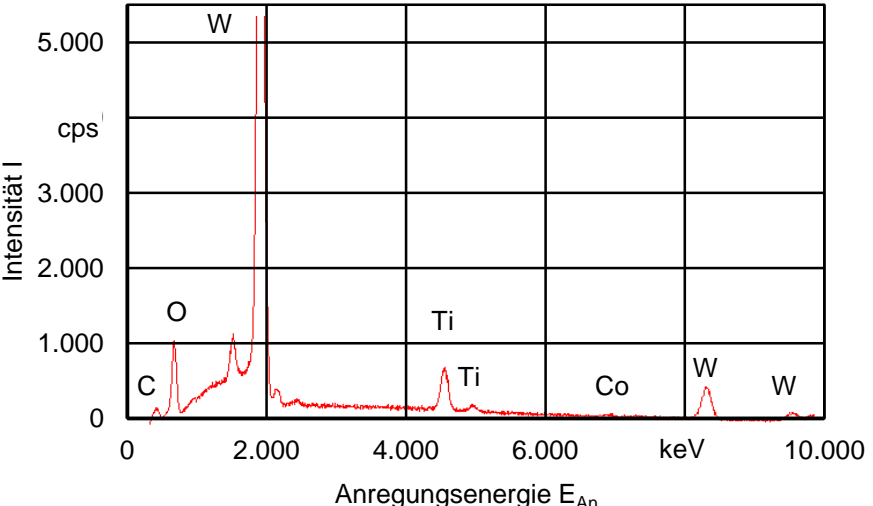


Bild 9-2: Abtrag- und Verschleißoptimierung durch die Feinabstimmung der Faktoren Entladekapazität C_e , Einschaltdauer t_{on} , Ladestrom i_L und Leerlaufspannung u_0 zum trockenfunkenerosiven Feinbohren von TiB_2 und Helium als Dielektrikum

Für die Entladekapazität C_e entsteht bei der Ausgangseinstellung von $C_e = 15 \text{ nF}$ ein Minimum für die Erosionsdauer t_{ero} und den relativen Elektrodenverschleiß ϑ , demzufolge wird $C_e = 15 \text{ nF}$ für die weitere Parameteroptimierung beibehalten. Die steigende Einschaltdauer t_{on} im Bereich $13,3 \mu\text{s} \leq t_{\text{on}} \leq 20,5 \mu\text{s}$ führt zu einer progressiven Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} . Der relative Elektrodenverschleiß ϑ weist dabei ein sprungförmiges Verhalten mit einem Tiefpunkt bei $t_{\text{on}} = 17,8 \mu\text{s}$ auf. Das gemeinsame Optimum, welches für die weitere Verbesserung beibehalten wird, ist zu erkennen bei einer Einschaltdauer t_{on} von $t_{\text{on}} = 20,5 \mu\text{s}$. Mit steigendem Ladestrom i_L zwischen $i_L = 3 \text{ A}$ und $i_L = 5 \text{ A}$ erfolgt eine leichte konstante Erhöhung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ . Ein gemeinsames Optimum für die Erosionsdauer t_{ero} und den relativen Elektrodenverschleiß ϑ wird bei einem Ladestrom $i_L = 4 \text{ A}$ gebildet. Das Bearbeitungsergebnis der sich durch die Prozessoptimierung ergebenden Parameterkombination, unter Betrachtung der Werkstoffzusammensetzung an der Mantelfläche der Bohrung, sowie die Messergebnisse des arithmetischen Mittenrauwerths der Profildinate R_a sind in der Tabelle 9-2 dargestellt. Die mit Helium als Dielektrikum erzielte Erosionsdauer t_{ero} für die Herstellung einer 1 mm tiefen Mikrobohrung in TiB_2 , mittels

einer 300 µm starken Hartmetallektrode, beträgt $t_{\text{ero}} = 153$ s bei einem relativen Elektrodenverschleiß von $\vartheta = 34$ %. Das dabei entstehende Bohrloch weist unter einer hohen Prozessstabilität einen Durchmesser am Eintritt von $d_{\text{Bo}} = 412$ µm und am Austritt von $d_{\text{Bu}} = 351$ µm auf, womit eine Differenz von $\Delta d_{\text{B}} = 61$ µm vorliegt. Die Bohrung hat eine runde Form mit ungleichmäßiger Kontur und Radien an den Bohrungskanten, was auf eine Ansammlung von wieder erstarrtem Werkzeugelektroden- und Werkstückwerkstoff zurückzuführen ist. Insbesondere die Kante am Bohrungseintritt ist aufgrund der langen Eingriffszeit der Werkzeugelektrode im Werkstück und den dabei wirkenden Passiventladungen verrundet.

Tabelle 9-2: Bearbeitungsergebnis für das trockenfunkenerosive Feinbohren von TiB_2 und Helium als Dielektrikum mit verschleißoptimierter Parameterkombination

Messwerte TiB_2 , He		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsausritt
Erosionsdauer t_{ero}	153 s		
rel. Elektrodenverschleiß ϑ	34 %		
oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	412 µm		
unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}	351 µm		
arithmetischer Mittenrauwert Ra	2,2 µm		
EDX-Analyse der Bohrungswand			
			

Auf der Werkstückoberfläche, gleichmäßig um den Bohrungseintritt verteilt sind schuppenähnlich freigelegte TiB_2 Keramikkörner, welche eine typische flache und rechteckige Form ohne ersichtlichen thermischen Einfluss aufweisen. Teilweise sind diese mit aufgeschmolzenem und wieder erstarrtem Werkstück- und Elektrodenwerkstoff bedeckt, was auf eine Kombination des Melting- und Spalling-Effekts hindeutet. Die EDX-Analyse an der Mantelfläche der Bohrung zeigt einen hohen Wolframanteil, zurückzuführen auf den Elektrodenwerkstoff.

Demzufolge ist die Bohrungsfläche mit Werkzeugelektroden- und Werkstückwerkstoff bedeckt. Dies bestätigt die Ergebnisse der Untersuchung der Abtragpartikel des Kapitels 7.3, welche besagen, dass die Abtragpartikel aus einem Gemisch aufgeschmolzenen und wieder erstarrten Elektrodenwerkstoffs sowie gleichmäßig verteilter Keramikpartikel bestehen. Die Bohrungsoberfläche weist eine poröse Erscheinung auf, vergleichbar den unter Tabelle 7-3 untersuchten Abtragpartikeln, mit einem arithmetischen Mittenrauwert der Profildordinate $R_a \approx 2,2 \mu\text{m}$.

9.3 Prozesstechnologie für Sauerstoff

Der Einsatz von Sauerstoff als prozessförderndes Gas beim trockenfunkenerosiven Feinbohren führt, sowohl bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ als auch bei TiB_2 , zu hohen Abtragraten. Daher erfolgt die Ableitung von Fertigungstechnologien, welche hinsichtlich der Schruppbearbeitung eingesetzt werden, für beide Keramiken. Das folgende Bild 9-3 zeigt die Detailuntersuchung der in Tabelle 8-13 identifizierten Prozessstellgrößen Ladestrom i_L , Einschaltdauer t_{on} und Ausschaltdauer t_{off} , welche hochsignifikante Effekte auf die betrachteten Zielgrößen aufweisen.

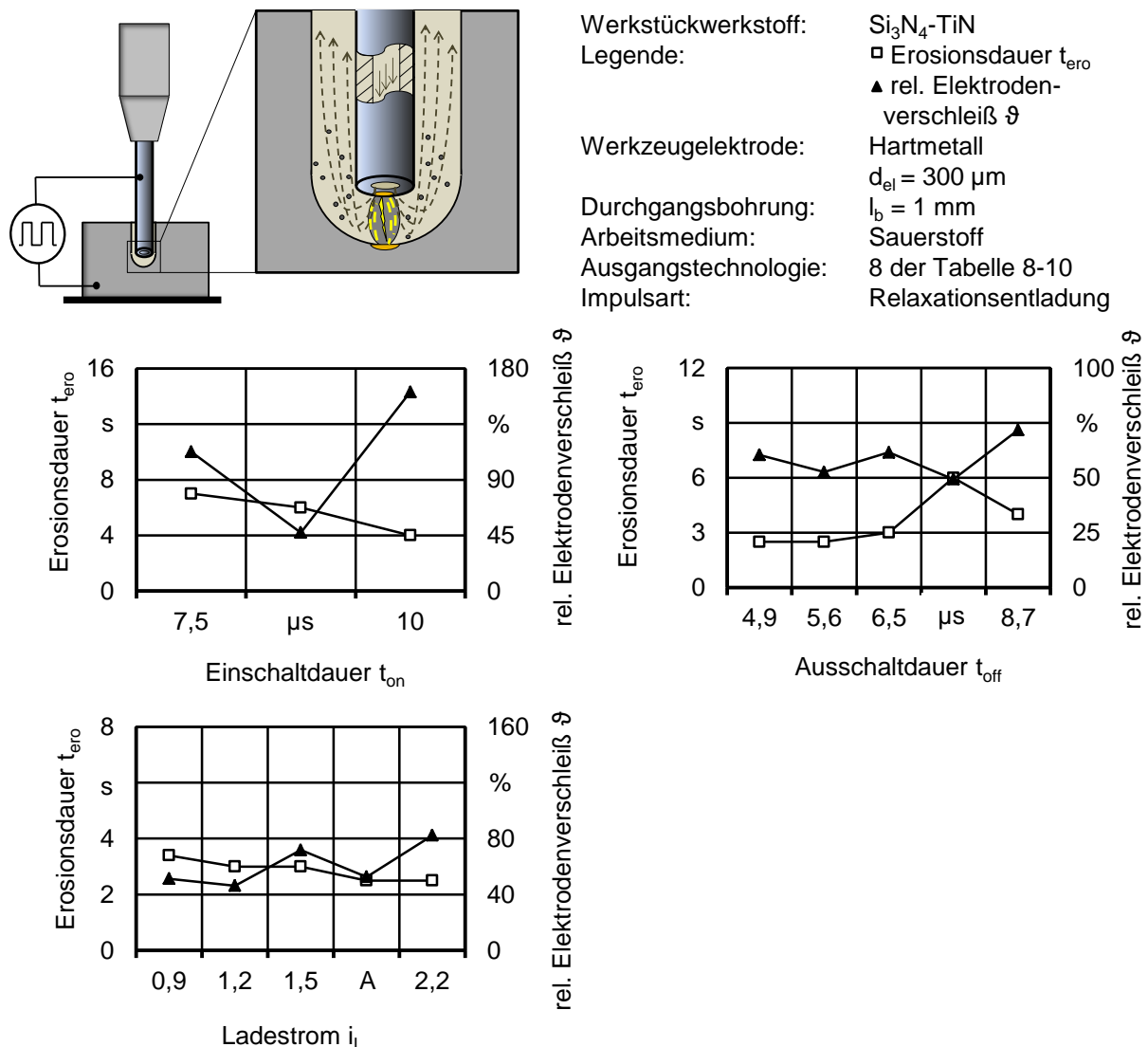


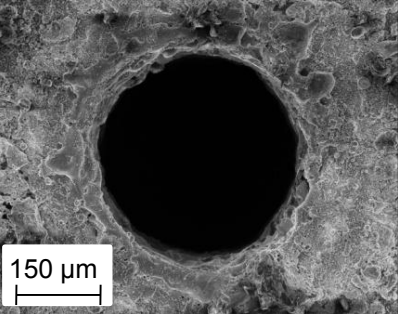
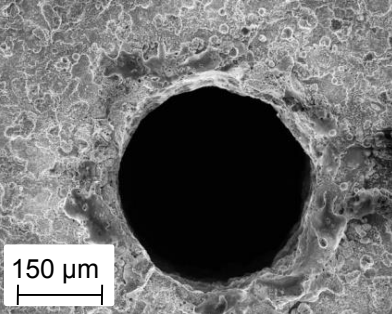
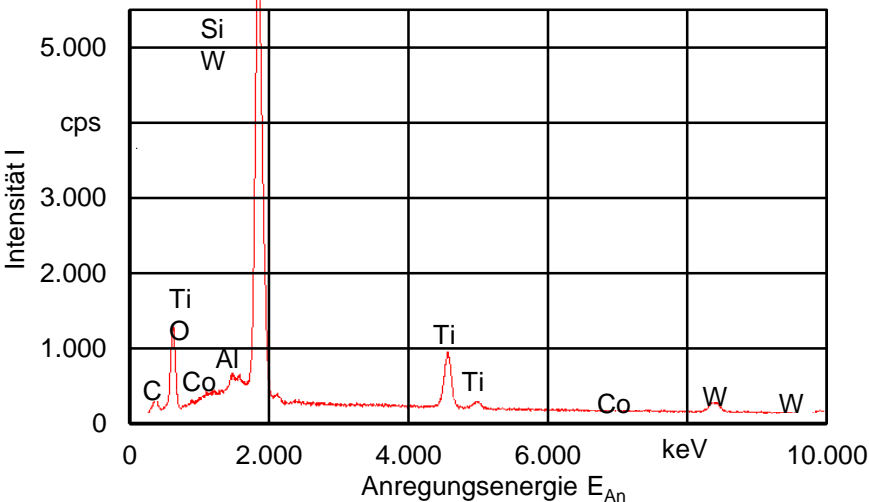
Bild 9-3: Abtrag- und Verschleißoptimierung durch die Feinabstimmung der Faktoren Ladestrom i_L , Einschaltdauer t_{on} und Ausschaltdauer t_{off} zum trockenfunkenerosiven Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und Sauerstoff als Dielektrikum

Ausgehend von der Technologie 8 der Tabelle 8-10 erfolgt die Variation der Einschaltdauer zwischen $t_{on} = 7,5 \mu\text{s}$ und $t_{on} = 10 \mu\text{s}$. Dabei liegt ein geringer Wert des relativen Elektrodenverschleißes mit $\vartheta = 47 \%$ mit einer Erosionsdauer $t_{ero} = 6 \text{ s}$, bei einer Einschaltdauer von $t_{on} = 8,7 \mu\text{s}$. Diese Parameter bilden die Ausgangseinstellung für die Anpassung der Ausschaltdauer t_{off} in einem Bereich $4,9 \mu\text{s} \leq t_{off} \leq 8,7 \mu\text{s}$.

Mit steigender Ausschaltdauer t_{off} erfolgt die Erhöhung der Erosionsdauer t_{ero} , was auf eine Verlängerung der Pause zwischen den Entladephasen und somit auf eine Reduzierung der Anzahl der Entladungen zurückzuführen ist. Der relative Elektrodenverschleiß ϑ zeigt dabei ein sprunghaft wechselndes Verhalten, aus welchem keine klare Tendenz zu erkennen ist. Ein gemeinsamer Einstellwert der Ausschaltdauer t_{off} , bei der die Erosionsdauer t_{ero} und der Verschleißwert der Werkzeugelektrode ein gemeinsames Optimum bilden, liegt bei $t_{off} = 5,6 \mu\text{s}$. Diese Parameterkombination wird für die Betrachtung des Ladestroms im Bereich $0,9 \text{ A} \leq i_L \leq 2,2 \text{ A}$ beibehalten, was bei Erhöhung zu einer gleichmäßigen Verkürzung der Erosionsdauer t_{ero} führt. Der relative Elektrodenverschleiß ϑ weist tendenziell ein gegenläufiges Verhalten mit sprunghaften Änderungen auf. Ein Minimum des Verschleißwerts mit $\vartheta = 46 \%$ liegt bei einem Ladestrom $i_L = 1,2 \text{ A}$, welcher für die abtragoptimierte Parameterkombination verwendet wird.

Tabelle 9-3 zeigt das Bearbeitungsergebnis beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von Si_3N_4 -TiN und Sauerstoff als Dielektrikum unter der optimierten Parameterkombination.

Tabelle 9-3: Bearbeitungsergebnis für das trockenfunkenerosive Feinbohren von Si_3N_4 -TiN und Sauerstoff als Dielektrikum mit abtragoptimierter Parameterkombination

Messwerte Si_3N_4 -TiN, O_2		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsausritt
Erosionsdauer t_{ero}	3,5 s		
rel. Elektrodenverschleiß ϑ	29 %		
oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	389 μm		
unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}	356 μm		
Arithmetische Mittenrauwert R_a	2,8 μm		
EDX-Analyse der Bohrungswand			
			

Die unter den optimierten Parametern benötigte Erosionsdauer beträgt $t_{\text{ero}} = 3,5$ s bei einem relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta = 29$ % für die Herstellung von Mikrobohrungen mittels 300 μm starken Hartmetallelektroden. Das dabei entstehende Bohrloch weist einen oberen und unteren Durchmesser von $d_{\text{Bo}} = 389$ μm sowie $d_{\text{Bu}} = 356$ μm auf mit gleichmäßigen runden Formen. Die Fertigung der Bohrung erfolgt unter einer hohen Prozessstabilität, welche auf den durch Sauerstoff wirkenden Abtragmechanismus des Melting-Effekts sowie die Oxidation zurückzuführen ist. Auf der Werkstückoberfläche und am Bohrungseintritt sind Rückstände aufgeschmolzenen und wieder erstarrten Werkstoffs zu erkennen, der die für den Melting-Effekt typische Tropfenform zeigt. Der arithmetische Mittenrauwert der Profilordinate R_a beträgt an der Bohrungswand $R_a = 2,8$ μm , welches eine Folge des Aufschmelzens, Wiedererstarrens und des dadurch entstehenden spröden Werkstoffs ist.

Die EDX-Analyse von der Mantelfläche der Bohrung belegt eine Werkstoffmischung aus dem Werkzeugelektroden- und Werkstückwerkstoff sowie den Einfluss des Sauerstoffs – nachweislich in der Oxidbildung. Der Stickstoffanteil der Si_3N_4 -TiN Keramik ist dabei

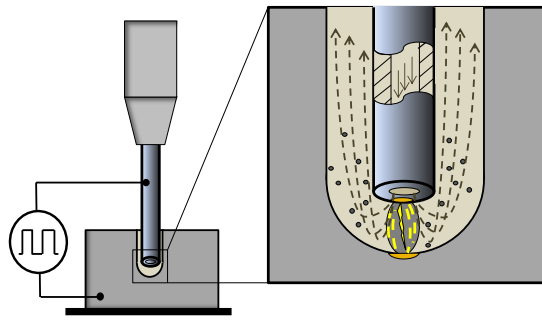
nicht mehr nachzuweisen, was auf das gasförmige Entweichen während des Erosionsprozesses zurückzuführen ist.

Durch den Einsatz von Sauerstoff als Dielektrikum sowie unter der abgeleiteten Parameterkombination ist eine Technologie für die Schruppbearbeitung von Si_3N_4 -TiN Keramik entstanden. Diese ist für die abtragorientierte Fertigung von Mikrobohrungen geeignet. Die entstandenen Bohrungen mit einer erzielten Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 3,5$ s weisen derzeit die höchsten erlangten Abtragraten V_W beim trockenfunkenerosiven Feinbohren auf.

Die Ableitung einer optimalen Parameterkombination für das trockenfunkenerosive Feinbohren von TiB_2 erfolgt auf Basis der Technologie 7 der Tabelle 8-12. Dabei werden die Prozessstellgrößen Ladestrom i_L und Leerlaufspannung u_0 wegen ihres in der Effektanalyse identifizierten Einflusses auf die Erosionsdauer t_{ero} sowie den relativen Elektrodenverschleiß ϑ untersucht und angepasst. Bild 9-4 zeigt den Einfluss des Ladestroms i_L und der Leerlaufspannung u_0 auf die Erosionsdauer t_{ero} sowie den relativen Elektrodenverschleiß ϑ in Bereichen von $1,2 \text{ A} \leq i_L \leq 2,3 \text{ A}$ und $80 \text{ V} \leq u_0 \leq 120 \text{ V}$.

Die Verschleißwerte der Werkzeugelektrode weisen unter einem Ladestrom von $i_L = 1,2 \text{ A}$ und $i_L = 1,8 \text{ A}$ Tiefpunkte mit ca. $\vartheta \approx 120 \%$ auf. In diesem Bereich hat die Erhöhung des Ladestroms i_L eine starke Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} zur Folge, welche darüber hinaus sprunghaft wechselnd reagiert. Ein gemeinsames Optimum von Werkstoff- und Elektrodenabtrag bildet der Einstellwert für den Ladestrom $i_L = 1,8 \text{ A}$.

Darauf aufbauend erfolgt die Anpassung der Leerlaufspannung u_0 , die mit Erhöhung im betrachteten Bereich zu einer nahezu konstanten Reduzierung der Erosionsdauer von $t_{\text{ero}} = 71 \text{ s}$ bis $t_{\text{ero}} = 26 \text{ s}$ führt. Der relative Elektrodenverschleiß ϑ wird von der Leerlaufspannung u_0 zwischen $80 \text{ V} \leq u_0 \leq 100 \text{ V}$ nicht beeinflusst und steigt darüber hinaus sprunghaft an bis zu einem Maximalwert von $\vartheta = 216 \%$. Ein gemeinsames Optimum zwischen Werkstoff- und Elektrodenabtrag besteht unter den verwendeten Einstellungen und Sauerstoff als Dielektrikum bei $u_0 = 100 \text{ V}$.



Werkstückwerkstoff:	TiB ₂
Legende:	□ Erosionsdauer t_{ero}
	▲ rel. Elektrodenverschleiß ϑ
Werkzeugelektrode:	Hartmetall
Durchgangsbohrung:	$d_{\text{el}} = 300 \mu\text{m}$
Arbeitsmedium:	$l_b = 1 \text{ mm}$
Ausgangstechnologie:	Sauerstoff
Impulsart:	7 der Tabelle 8-12
	Relaxationsentladung

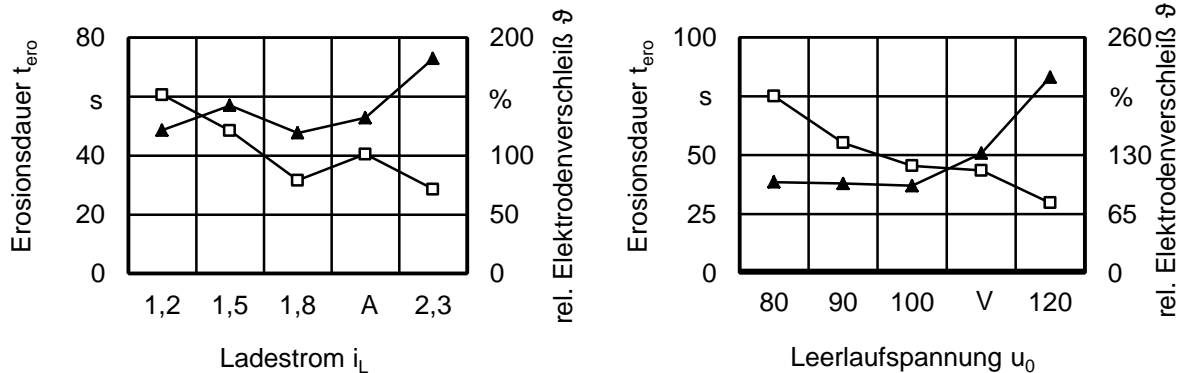


Bild 9-4: Abtrag- und Verschleißoptimierung durch die Feinabstimmung der Faktoren Ladestrom i_L und Leerlaufspannung u_0 zum trockenfunkenerosiven Feinbohren von TiB₂ und Sauerstoff als Dielektrikum

Die optimierte Parameterkombination für die trockenfunkenerosive Feinbohrbearbeitung von TiB₂ führt zu einer Erosionsdauer t_{ero} und einem relativen Elektrodenverschleiß ϑ von $t_{\text{ero}} = 41 \text{ s}$ und $\vartheta = 105 \%$, Tabelle 9-4 beinhaltet die Auflistung weiterer betrachteter Zielgrößen.

Die dabei entstehenden Bohrungen in TiB₂ besitzen eine starke konische Form bei einem oberen und unteren Durchmesser von $d_{\text{Bo}} = 431 \mu\text{m}$ und $d_{\text{Bu}} = 318 \mu\text{m}$, dies entspricht einer Differenz von $\Delta_{\text{dB}} = 113 \mu\text{m}$. Dies ist zu begründen mit der hohen Oxidationswirkung von Sauerstoff, welche eine fördernde Wirkung auf den Werkstoffabtrag an Werkstück und Werkzeugelektrode hat. Der für Sauerstoff verhältnismäßig lange Eingriff der Werkzeugelektrode im Werkstück, insbesondere am Bohrungseintritt, verursacht, aufgrund vorliegender Passiventladungen zwischen der Werkzeugelektrode und der Bohrungswand, die Vergrößerung des Durchmessers.

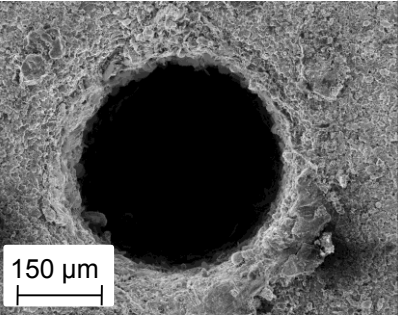
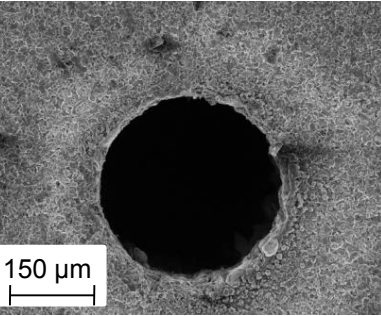
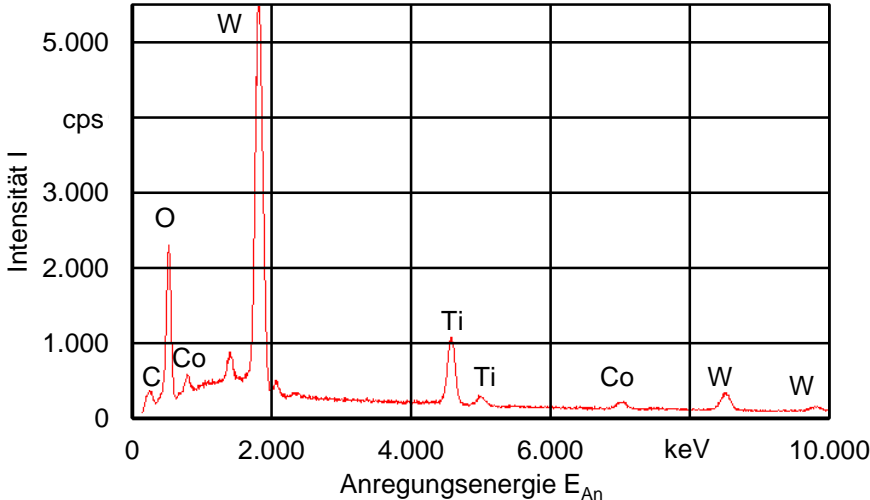
Des Weiteren führt dieser Effekt zu einer Verrundung des Bohrungsrandes, welche am Bohrungseintritt stärker ausgeprägt ist als am Bohrungsausritt. Die Bohrungsform ist unter den verwendeten optimierten Prozessparametern gleichmäßig rund, was auf eine hohe Prozessgüte während der Bohrbearbeitung hindeutet. Auf der Werkstückoberfläche sowie an der Mantelfläche sind die einzelnen Keramikkörner zu erkennen, welche thermische Einflüsse aufzeigen bzw. mit dem abgetragenen Elektrodenwerkstoff überzogen sind. Da die Keramikkörner freigelegt sind, basiert der Werkstoffabtrag auf Thermoschock und/oder einer Mischung aus Spalling- und Melting-Effekt.

Die EDX-Analyse zeigt, dass die Mantelflächen von abgetragenen und wieder erstarrtem Elektrodenwerkstoff bedeckt sind sowie, aufgrund der hohen Reaktionsfreudigkeit von Sauerstoff, einen hohen Oxidanteil aufweisen. Der arithmetische Mittenrauwert der Profilordinate

$Ra = 1,6 \mu\text{m}$ ist der am geringsten erzielte unter den betrachteten Prozessgasen, was auf Ablagerungen von Elektrodenwerkstoff an der Bohrungswand zurückzuführen ist.

Wie das Ergebnis der abgeleiteten Parameterkombination und Sauerstoff als Dielektrikum zeigt, ist diese aufgrund des hohen Werkstoffabtrags für die Schruppbearbeitung beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von TiB_2 geeignet.

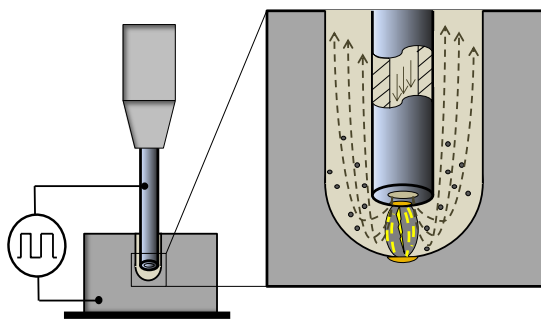
Tabelle 9-4: Bearbeitungsergebnis für das trockenfunkenerosive Feinbohren von TiB_2 und Sauerstoff als Dielektrikum mit abtragoptimierter Parameterkombination

Messwerte TiB_2, O_2		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsausritt
Erosionsdauer t_{ero}	41 s		
rel. Elektrodenverschleiß ϑ	105 %		
oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	431 μm		
unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}	318 μm		
arithmetischer Mittenrauwert Ra	1,6 μm		
EDX-Analyse der Bohrungswand			
			

9.4 Prozesstechnologie für Stickstoff

Die Verwendung von Stickstoff als Dielektrikum hat in der durchgeführten Untersuchung des Kapitels 8.4 keine prozessfördernde Wirkung bei der Bearbeitung von TiB_2 erzielt. Bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ hingegen waren Tendenzen für den Einsatz zur verschleißarmen Schlichtbearbeitung zu erkennen. Insbesondere hat die Effektanalyse ergeben, dass bei einer Vielzahl von Faktoren hoch signifikante Effekte auftreten, welche die Erosionsdauer t_{ero} und den relativen Elektrodenverschleiß ϑ beeinflussen. Dabei handelt es sich um die Prozessstellgrößen Entladekapazität C_e , Einschaltdauer t_{on} , Ausschaltdauer t_{off} , Ladestrom i_L und Leerlaufspannung u_0 , welche in der folgenden Parameteroptimierung durch Variation aufeinander abge-

stimmt werden. Bild 9-5 zeigt die Verläufe zum Einfluss der einzelnen Prozessstellgrößen, abtastend von der Technologie 5 der Tabelle 8-15, auf die Erosionsdauer t_{ero} und den relativen Elektrodenverschleiß ϑ .



Werkstückwerkstoff: $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$
 Legende: \square Erosionsdauer t_{ero}
 \blacktriangle rel. Elektrodenverschleiß ϑ
 Werkzeugelektrode: Hartmetall
 $d_{\text{el}} = 300 \mu\text{m}$
 Durchgangsbohrung: $l_b = 1 \text{ mm}$
 Arbeitsmedium: Stickstoff
 Ausgangstechnologie: 5 der Tabelle 8-15
 Impulsart: Relaxationsentladung

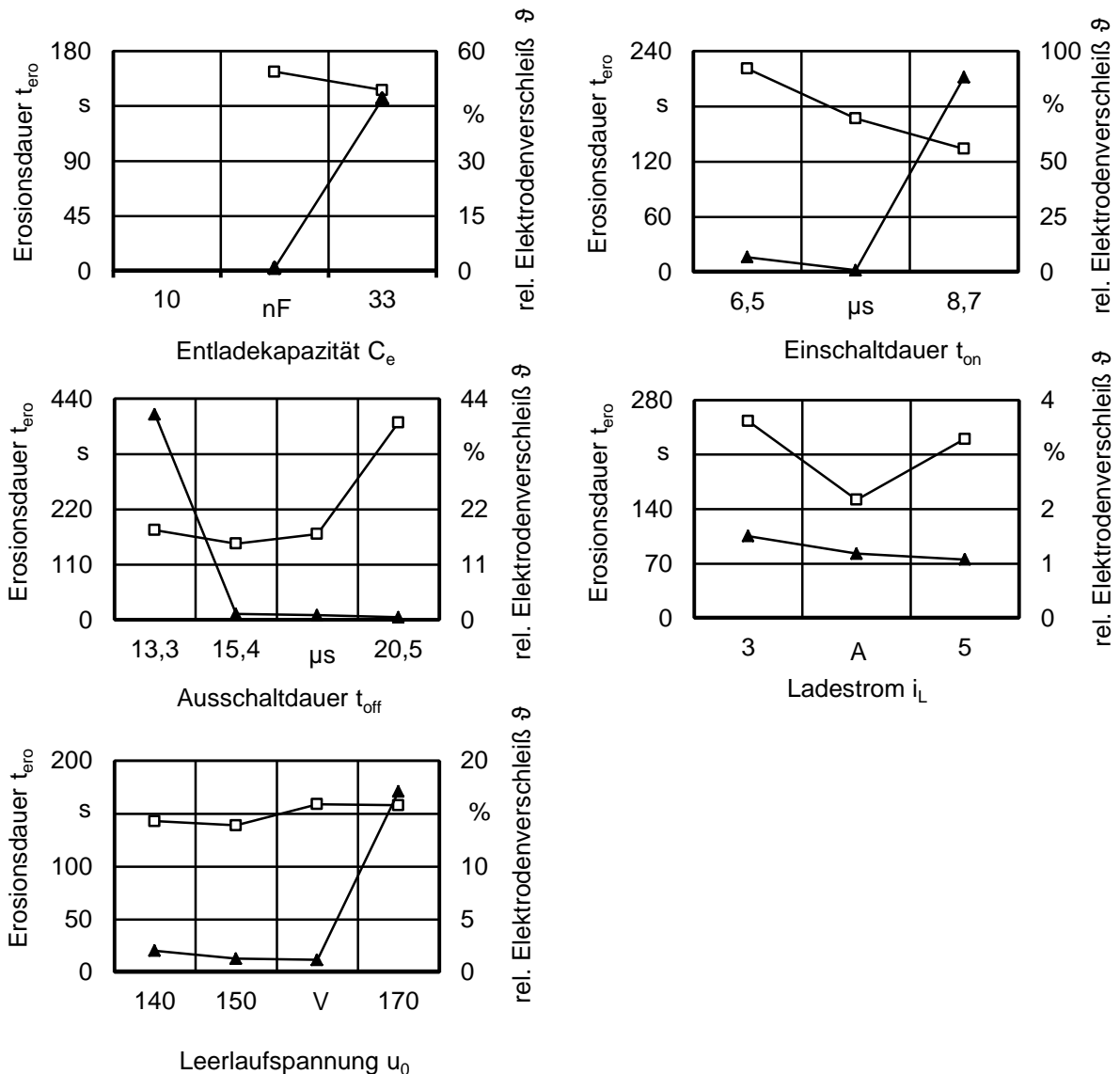


Bild 9-5: Abtrag- und Verschleißoptimierung durch die Feinabstimmung der Faktoren Ausschaltdauer t_{off} , Einschaltdauer t_{on} , Ladestrom i_L , Leerlaufspannung u_0 und Entladekapazität C_e zum trockenfunkenerosiven Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und Stickstoff als Dielektrikum

Die Erhöhung der Entladekapazität C_e von $C_e = 15 \text{ nF}$ auf $C_e = 33 \text{ nF}$ führt zu einer geringen Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} und zu einem sprunghaftigen Anstieg des relativen Elek-

trodenverschleißes von $\vartheta = 1\%$ auf $\vartheta = 47\%$. Bei Entladekapazitäten $C_e < 15\text{ nF}$ erfolgt eine starke Reduzierung des Werkstoffabtrags am Werkstück, was zu Erosionsdauern $t_{\text{ero}} \geq 1000\text{ s}$ sowie zum Abbruch des Erosionsvorgangs führt und somit für die weitere Betrachtung nicht relevant ist. Demzufolge wird der Einstellwert von $C_e = 15\text{ nF}$ für die anschließende Parameteroptimierung, der Anpassung der Einschaltdauer t_{on} , beibehalten.

Dabei erfolgt die Betrachtung der Einschaltdauer t_{on} in einem Bereich $6,5\text{ }\mu\text{s} \leq t_{\text{on}} \leq 8,7\text{ }\mu\text{s}$, welche bei Erhöhung zu einer erheblichen Reduzierung der Erosionsdauer führt, von $t_{\text{ero}} = 217\text{ s}$ bei $t_{\text{on}} = 6,5\text{ }\mu\text{s}$, auf $t_{\text{ero}} = 131\text{ s}$ bei $t_{\text{on}} = 8,7\text{ }\mu\text{s}$. Der relative Elektrodenverschleiß ϑ erreicht bei einer Einschaltdauer $t_{\text{ero}} = 7,5\text{ }\mu\text{s}$ ein Minimum mit einem Verschleißwert von $\vartheta = 1\%$. Bei Verringerung oder Erhöhung der Einschaltdauer t_{ero} kommt es zu einem sprunghaften Anstieg auf $\vartheta = 7\%$ oder $\vartheta = 88\%$. Für die weitere Optimierung der Prozessstellgrößen über die Ausschaltdauer t_{off} wird demzufolge die Einschaltdauer $t_{\text{on}} = 7,5\text{ }\mu\text{s}$ beibehalten.

Die Ausschaltdauer t_{off} zwischen $t_{\text{off}} = 13,3\text{ }\mu\text{s}$ und $t_{\text{off}} = 20,5\text{ }\mu\text{s}$ bewirkt bei Erhöhung bis $t_{\text{off}} = 17,8\text{ }\mu\text{s}$ keine relevante Änderung der Erosionsdauer t_{ero} , darüber hinaus erfolgt ein sprunghafter Anstieg von $t_{\text{ero}} = 167\text{ s}$ auf $t_{\text{ero}} = 389\text{ s}$. Der relative Elektrodenverschleiß ϑ weist bei einer Ausschaltdauer $t_{\text{off}} = 13,3\text{ }\mu\text{s}$ einen Wert von $\vartheta = 41\%$ auf, welcher bei Erhöhung, innerhalb des betrachteten Bereichs, sprunghaft auf $\vartheta \leq 1\%$ reduziert wird. Dieses Verhalten ist auf hohe Energieverluste durch die starke Einschnürung des Plasmakanals zurückzuführen, was bei einer Erhöhung der Pause zwischen den Entladephasen zu einer Herabsetzung der Abtrag- und Verschleißrate führt. Bei einer Ausschaltdauer $t_{\text{off}} = 17,8\text{ }\mu\text{s}$ liegt mit einer Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 167\text{ s}$ ein für Stickstoff hoch erzielter Werkstückwerkstoffabtrag vor, bei einem minimalen realisierten relativen Elektrodenverschleiß von $\vartheta = 1\%$.

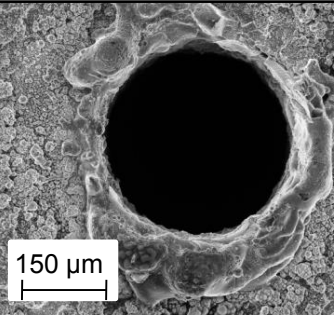
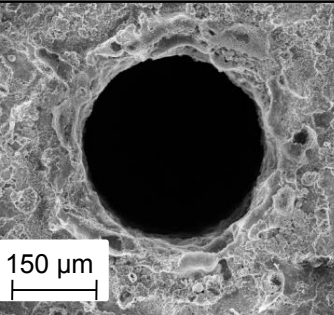
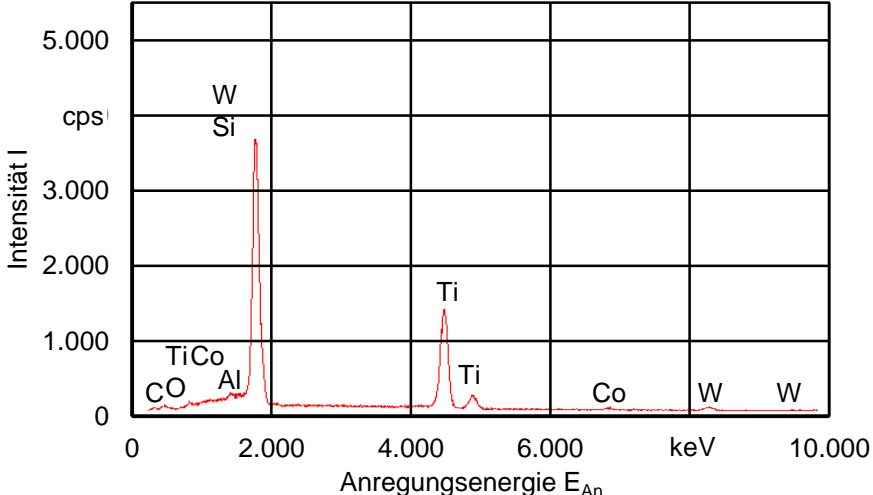
Aufbauend auf dieser Parameterkombination erfolgt die Betrachtung des Ladestroms i_L in einem Bereich $3\text{ A} \leq i_L \leq 5\text{ A}$. Dieser bewirkt bei einer Änderung innerhalb des untersuchten Bereichs eine zu vernachlässigende Beeinflussung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ . Die Erosionsdauer t_{ero} hingegen zeigt bei einem Ladestrom $i_L = 4\text{ A}$ ein Minimum von $t_{\text{ero}} = 148\text{ s}$. Bei Erhöhung oder Herabsetzung des Ladestroms i_L kommt es zu einem erheblichen Anstieg der Erosionsdauer t_{ero} .

Ausgehend von einem Ladestrom $i_L = 4\text{ A}$ erfolgt die Anpassung der Leerlaufspannung u_0 in einem Betrachtungsbereich zwischen $u_0 = 140\text{ V}$ bis $u_0 = 170\text{ V}$. Die steigende Leerlaufspannung u_0 führt zu einer geringfügigen Verlängerung der Erosionsdauer t_{ero} , was zu vernachlässigen ist. Zwischen $140\text{ V} \leq u_0 \leq 160\text{ V}$ findet eine Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ , darüber hinaus ein sprunghafter Anstieg von $\vartheta = 1\%$ auf $\vartheta = 17\%$ statt. Ein Optimum zwischen Erosionsdauer t_{ero} und dem relativen Elektrodenverschleiß ϑ bildet die Leerlaufspannung $u_0 = 160\text{ V}$, welche für die optimierte Parameterkombination beibehalten wird.

Tabelle 9-5 zeigt das Bearbeitungsergebnis mit der abgeleiteten Parameterkombination für das trockenfunkenerosive Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ Keramik mittels einer $300\text{ }\mu\text{m}$ starken Hartmetallelektrode und Stickstoff als Dielektrikum. Dabei wurden die 1 mm tiefen Durchgangsbohrungen innerhalb einer Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 163\text{ s}$ bei einem relativen Elektrodenverschleiß von $\vartheta < 1\%$ gefertigt. Diese weisen einen oberen und unteren Bohrungsdurchmesser von $d_{\text{Bo}} = 369\text{ }\mu\text{m}$ sowie $d_{\text{Bu}} = 352\text{ }\mu\text{m}$ auf, was einer Abweichung von $\Delta d_B = 17\text{ }\mu\text{m}$ entspricht. Demzufolge besitzen die entstandenen Bohrungen eine hohe Formgenauigkeit,

zurückzuführen auf den extrem geringen relativen Elektrodenverschleiß ϑ und die hohe Prozessstabilität.

Tabelle 9-5: Bearbeitungsergebnis für das trockenfunkenerosive Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und Stickstoff als Dielektrikum mit verschleißoptimierter Parameterkombination

Messwerte $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, N_2		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsausritt
Erosionsdauer t_{ero}	163 s		
rel. Elektrodenverschleiß ϑ	0,75 %		
oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	369 µm		
unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}	352 µm		
arithmetischer Mittenrauwert R_a	2,5 µm		
EDX-Analyse der Bohrungswand			
			

Die Ränder des Bohrungsein- und -austritts weisen eine runde Form sowie scharfe Kanten auf, welche von aufgeschmolzenem und wieder erstarrtem Werkstückwerkstoff bedeckt sind, insbesondere auf der Werkstückoberfläche des Bohrungseintritts. Aufgrund des in Kapitel 8.4 beschriebenen Prozessverhaltens von Stickstoff bei der trockenfunkenerosiven Feinbohrbearbeitung erfolgt der Werkstoffabtrag über der Melting-Effekt.

Der an der Mantelfläche der Bohrung anhaftende Werkstoff ist spröde und zeigt runde Konturen, welche typisch für aufgeschmolzenen sowie wieder erstarrten Werkstoff sind, bei einem arithmetischen Mittenrauwert der Profildordinate $R_a = 2,5 \mu\text{m}$. Die EDX-Analyse dokumentiert die Hauptbestandteile Silizium und Titan, welche geringfügige Spuren von Wolfram und Kobalt des Elektrodenwerkstoffs beinhalten. Der Stickstoff im $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ ist aufgrund des thermischen Prozesses, wie auch unter dem Einsatz aller anderen untersuchten Gase, nicht mehr nachzuweisen, da sich dieser in einen gasförmigen Zustand verflüchtigt hat. Im Gegensatz zu den Ausgangsparametern weist die optimierte Einstellung eine hohe Prozesssta-

bilität ohne Kurzschlussentladungen auf und ist aufgrund der geringen Verschleißwerte sowie der hohen Bohrungsqualität für die Schlichtbearbeitung geeignet.

9.5 Prozesstechnologie für deionisiertes Wasser

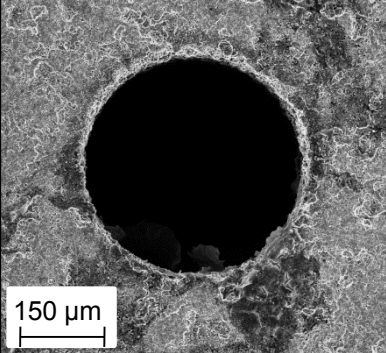
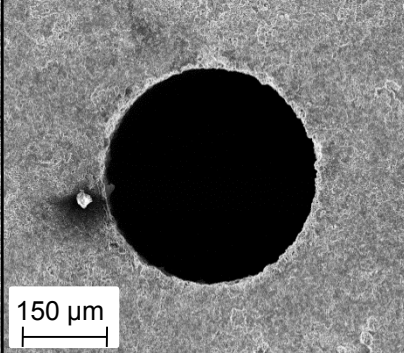
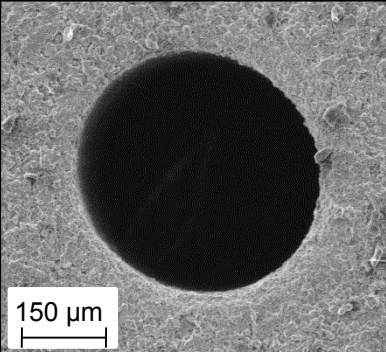
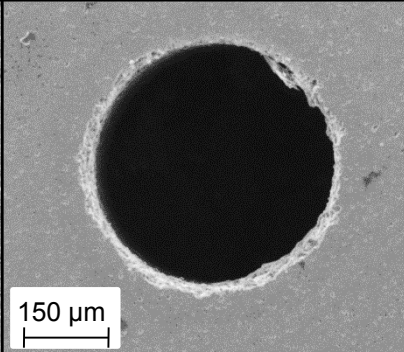
Die folgende Tabelle 9-6 beinhaltet eine Zusammenfassung der entwickelten Prozesstechnologien für die jeweiligen Prozessgase. Sie dient dem direkten Vergleich der mit deionisiertem Wasser erarbeiteten Bearbeitungsergebnisse, ferner sind in ihr Anwendungsempfehlungen für die trockenfunkenerosive Bohrbearbeitung von Si_3N_4 -TiN und TiB_2 aufgeführt.

Tabelle 9-6: Zusammenfassung der Bearbeitungsergebnisse der Prozesstechnologien mit gasförmigen Dielektrika

Prozesstechnologien für Si_3N_4 -TiN mit Argon als Prozessgas			
empfohlene Anwendung	verschleißarme Schlichtbearbeitung		
Bearbeitungsergebnis	Erosionsdauer t_{ero}	relativer Elektrodenverschleiß ϑ	Spaltweite s_L
	160 s	0,9 %	11 μm
Prozesstechnologien für Si_3N_4 -TiN mit Sauerstoff als Prozessgas			
empfohlene Anwendung	Schruppbearbeitung		
Bearbeitungsergebnis	Erosionsdauer t_{ero}	relativer Elektrodenverschleiß ϑ	Spaltweite s_L
	3,5 s	29 %	28 μm
Prozesstechnologien für Si_3N_4 -TiN mit Stickstoff als Prozessgas			
empfohlene Anwendung	verschleißarme Schlichtbearbeitung		
Bearbeitungsergebnis	Erosionsdauer t_{ero}	relativer Elektrodenverschleiß ϑ	Spaltweite s_L
	163 s	0,75 %	26 μm
Prozesstechnologien für TiB_2 mit Helium als Prozessgas			
empfohlene Anwendung	verschleißarme Schlichtbearbeitung		
Bearbeitungsergebnis	Erosionsdauer t_{ero}	relativer Elektrodenverschleiß ϑ	Spaltweite s_L
	153 s	34 %	25 μm
Prozesstechnologien für TiB_2 mit Sauerstoff als Prozessgas			
empfohlene Anwendung	Schruppbearbeitung		
Bearbeitungsergebnis	Erosionsdauer t_{ero}	relativer Elektrodenverschleiß ϑ	Spaltweite s_L
	41 s	105 %	9 μm

Zur Gegenüberstellung der unter gasförmigen Arbeitsmedien erreichten Bearbeitungsergebnisse mit denen unter flüssigem Dielektrikum sind in [Tabelle 9-7](#) und [Tabelle 9-8](#) Vergleichsergebnisse dargestellt. Hierfür wurden optimierte hoch- und niederenergetische Einstellungen der Prozessstellgrößen zum konventionellen Feinbohren mit deionisiertem Wasser als Arbeitsmedium verwendet.

Tabelle 9-7: Bearbeitungsergebnis für das konventionelle, funkenerosive Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 sowie mit deionisiertem Wasser als Dielektrikum und hochenergetischer Parameterkombination

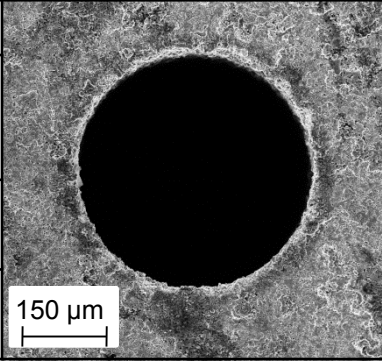
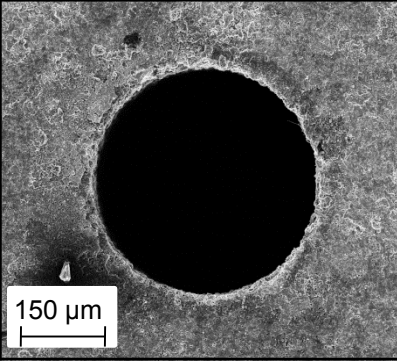
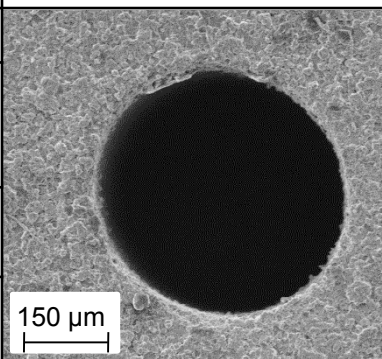
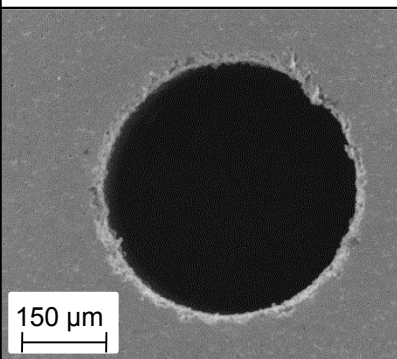
hochenergetische Parameterkombination				
Entladekapazität C_e	Einschaltdauer t_{on}	Ausschaltdauer t_{off}	Ladestrom i_L	Leerlaufspannung u_0
33 nF	2 μs	64,8 μs	2 A	160 V
Bearbeitungsergebnis für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit deionisiertem Wasser				
Messwerte		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsausritt	
Erosionsdauer t_{ero}	6 s			
relativer Elektrodenverschleiß ϑ	6 %			
oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	330 μm			
unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}	310 μm			
Bearbeitungsergebnis für TiB_2 mit deionisiertem Wasser				
Messwerte		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsausritt	
Erosionsdauer t_{ero}	101 s			
relativer Elektrodenverschleiß ϑ	12 %			
oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	332 μm			
unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}	330 μm			

Unter dem Einsatz der hochenergetischen Parameterkombination werden bei der Bearbeitung des Werkstückwerkstoffs $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ eine minimale Erosionsdauer von $t_{\text{ero}} = 6$ s bei einem relativen Elektrodenverschleiß von $\vartheta = 6$ % erreicht. Die dabei gefertigte Durchgangsbohrung weist eine gleichmäßige runde Form und scharfe Kanten am Bohrungsein- und -austritt auf. Lediglich durch den Einsatz von Sauerstoff als Prozessgas wird die Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 6$ s unterschritten, vergleiche [Tabelle 9-6](#).

Des Weiteren sind alle unter deionisiertem Wasser gefertigten Bohrungen rückstandsfrei von Werkstoffablagerungen, wie diese teilweise beim trockenfunkenerosiven Feinbohren auftreten. Dies ist auf die hohe Kühlwirkung von Wasser zurückzuführen, die ein schockartiges Erstarren des aufgeschmolzenen Werkstoffs verursacht und somit das Anhaften von Abtragspartikeln an der Werkstückoberfläche verhindert.

Durch die Verwendung der unter Tabelle 9-8 aufgeführten niederenergetischen Parameterkombination beträgt die Erosionsdauer für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ $t_{\text{ero}} = 13 \text{ s}$ bei einer geringfügigen Verbesserung des relativen Elektrodenverschleißes ϑ um 1 % und die Abweichung des Durchmessers vom Bohrungseintritt d_{BE} zum Bohrungsausritt d_{BA} um $3 \mu\text{m}$. Demzufolge kann die in Tabelle 9-8 aufgelistete hochenergetische Parameterkombination sowohl für Schrupp- als auch für Schlichtenwendungen beim Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ eingesetzt werden.

Tabelle 9-8: Bearbeitungsergebnis für das konventionelle, funkenerosive Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 sowie mit deionisiertem Wasser als Dielektrikum und niedrigerenergetischer Parameterkombination

niederenergetische Parameterkombination					
Entladekapazität C_e	Einschaltdauer t_{on}	Ausschaltdauer t_{off}	Ladestrom i_L	Leerlaufspannung u_0	
10 nF	1,5 μs	64,8 μs	3 A	100 V	
Bearbeitungsergebnis für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ mit deionisiertem Wasser					
Messwerte		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsausritt		
Erosionsdauer t_{ero}	13 s				
relativer Elektrodenverschleiß ϑ	5 %				
oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	327 μm				
unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}	310 μm				
Bearbeitungsergebnis für TiB_2 mit deionisiertem Wasser					
Messwerte		REM-Aufnahme Bohrungseintritt	REM-Aufnahme Bohrungsausritt		
Erosionsdauer t_{ero}	110 s				
relativer Elektrodenverschleiß ϑ	21 %				
oberer Bohrungsdurchmesser d_{Bo}	320 μm				
unterer Bohrungsdurchmesser d_{Bu}	320 μm				

Der geringe relative Elektrodenverschleiß von $\vartheta = 6 \%$ kann durch den Einsatz von Argon und Stickstoff als Arbeitsmedium auf $\vartheta < 1 \%$ reduziert werden, siehe Tabelle 9-6. Verschleißwerte beim funkenerosiven Feinbohren unterhalb von 1% wurden nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht realisiert.

Die Bearbeitung von TiB_2 mit den hochenergetischen Parametereinstellungen weist mit einer Erosionsdauer von $t_{\text{ero}} = 101 \text{ s}$, gegenüber der mit den niedrigenergetischen Parameterkombination gefertigten Bohrungen mit $t_{\text{ero}} = 110 \text{ s}$, eine geringfügige Zeitersparnis auf. Ebenfalls ist es möglich für TiB_2 , wie bei der Bearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, durch den Einsatz von Sauerstoff als Arbeitsmedium die Erosionsdauer t_{ero} erheblich zu reduzieren, siehe Tabelle 9-4 oder Tabelle 9-6.

Der relative Elektrodenverschleiß mit $\vartheta = 12 \%$ bei der hochenergetischen und $\vartheta = 21 \%$ bei der niederenergetischen Parameterkombination kann für TiB_2 durch keine der verwendeten Technologien für das trockenfunkenerosive Feinbohren erreicht werden. Helium als Arbeitsmedium und der Einsatz der unter Kapitel 9.2 erarbeiteten Prozesstechnologien ergeben einen minimalen relativen Elektrodenverschleiß von $\vartheta = 34 \%$, siehe Tabelle 9-2 oder Tabelle 9-6.

Die sehr hohe Qualität der Bohrungen in TiB_2 , aufgrund der gleichmäßig runden Konturen von Bohrungsein- und -austritt sowie deren geringfügige Abweichungen in den Durchmessern, trotz langer Eingriffszeiten der Elektrode ist eine Folge des Spalling-Effekts. Wie der Stand der Technik zeigt, wird die Thermoschockwirkung durch ein Dielektrikum mit hoher Kühlwirkung verstärkt, siehe Kapitel 2.4.2. Die an der Mantelfläche der Werkzeugelektrode herrschende Energiedichte ist aufgrund der hohen Verteilung der einzelnen Entladungen nicht ausreichend, um ganze Werkstoffpartikel des TiB_2 herauszulösen.

10 Zusammenfassung

Industrielle Hauptanwendungen des funkenerosiven Feinbohrns mit Elektrodendurchmessern $d_{el} \leq 300 \mu\text{m}$ liegen in den Bereichen der Fahrzeugtechnik, Feinwerktechnik, Medizintechnik, Umformtechnik sowie dem Formen- und Werkzeugbau. Wesentliche Vorteile des Verfahrens sind der kontaktfreie Werkstoffabtrag, unabhängig von dessen Härte und Festigkeit, sowie die Realisierung von Mikrobohrungen mit hohen Aspektverhältnissen. Dies prädestiniert das funkenerosive Feinbohren zur präzisen Bearbeitung von Hochleistungswerkstoffen.

Wie der Stand der Technik, Kapitel 2.2, zeigt, liegen verfahrensinhärente Einschränkungen des funkenerosiven Feinbohrns in den unzureichenden Spülbedingungen an der Wirkstelle mit steigender Bohrtiefe und abnehmenden Bohrungsdurchmessern. Zur Gewährleistung einer hohen Prozessstabilität bei der funkenerosiven Bearbeitung und somit der Sicherstellung guter Fertigungsergebnisse sind in den vergangenen Jahren Ansätze zur Verbesserung der Spülbedingungen durch den Einsatz von niederviskosen Arbeitsmedien bis hin zu Gasen entstanden. Die veröffentlichten Arbeiten reichen nicht über Machbarkeitsstudien hinaus, zeigen jedoch eine Vielzahl technologischer Vorzüge gegenüber dem Einsatz von flüssigem Dielektrikum [FUR00, KAO07, KUN97, KUN01, KUN03, KUN04, SKR10, TAO07, LIQ06, SOU09, YU04].

Die Trockenfunkenerosion wurde dabei ausschließlich auf dem Gebiet der Makrobearbeitung erforscht unter der Betrachtung eines Werkstoffspektrums, welches aufgrund geeigneterer Fertigungsverfahren für die Funkenerosion unwirtschaftlich ist. Des Weiteren existierten unzureichende Kenntnisse über das Prozessverhalten der Trockenfunkenerosion, welche die Grundlagen des Prozessverständnisses bilden. Demzufolge wurden bisher keine Hochleistungswerkstoffe, welche aufgrund ihrer industriellen Relevanz und somit aus wirtschaftlichen Aspekten eine permanente Optimierung bestehender Fertigungsverfahren und Technologien fordern, trockenfunkenerosiv bearbeitet. Insbesondere ist Handlungsbedarf bei der Verfahrensoptimierung zum wirtschaftlichen funkenerosiven Feinbohren technischer Keramiken, aufgrund erschwerter Spülbedingungen und steigender Anzahl industrieller Anwendungen, identifiziert worden. Darüber hinaus sind bis zum jetzigen Zeitpunkt keine wissenschaftlichen Abhandlungen über die trockenfunkenerosive Bearbeitung von keramischen Werkstoffen bekannt.

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung, Analyse und die Anwendung des trockenfunkenerosiven Feinbohrns keramischer Werkstoffe sowie die Bereitstellung prozesssicherer Fertigungstechnologien für die präzise Schlicht- und abtragoptimierte Schruppbearbeitung. Der Einsatz gezielt verwendeter Gase sollte einerseits, aufgrund ihrer geringen dynamischen Viskosität η gegenüber Flüssigkeiten, zu verbesserten Spülbedingungen innerhalb des Arbeitsspalts führen, andererseits durch ihre Eigenschaften prozessbeeinflussend wirken. Die wissenschaftliche Umsetzung erfolgte dabei über vier Teilschritte, welche grundlegende Analysen zur Erarbeitung eines Prozessverständnisses und die systematische Verfahrensoptimierung zur anwendungsorientierten Bereitstellung von Fertigungstechnologien beinhalten.

Zur Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses wurden zu Beginn der technologischen Untersuchungen die Auswirkungen einzelner Relaxationsentladungen unter Luft und deionisiertem Wasser als Dielektrikum ausgewertet, Kapitel 5. Dabei erfolgte die Be-

trachtung und messtechnische Auswertung von Einzelentladekratern, welche mit unterschiedlichen Parameterkombinationen auf den Werkstückwerkstoffen TiN-Si₃N₄, TiB₂ und Chrom-Nickel-Stahl 18CrNi8 erzeugt wurden. Der Werkstoff Stahl und das deionisierte Wasser als Dielektrikum dienten dabei dem Vergleich der Funkenentladungen des konventionellen mit dem des trockenfunkenerosiven Feinbohrens. Dieser Vergleich ermöglichte die Hervorhebung verfahrensspezifischer Unterschiede beim Einsatz flüssiger und gasförmiger Arbeitsmedien. Für die messtechnische Auswertung erfolgte eine Unterteilung des Einzelentladekraters in die Geometriemerkmale unteres Kratervolumen V_{Ku} und oberes Kratervolumen V_{Ko} . Aus diesen entstand die Ableitung des durch eine Funkenentladung herausgelösten und verdrängten Anteils des Werkstückwerkstoffs in Abhängigkeit von den Entladeparametern.

Im Folgenden sind die wichtigsten technologischen Erkenntnisse der unter Kapitel 5 durchgeführten Untersuchungen zusammengefasst:

- Die dynamische Viskosität η des eingesetzten Arbeitsmediums hat entscheidenden Einfluss auf die geometrische Ausbildung des Einzelentladekraters. Dies ist aufgrund der hohen Differenz zwischen gasförmigen und flüssigen Dielektrika so stark ausgeprägt, dass vereinzelte technologisch bekannte Effekte beim Einsatz von Luft als Dielektrikum hinfällig werden.

Somit verursacht die Verlängerung der Entladedauer t_e über die Erhöhung der Entladekapazität C_e , wodurch mehr Energie auf das Werkstück übertragen wird, die Ausbreitung des Entladekanals. Unter deionisiertem Wasser führt dies zur Erwärmung größerer Flächen des Werkstückwerkstoffs und zu einem steigenden Kraterdurchmesser d_K . Des Weiteren erfolgt die Erhöhung der Kratertiefe l_K , da der Umgebungsdruck p_o des flüssigen Dielektrikums der Ausbreitung am Fußpunkt entgegenwirkt und eine Erhöhung der Energiedichte sowie des Werkstoffabtrags bewirkt. Hingegen wird bei Luft als Arbeitsmedium, aufgrund des geringen Umgebungsdrucks p_o , durch die Erhöhung der Leerlaufspannung u_o und der Entladekapazität C_e , keine relevante Änderung in der Kratertiefe l_K realisiert. Dies bedeutet, dass trotz eines höheren Spitzenstroms \hat{i} und dem damit einhergehenden Anstieg der Stromdichte an den Fußpunkten kein tieferer Einbrand in das Werkstück erfolgt.

- Neben der Energieeinbringung in das Werkstück zeigten die Untersuchungen der Einzelentladungen, dass erhebliche Unterschiede im Werkstoffabtrag unter flüssigen zu gasförmigen Dielektrika vorliegen.

So kommt es bei deionisiertem Wasser nach dem Zusammenbruch des Entladekanals zu einer schnellen Verfestigung des aufgeschmolzenen Werkstoffs. Dies führt zur Bildung kugelförmiger Abtragpartikel, welche mit dem flüssigen Dielektrikum weggespült werden. Beim Einsatz von Luft als Arbeitsmedium wird hingegen der aufgeschmolzene Werkstoff nicht herausgespült und abgetragen, sondern durch die Prozesskräfte der Funkenentladung auf dem Werkstück verteilt.

- Eine weitere Erkenntnis ist die Beeinflussung der Kratergeometrie über die Zusammensetzung der untersuchten Werkstückwerkstoffe sowie die dadurch entstehenden Effekte, welche den Werkstoffabtrag bei Folgentladungen beeinflussen können.

Zurückzuführen auf die Werkstoffzusammensetzung der Mischkeramik Si₃N₄-TiN, weisen die Einzelentladungen auf deren Oberfläche starke Abweichungen zu denen in Stahl auf. Je

nach Sublimationspunkt und Schmelztemperatur T_s des jeweiligen Werkstoffbestandteils erfolgt deren Aufschmelzung und Verdampfung. Dabei bleiben thermisch unempfindlichere Bestandteile zurück, welche mit verflüssigtem und wiedererstartem Werkstoff überzogen werden. Die Folge daraus ist eine porös aussehende Entladekrateroberfläche mit maximalen Kratertiefen l_k unterhalb eines Mikrometers. Bei TiB_2 hingegen entsteht, aufgrund des geringeren spezifischen elektrischen Widerstands ρ_{el} , eine höhere Energieumsetzung trotz gleicher Parameterkombination. Die erzeugten Entladekrater auf dem TiB_2 Werkstück weisen vergleichbare Werte wie im Stahlwerkstoff auf. Hingegen kommt es zur Bildung von Mikrorissen in den Entladekrateroberflächen, welche auf eine Thermoschockwirkung, den Spalling-Effekt, zurückzuführen sind. Die Energie der Einzelentladung ist nicht ausreichend, um eine tief in das Werkstück eindringende Rissbildung zu verursachen und somit ganze Keramik Körner herauszulösen.

Basierend auf den Parametern der Einzelentladungen erfolgte die Ableitung von Parameterkombinationen zur Durchführung technologischer Untersuchungen für das trockenfunkenerosive Feinbohren mit Luft als Dielektrikum, Kapitel 6. Die Übertragbarkeit der Parameterkombinationen von Einzel- auf Folgentladungen war dabei, aufgrund unterschiedlicher Spaltzustände und demzufolge Lade- und Entladebedingungen der Kondensatoren, nicht gleichbedeutend realisierbar. Bei der Ableitung von Fertigungstechnologien zeigte die Gegenüberstellung der Strom- und Spannungsverläufe bei Folgeentladungen prozessbeeinflussende Unterschiede für die Arbeitsmedien Luft und deionisiertes Wasser:

- Zurückzuführen auf die geringe Durchschlagsfestigkeit von Luft mit $E_D = 3,3$ kV/mm, im Gegensatz zu der von deionisiertem Wasser mit $E_D = 65$ kV/mm, kam es zu frühzeitigen Entladevorgängen bei deren Verwendung.
- Folge für das trockenfunkenerosive Feinbohren mit Luft als Dielektrikum war eine maximal zu erreichende Leerlaufspannung von $u_0 = 60$ V.
- Durch den Einsatz von Kondensatorkapazitäten $C_e \geq 33$ nF oder durch das Einstellen einer Leerlaufspannung $u_0 \geq 100$ V konnte keine Steigerung des Energieumsatzes erreicht werden.

Im Gegensatz zu den Folgeentladungen unter deionisiertem Wasser wiesen die unter Luft, aufgrund geringerer Viskosität und demzufolge großer Strömungsgeschwindigkeiten im Arbeitsspalt, ein hohe Prozessgüte ohne Kurzschlussentladungen auf. Demzufolge werden unter gasförmigen Dielektrika bessere Spülbedingungen im Vergleich zu flüssigen Dielektrika erreicht, was dem Entstehen von Partikelbrücken entgegenwirkt.

Die Betrachtung zum Einfluss einzelner Prozessstellgrößen auf die Zielgrößen Erosionsdauer t_{ero} , relativer Elektrodenverschleiß ϑ , Spaltweite s_L und arithmetischer Mittenrauwert R_a der Bohrungswand erfolgte anhand einer systematischen Analyse der Haupteinflussfaktoren sowie deren Detailuntersuchung. Die Herstellung 1 mm tiefer Durchgangsbohrungen in die Werkstückwerkstoffe Si_3N_4 -TiN und TiB_2 erbrachte folgende Erkenntnisse für das trockenfunkenerosive Feinbohren mit Luft als Dielektrikum:

- Die energiebeeinflussenden Prozessstellgrößen der Funkenentladungen Leerlaufspannung u_0 und Entladekapazität C_e , welche die Entladedauer t_e und den Spitzenstrom \hat{i} definieren, haben geringfügig Einfluss auf die betrachteten Zielgrößen.
- Haupteinflussfaktoren sind die frequenzbeeinflussenden Prozessstellgrößen Einschaltdauer t_{on} und Ausschaltdauer t_{off} , welche

die Zeit der Entladephase und die Pause zwischen den Endladephasen vorgeben sowie der Ladestrom i_L , der die Ladegeschwindigkeit des Kondensators beeinflusst.

- Mit steigendem Spüldruck erfolgt die Erhöhung der Prozessstabilität und die Verringerung der Funkenspaltweite s_L , dies führt zur Verbesserung der Formgenauigkeit der Bohrungen.

Die Detailuntersuchung erfolgte dabei unter Berücksichtigung aller in der Effektanalyse betrachteten Prozessstellgrößen, unabhängig ihres Einflusses auf die Zielgrößen. Dies wurde durchgeführt, um die Aussage zu überprüfen, dass die energiebeeinflussenden Prozessstellgrößen der Funkenentladungen einen geringeren Einfluss auf die Zielgrößen haben als die frequenzbeeinflussenden Prozessstellgrößen. Des Weiteren erfolgte die Betrachtung der Regelparameter Servoverstärkung des Antriebs (Gain) und Spaltweitenkomprimierung (Compression) zur Untersuchung ihres Einflusses auf das Erosionsverhalten beim trockenfunkenerosiven Feinbohren.

Dabei wurden erhebliche Unterschiede im Prozess- und Abtragverhalten bei den keramischen Werkstückwerkstoffen $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 festgestellt und bei der Ableitung von Parameterkombinationen berücksichtigt. Hierfür erfolgte die Auswahl und Verknüpfung einzelner Prozessparameter in Hinblick auf die betrachteten Zielgrößen. Deren Kombination mündete in abtrag- und verschleißoptimierten Parameterkombinationen für das trockenfunkenerosive Feinbohren von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 mit Luft als Dielektrikum. Die abgeleiteten Parameterkombinationen wiesen bei der Fertigung von Mikrobohrungen, unter Verwendung einer 300 μm starken Hartmetallelektrode, eine hohe Prozessstabilität auf. Dabei entstanden folgende Ergebnisse:

- Für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ wurden 1 mm tiefe Durchgangsbohrungen hoher Formgenauigkeit realisiert mit einer Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 16 \text{ s}$, einem relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta = 9 \%$ und einer Funkenspaltweite $s_L = 34 \mu\text{m}$.

Unter der Parameterkombination Entladekapazität $C_e = 10 \text{ nF}$, Einschaltdauer $t_{\text{on}} = 6,5 \mu\text{s}$, Ausschaltdauer $t_{\text{off}} = 4,2 \mu\text{s}$ und einer Leerlaufspannung $u_0 = 60 \text{ V}$ entstehen hochfrequente Entladungen mit geringen Entladeenergien sowie kurze Entladephasen. Dies führt bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ zu einer Steigerung des Werkstückwerkstoffabtrags, welcher vorwiegend auf dem Melting-Effekt basiert.

- Bei der Herstellung 1 mm tiefer Durchgangsbohrungen in TiB_2 wurde unter den abgeleiteten Parameterkombinationen eine Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 120 \text{ s}$ mit einem relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta = 183 \%$ und einer Spaltweite $s_L = 7 \mu\text{m}$ erreicht.

Die Parameter weisen mit den Einstellungen Entladekapazität $C_e = 10 \text{ nF}$, Einschaltdauer $t_{\text{on}} = 11,5 \mu\text{s}$, Ausschaltdauer $t_{\text{off}} = 2,1 \mu\text{s}$ und einer Leerlaufspannung $u_0 = 180 \text{ V}$, gegenüber denen bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$, Entladungen mit höheren Energien und Frequenzen auf. Dadurch wird eine hohe Formgenauigkeit der Bohrung mit einer geringen Spaltweite $s_L = 7 \mu\text{m}$, trotz langer Erosionsdauer t_{ero} und sehr hohem relativen Elektrodenverschleiß ϑ , erreicht. Dies ist auf den bestimmenden Werkstückwerkstoffabtrag von TiB_2 , den Spalling-Effekt, zurückzuführen.

In Kapitel 7 erfolgte die Betrachtung von Abtragpartikeln unter den abgeleiteten und hochenergetischen Parameterkombinationen zur genaueren Untersuchung des vom Werkstückwerkstoff und von den Prozessstellgrößen abhängigen Abtragverhaltens der Keramiken. Da-

bei erfolgten eine messtechnische Auswertung der Abtragpartikel sowie die Ermittlung ihrer Werkstoffbestandteile, welche verglichen wurden mit dem des Grundwerkstoffs der Keramiken.

Für den Werkstückwerkstoffabtrag von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ wurden primär die Eigenschaften des Melting-Effekts identifiziert. Des Weiteren erfolgte ein Nachweis der Kombination verschiedener Abtragmechanismen, welche auf die Oxidation und Dekomposition von Werkstoffbestandteilen zurückzuführen sind. Chemische Reaktionen der keramischen Bestandteile mit dem Dielektrikum führten dabei, aufgrund des thermischen Prozesses, zur gasförmigen Freisetzung der Stickstoffbestandteile, was poröse Oberflächen der Abtragpartikel zur Folge hatte.

Bei der Bearbeitung von TiB_2 zeigten die Abtragpartikel Merkmale des Werkstoffabtrags über Thermoschockwirkung - den Spalling-Effekt. Dabei wurden die durch den Spalling-Effekt abgetragenen Keramikkörner und Bruchstücke des Werkstückwerkstoffs vom verflüssigten Elektrodenwerkstoff aufgenommen und zu großen Abtragpartikeln verschmolzen. Der Spalling-Effekt ist der primäre Abtragmechanismus beim trockenfunkenerosiven Feinbohren von TiB_2 und tritt verstärkt bei einer hohen Energieeinwirkung in das Werkstück auf.

Wie im Stand der Technik, Kapitel 2.2.3, dargelegt, hat das Dielektrikum einen erheblichen Einfluss auf den Erosionsprozess. Demzufolge werden, je nach Anwendungsfall und zu erzielendem Bearbeitungsergebnis, unterschiedliche Dielektrika eingesetzt, deren Eigenschaften verfahrensoptimierende Wirkungen aufweisen [WON95, KAR01, KUN05, KLI08, LAN15, MAS89, OEL14, YU02, YU03]. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Untersuchung zum Einfluss unterschiedlicher Gase auf deren Prozessverhalten beim trockenfunkenerosiven Feinbohren sowie die Ableitung von Schrupp- und Schlichtparametern für die keramischen Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 , Kapitel 8. Dabei wurden das Verhalten der einzelnen Prozessstellgrößen unter den jeweiligen Gasen mittels Effektanalysen und Detailuntersuchungen erforscht sowie eine systematische Prozessoptimierung durchgeführt, Kapitel 9. Kriterien zur Bewertung der Fertigungstechnologien hinsichtlich der Prozessgüte waren die erzielte Erosionsdauer t_{ero} und der relative Elektrodenverschleiß ϑ , die Formabweichungen des Bohrungsein- und -austritts sowie der arithmetische Mittenrauwert R_a an den Mantelflächen der Bohrungen. Folgende Ergebnisse konnten durch den Einsatz prozessfördernder Gase erzielt werden:

- Unter Verwendung von Argon und Stickstoff als Dielektrikum wurden optimierte Fertigungstechnologien für die Schlichtbearbeitung von $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ erarbeitet, deren Verschleißwerte für die Werkzeugelektrode $\vartheta < 1 \%$ betragen. Aufgrund der für diese Parameterkombination eingesetzten geringen Entladeenergien und der chemischen Reaktionssträgheit von Argon wiesen die entstandenen Bohrungen eine hohe Formgenauigkeit mit scharfkantigen Bohrungsein- und -austritten auf. Unter Stickstoff als Dielektrikum wurden höherenergetische Prozessparameter eingesetzt, welche zu einer hohen Stabilität des Erosionsvorgangs führten. Die dabei entstandenen Bohrungen zeigten ebenfalls eine hohe Formgenauigkeit.
- Für die Ableitung von Schlichtparametern zur Bearbeitung von TiB_2 konnte durch den Einsatz des Edelgases Helium eine starke Reduzierung des relativen Elektrodenverschleißes von $\vartheta = 183 \%$ auf $\vartheta = 34 \%$ realisiert werden. Dabei wurden Entladungen mit hohen Entladefrequenzen f_e und Entladeenergien E_e eingesetzt. Ohne das als Schutzgas agierende Helium hätte dies zu einem starken Abbrennen der Werkzeugelektrode geführt.

- Durch den Einsatz von Sauerstoff als prozessförderndes Gas kam es bei $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 zu einer erheblichen Steigerung der Abtragrate V_W . Demzufolge wurden unter Sauerstoff Parameterkombinationen zur Schruppbearbeitung abgeleitet. Dabei erfolgte für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 unter Reduzierung der Entladeenergie E_e und Entladefrequenz f_e die Optimierung der Prozesstechnologie. Bei TiB_2 konnte eine Reduzierung der Erosionsdauer von $t_{\text{ero}} = 120$ s auf $t_{\text{ero}} = 41$ s mit einem relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta = 105$ % realisiert werden. Für $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ wurde, mittels Sauerstoff als Dielektrikum, die Erosionsdauer von $t_{\text{ero}} = 16$ s auf $t_{\text{ero}} = 3,5$ s verringert. Die mit einer Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 3,5$ s und einem relativen Elektrodenverschleiß $\vartheta = 29$ % gefertigten Bohrungen weisen derzeit die schnellste Bohrgeschwindigkeit beim trockenfunkenerosiven Feinbohren auf.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein grundlegendes Prozessverständnis zum trockenfunkenerosiven Feinbohren keramischer Werkstoffe erzielt, welches die Ableitung und Bereitstellung von Fertigungstechnologien ermöglichte.

Die Ableitung der Fertigungstechnologien erfolgte nach der Effektanalyse über zwei unterschiedliche OFAT-Vorgehensweisen. In Kapitel 6 wurden alle Faktoren unter einem fixierten prozesssicheren Startparameter variiert und die auf die Zielgrößen bezogenen Extrema als optimierte Parameterkombination eingestellt. Die Vorteile dieser Vorgehensweise liegen in der detaillierten Betrachtung zum Prozessverhalten der einzelnen Faktoren auf die Zielgrößen, welche zum Prozessverständnis beitragen.

Für die Ableitung einer optimalen Parameterkombination ist die Einbeziehung von Wechselwirkungseffekten zwischen den Prozessstellgrößen vorteilhaft. Dies wurde unter Kapitel 8 bei der Optimierung von Fertigungstechnologien für die einzelnen Prozessgase berücksichtigt. Dabei kam es bei der Variation der Faktoren, welche einen höchst signifikanten Einfluss auf die Zielgrößen haben, zur Verwendung von Extrema als weitere Parametereinstellung, wodurch eine Annäherung an die optimale Parameterkombination erfolgte. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die Ableitung der optimalen Parameterkombination effizient, unter einem geringen Versuchsaufwand erfolgt.

Die erarbeiteten Fertigungstechnologien zum trockenfunkenerosiven Feinbohren bilden die Grundlage für weitere Untersuchungen, welche die industrielle Nutzung dieser Technologie ermöglicht. Der Einsatz der kostengünstigen Gase Stickstoff und Sauerstoff als Dielektrikum für die Schlicht- und Schruppbearbeitung von Hartmetallen und Hochleistungswerkstoffen, basierend auf Nickelbasislegierungen, sollte zukünftig weiter verfolgt werden. Ferner wird die Erarbeitung von Fertigungstechnologien weiterer industriell relevanter Keramiken als zielführend angesehen.

In Hinblick auf die Herstellung von Mikrobohrungen sollten die Elektrodendurchmesser weiter reduziert und die Verfahrensgrenzen hinsichtlich maximal zu erreichender Aspektverhältnisse untersucht werden. Darüber hinaus ist aufgrund des geringen erzielten relativen Elektrodenverschleißes ϑ die Erarbeitung einer Bearbeitungsstrategie zur Mikrobahnerosion mit gasförmigen Arbeitsmedien überzeugend. Des Weiteren wird die technologische Untersuchung von Mischgasen als zielführend angesehen, um die prozessbedingten Vorteile der einzelnen Gase in einem Dielektrikum zu nutzen.

11 Literaturverzeichnis

- ABB07 Abbas, N. M.; Solomon, D. G.; Bahari, M. F.: A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 2007, S. 1214 – 1228.
- APP98 Appel, S.: *Funkenerosive Bearbeitung von polykristallinem Diamant*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1998.
- ASA07 Asad, A. B. M. A.; Masaki, T.; Rahman, M.; Lim, H. S.; Wong, Y. S.: Tool-based micro-machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 192 - 193, 2007, S. 204 – 211.
- BAU14 Bauer, W.; Schlund, S.; Marrenbach, D.; Gunschar, O.: *Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potential für Deutschland*, Studie, BITKOM, Berlin, 2014.
- BIG05 Bigot, S.; Ivanov, A.; Popov, K.: A study of the micro EDM electrode wear. *Proceedings of 4M 2005: 1st International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, Elsevier (Oxford), 2005, S. 355 – 358.
- BLE03 Bleys, P.: *Electrical Discharge Milling: Technology And Tool Wear Compensation*. Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, 2003.
- BON09 Bonny, K.; De Baets, P.; Ost, W.; Perez, Y.; Vleugels, J.; Jiang, D.; Van der Biest, O.; Liu, W.; Lauwers, B.: Influence of secondary phases on the tribological response of electro-discharge machined zirconia-based composites against WC-Co cemented carbide. *Wear* 267. 2009, S. 2157 – 2166.
- CAO08 Cao, M. R.; Wang, Y. Q.; Yang S. C.; Yang S. Q.; Li W. H.: Effects of Non-Electrical Parameters on Material Removal Rate of High-Speed Small Hole EDM Drilling. *Advanced Materials Research*, Vol. 53 - 54, 2008, S. 403 – 407.
- DIV04 Diver, C.; Atkinson, J.; Helml, H. J.; Li, L.: Micro-EDM drilling of tapered holes for industrial applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 2004, S. 296 – 303.
- EKM09 Ekmekci, B.; Sayar, A.; Öpöz, T. T.; Erden, A.: Geometry and surface damage in micro electrical discharge machining of micro-holes. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19, 2009, S. 1 – 16.
- FAU93 Faulk, N.M.: *Electrical Discharge Machining of Advanced Ceramics*. NIST Special Publication (National Institute of Standards and Technology) SP 847 (1993), S. 525 – 534.
- FUH85 Fuhr, J.: *Experimentelle Untersuchung zum zeitlichen Verlauf des Funkendurchschlages in flüssigen Kohlenwasserstoffen*. Dissertation, TH Darmstadt, 1985.

- FUR00 Furudate, C.; Kunieda, M.: Study on Dry-WEDM. Proc. 2nd Int. Conf. MMSS, Krakow, 2000, S. 325 – 330.
- GAD88 Gadalla, A.M.; Petrofes, N.F.: Processing aspects of shaping advanced materials by electrical discharge machining. *Advanced Materials and Manufacturing Processes* 3,1988, S. 127 – 153.
- GAD91a Gadalla, A.M.; Bedi, H.S.: Machining of TiB₂ and its composites. *Materials and Manufacturing Processes* 6, 1991, S.125 – 137.
- GAD91b Gadalla, A.M.; Bozkurt, B.; Faulk, N.M.: Modeling of thermal spalling during electrical discharge machining of titanium diboride. *Journal of American Ceramic Society* 74, 1991, S.801 – 806.
- GAD98 Gadalla, A.M.: Thermal Spalling During Electro-Discharge Machining of Advanced Ceramics and Ceramic-Ceramic Composites. *Machining of Composite Materials Symposium 1992, ASM/TMS Materials Week, 1998, S.151 – 157.*
- GAR11 Garn, R.; Schubert, A.; Zeidler, H.: Analysis of the effect of vibrations on the micro-EDM process at the workpiece surface. *Precision engineering*, 35/2, 2011, S. 364 – 368.
- GHO01 Ghoreishi, M.; Atkinson, J.: Vibro-rotary electrode, a new technique in EDM drilling - Performance evaluation by statistical modelling and optimisation. *Proceedings of the 13th International Symposium for Electromachining (ISEM XIII), Vol. II, Bilbao, Spain, 2001, S. 633 – 648.*
- GHO02 Ghoreishi, M.; Atkinson, J.: A comparative experimental study of machining characteristics in vibratory, rotary and vibro-rotary electro-discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 120, 2002, S. 374 – 384.
- GFM15 GFMS Agie Charmilles SA: CUT 1000 CUT 1000 OilTech Brochure. URL: http://www.gfms.com/content/dam/gfac/proddb/edm/wire-cut/de/agiecharmilles-cut-1000-1000-oiltech_de.pdf: (2015, Zugriff: 10.08.15)
- HAB04 Habedank, G.: Neuartige Bearbeitungsverfahren zur Modifizierung senkerodierter Randschichten. Shaker Verlag, Magdeburg, 2004, S. 1.
- HAY15 Haynes, W. M.; Lind, D. R.; Bruno, T. J: *CRC Handbook of chemistry and physics*, 96. Auflage, CRC-Verlag, London, 2015. S. 15-46.
- HOR73 Horsten, H. J. A.; Heuvelman, C. J.; Veenstra, P. C.: Some Further Research on the Breakdown Mechanism in Electro-Discharge Machining. *Annals of the CIRP*, Vol. 22/1, 1973, S. 49 – 52.
- KAR01 Karden, A.: Funkenerosive Senkbearbeitung mit leistungssteigernden Elektrodenwerkstoffen und Arbeitsmedien. Shaker Verlag, Aachen, 2001, S. 11.

- KAO06 Kao, C.C.; Shih, A.: Sub-nanosecond monitoring of micro-hole electrical discharge machining pulses and modelling of discharge ringing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, 2006, pp. 1996 – 2008.
- KAO07 Kao, C. C.; Shih, A. J.: Form measurements of micro-holes. *Measurement Science and Technology*, Vol. 18/11, 2007, S. 3603 – 3611.
- KHA07 Khanra, Asit Kumar; Pathak, L. C ; Godkhindi, M. M.: Microanalysis of debris formed during electrical discharge machining (EDM). *Journal of Materials Science* 42, 2007, S. 872 – 877.
- KIM06 Kim, D. J.; Yi, S. M.; Lee, Y. S.; Chu, C. N.: Straight hole micro EDM with a cylindrical tool using a variable capacitance method accompanied by ultrasonic vibration. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16, 2006, S. 1092 – 1097.
- KLE07 Klein, B.: *Versuchsplanung – DoE: einföhrung in die Taguchi/Shainin-Methodik*. München, Oldenbourg, 2007.
- KLC02 Klocke, F.: *Theoretische Modelle zur Funkenerosion - Grundlagenuntersuchungen an elektrischen Entladungen unter flüssigen Dielektrika*. Abschlussbericht zum DFG-Forschungsprojekt KI 500/23-1, RWTH Aachen, 2002.
- KLC07 Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren Band 3 – Abtragen*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- KLC10 Klocke, F.; Dieckmann, J.; Garzón, M.; Klink, A.: Investigation on Dynamic Gas Bubble Formation by Using a High-Speed-Camera System. 16th International Symposium on Electromachining (ISEM XVI), Shanghai, 2010.
- KLC11 Klocke, F.; Dieckmann, J.; Garzón, M.; Klink, A.: Process force analysis on sinking-EDM electrodes for the precision manufacturing. *Production Engineering - Research and Development*, Jahrgang 5, 2011, S. 183 – 190.
- KLI08 Klitzing, A.: *Mikrosenkerosion auf konventionellen Erodiermaschinen*. *Berichte aus der Produktionstechnik*. Hrsg.: Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T.; Schuh, G.; Weck, M.; Brecher, C.; Schmitt, R.. Aachen: Shaker Verlag, 2008.
- KUN97 Kunieda, M. et al.: Electrical Discharge Machining in Gas. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 46, 1997, S. 143 – 146.
- KUN01 Kunieda, Masanori; Furudate, Chika: High Precision Finish Cutting by Dry WEDM. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 50, 2001, S. 121 – 124.
- KUN03 Kunieda, M.; Miyoshi, Y.; Takaya, T.; Nakajima, N.; Yu, Z. B.; Yoshida, M.: High Speed 3D Milling by Dry EDM, *Annals of the CIRP*, 52/1, 2003, S. 147 – 150.

- KUN04 Kunieda, M.; Takaya, T.; Nakano, S.: Improvement of Dry EDM Characteristics Using Piezoelectric Acuator, *Annals of the CIRP*, 53/1, 2004, S.183 – 186.
- KUN05 Kunieda, M.; Lauwers, B.; Rajurkar, K. P.; Schumacher, B. M.: Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 54, Issue 2, 2005, S. 64 – 87.
- KUN07 Kunieda, M.; Hayasaka, A.; Yang, X.D.; Sano, S.; Araie, I.: Study on Nano EDM using Capacity Coupled Pulse Generator. *Annals of the CIRP*, Vol. 56/1, 2007, S. 213 – 216.
- KÜP90 Küpfmüller, K.: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Springer, Berlin, 1990.
- LAU04 Lauwers, B.; Kruth, J.P.; Liu, W.; Eeraerts, W.; Schacht, B.; Bleys, P.: Investigation of Material Removal Mechanisms in EDM of composite Ceramic Materials. *Journal of Materials Processing Technology* 49, 2004, S. 347 – 352.
- LAU06 Lauwers, B.; Liu, W.; Eeraerts, W.: Influence of the Composition of WC-Based Cermets on the Manufacturability by Wire-EDM. *Journal of Manufacturing Processes* 8, 2006, S. 83 – 89.
- LAU08 Lauwers, B.; Brans, K.; Liu, W.; Vleugels, J.; Salehi, S.; Vanmeensel, K.: Influence of the type and grain size of the electro-conductive phase on the Wire-EDM performance of ZrO₂ ceramic composites. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 57, 2008, S.191 – 194.
- LU09 Lu, S., Dong, W.; D. Li, Y. Li: Numerical study and comparisons of gas tungsten arc properties between argon and nitrogen, 2009, S. 327 – 335.
- LAN15 Langmack, M.: Laserwendel- und funkenerosives Mikrobohren. Bericht aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E.: Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2015.
- LAZ44 Lazarenko, B. R.; Lazarenko, N. J.: Elektrische Erosion von Metallen. Gosenergoisdat, Moskau, 1944.
- LAZ50 Lazarenko, B. R.; Lazarenko, N. J.: A Method of Working Metals and other Electro-Conductive Materials and Means for Applying same. Patentschrift GB 637 793, 1946 (veröffentlicht 1950).
- LEE91 Lee, T.C.; Lau, W.S.: Some characteristics of electrical discharge machining of conductive ceramics. *Materials and Manufacturing Processes* 6, 1991, S.635 – 648.
- LIQ13 Liqing, L.; Yingjie, S.: Study of dry EDM with oxygen-mixed and cryogenic cooling Approaches, The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), 2013, S 344 – 350.

- LIQ06 Liqing, L.; u. A.: Experimental Research on Machining Performance of Electrode Material in Dry EDM, *Materials Science Forum*, 2006, S. 532 – 533
- LIU08 Liu, K.; u. A. Micro Electrical Discharge Machining of Si₃N₄-based Ceramic Componentes, Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium Leuven, 2008
- LIU09a Liu, K.; Lauwers, B.; Reynaerts, D.: Process capabilities of Micro-EDM and its applications. *International Journal of Advances Manufacturing Technology*, 170, 2009, S. 1 – 9.
- LIU09b Liu, K.; Reynaerts, D.; Lauwers, B.: Influence of the pulse shape on the EDM performance of Si₃N₄-TiN ceramic composite. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 58, 2009, S.217 – 220.
- LIU09c Liu, Y.H.; Ji, Renjie; Li, Quinyun; Yu, Lili; Li Xiaopeng: An experimental investigation for electric discharge milling of SiC ceramics with high electrical resistivity. *Journal of Alloys and Compounds* 472, 2009, S. 406 – 410.
- MAL10 Malek, O.; Vleugels, J.; Perez, Y.; De Baets, P.; Liu, J.; Van den Berghe, S.; Lauwers, B.: Electrical Discharge Machining of ZrO₂ toughened WC composites. *Materials Chemistry and Physics* 123, 2010, S. 114 – 120.
- MAL11 Malek, O.; Vleugels, J.; Vanmeensel, K.; Huang, S.; Liu, J.; Van den Berghe, S.; Datye, A.; Wu, K.; Lauwers, B.: Electrical discharge machining of B₄C-TiB₂ composites. *Journal of the European Ceramic Society* 31, 2011, S. 2023 – 2030.
- MAS89 Masuzawa, T.; Tsukamoto, J.; Fujino, M.: Drilling of Deep Microholes. *Annals of the CIRP*, Vol. 38, 1989, S. 195 – 198.
- MAS00 Masuzawa, T.: State of the Art of Micromachining. *Annals of the CIRP*, Vol. 49, 2000, S. 473 - 480.
- MAS01 Masuzawa, T.: Micro-EDM. *Proceedings of the 13th International Symposium for Electromachining (ISEM XIII)*, Vol. 1, Bilbao, Spain, 2001, S. 3 – 19.
- MAT12 Mattes, K-J.: *Schweißtechnik, Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*, 5. neu bearb. Auflage, Hanser, München, 2012.
- MCK14 N.N.: *Zukunftsperspektive deutscher Maschinenbau*. Hrsg. McKinsey & Company, Frankfurt, 2014.
- MEH09 Mehta, Shruti ; Rajurkar, Avadhoot ; Chauhan, Jignesh: A Review on Current Research Trends in Die-Sinking Electrical Discharge Machining of Conductive Ceramics. *International Journal of Recent Trends in Engineering* 1, 2009, S.100 – 104.

- MEN05 Menz, W.; Mohr, J.; Paul, O.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. 3. Auflage, Wileyvch Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, 2005.
- MIN97 Miniature Bearings Australia Pty. Ltd.: Technical Information, Materials. URL: <http://www.minibearings.com.au/technical/materials/si3n4/> (1997, Zugriff: 06.08.14).
- MOH02 Mohri, Naotake; Fukuzawa, Yasushi ; Tani, Takayuki ; Sata, Toshio: Some Considerations to Machining Characteristics of Insulating Ceramics –Towards Practical Use in Industry -. CIRP Annals –Manufacturing Technolo-gy 51, 2002, S.161 – 164.
- NEU07 Neumann, F.; Kunz, S.; Linnebach, E.: Mikrofunkenerosion - ein Verfahren des Werkzeug- und Formenbaus etabliert sich als Produktionsmittel in der Mikro-systemtechnik. Tagungsband Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) der Sonderforschungsbereiche (SFB) 440, 499, 516, 747, Karlsruhe, 2007, S. 249 – 256.
- NÖT01 Nöthe, T.: Funkenerosive Mikrobearbeitung von Stahl und Hartmetall durch Schneiden mit dünnen Drähten. Berichte aus der Produktionstechnik. Hrsg.: Eversheim, W.; Klocke, F.; König, W.; Pfeifer, T.; Weck, M., Aachen, Shaker Verlag, 2001.
- OEL14 Oelheld GmbH: Wissenswertes zur Senkerosion. Stuttgart. Firmenschrift. 2014.
- OZG05 Ozgedik, A.; Cogun, C.: An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 27, 2005, S. 488 – 500.
- PAN90 Panten, U.: Funkenerosive Bearbeitung von elektrisch leitfähigen Keramiken. Dissertation, RWTH Aachen, 1990.
- PAT09 Patel, K.M. ; Pandey, Pulak M. ; Rao, P. Venkateswara : Surface integrity and material removal mechanisms associated with the EDM of Al2O3 ceramic composite. International Journey of Refractory Metals and Hard Materials 27, 2009, S.892 – 899.
- PET88 Petrofes, N.F.; Gadalla, A.M.: Electric discharge machining of advanced ceramics. American Ceramic Society Bulletin 67 (1988) 6, S. 1048 – 1052.
- PHA07 Pham, D. T.; Ivanov, A.; Bigot, S.; Popov, K.; Dimov, S.: An investigation of tube and rod electrode wear in micro EDM drilling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33, 2007, S. 103 – 109.
- PIL07 Piltz, S.: Grundlagen und Prozessstrategien der Mikrofunkenerosion für die Bearbeitung von Rotationsbauteilen. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E.. Berlin: Fraunhofer IPK, 2007.

- PHA04 Pham, D. T.; Ivanov, A.; Bigot, S.; Popov, K.; Dimov, S.: An investigation of tube and rod electrode wear in micro EDM drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33, 2007, S. 103 – 109.
- REE08 Rees, A.; Brousseau, E.; Dimov, S.; Gruber, H.; Paganetti, I.: Wire electro discharge grinding: Surface finish optimization. *Multi Material Micro Manufacturing*, Cardiff University, 2008.
- ROT13 Roth, R.; Kuster, F.; Wegener, K.: Influence of oxidizing gas on the stability of dry electrical discharge machining process. *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*, 2013, S. 338 – 348.
- ROT14 Roth, R.: *Trockenen Funkenerosion*. Dissertation, ETH-Zürich, Zürich, 2014.
- RÖH01 Röhrs, K.; Michailov, V.; Wohlfahrt, H.: Einfluss von Beimengung zum Schutzgas beim Lichtbogenschweißen von Aluminiumwerkstoffen, *Institut für Schweißtechnik*, Braunschweig, 2001.
- RÖH12 Röhner, M.: Einsatzverhalten von PKD und Bor-dotiertem CVD-Diamant bei der Mikrofunkenerosion. *Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin*. Hrsg.: Uhlmann, E.. Berlin: Fraunhofer IPK, 2012.
- SAV11 Savas, A.; Ceyhan, V.: Finite element analysis of GTAW arc under different shielding gases, *Computational Material Science*, 51, 2011, S. 35 – 71.
- SCH93 Schönbeck, J.: *Analyse des Drahterosionsprozesses*, Hanser Verlag, Berlin, 1993, S. 19.
- SCH02 Schulze, H.-P.; Wollenberg, G.; Läuter, M.; Storr, M.; Rehbein, W.: Measurement Equipment for Investigation of the Influence of Viscosity of Dielectric Working Fluids on Spark Erosion. *Proceedings of the 14th International Conference on Dielectric Liquids*, Graz, Austria, 2002, S. 301 – 304.
- SCH04 Schulze, H.-P.; Wollenberg, G.; Herms, R.; Mecke, K.: Gas bubble morphology in small gaps at spark erosion. *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Boulder, USA, 2004, S. 534 – 535.
- SCH05 Schön, H.: *Handbuch der reinsten Gase*, Springer, Berlin, 2005.
- SKR10 Skrabalak, G.; Kozak, J.; Zybura, M.: Performance Characteristics of Dry EDM. *Proceedings I 16th International Symposium on Electromachining*, April 19-23, 2010, Shanghai, China, S. 59 – 64.
- SIE02 Aurich, S.; Brandt, C.; Frank, W.; Garn, R.; Hörnig, J.: *Elektrodenführung für Erodiermaschinen sowie Verfahren zum Erodieren von Werkstücken*. Patentanmeldung WO 02/058875 A1 der Siemens Aktiengesellschaft, 2002.

- SOU09 Sourabh, K.; Choudhury, S.K.: Experimental investigation and empirical modeling of the dry electric discharge machining process. *Journal of Machine Tool & Manufacture* 49, 2009, S. 297 – 308.
- SPU87 Spur, G.; Stöferle, T.: *Handbuch der Fertigungstechnik, Band 4/1*, Hanser Verlag, München, 1987, S.69 – 70.
- STA15a Statista: Das Statistik-Portal. 1. April 2015, 15:00. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/297780/umfrage/basis-und-schluesselformen-wichtigste-impulsgeber-fuer-deutschland/>.
- STA15b Statista: Das Statistik-Portal. 8. April 2015, 15:30. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/163232/umfrage/weltweiter-umsatz-mit-lasern-seit-2006/>.
- TAO07 Tao, J.; Shih, A.J.; Ni, J.: Near-Dry EDM Milling of Mirror-Like Surface Finish. *International Journal of Electrical Machining*, No. 13, 2008, S. 29 – 33.
- TAO08 Tao, J.; Shih, A.J.; Ni, J.: Near-Dry EDM Milling of Mirror-Like Surface Finish. *International Journal of Electrical Machining*, No. 13, 2008, pp. 29 – 33.
- TEL07 Telle, R.: *Keramik, 7. Auflage*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- THO02 Thomaidis, D.: *Wie heiß ist das Plasma?* Präsentation, EDM - Fachtagung, Aachen, 2002.
- THO07 Thomaidis, D.: *Pulveradditierte Dielektrika in der Mikrosenkrosion*. Shaker Verlag, RWTH-Aachen, Aachen, 2007.
- THU08 Thurner, S.: *Erzeugung und Anwendung modulierter Prozessgasströme beim Schutzgasschweißen*, Institut für Fertigungstechnik und Schweißtechnik, Chemnitz, 2008.
- TRU00 Trueman, C.S.; Huddleston, J.: Material removal by spalling during EDM of ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* 20, 2000; S. 1629 – 1635.
- TSA01 Tsai, Y. Y.; Masuzawa, T; Fujino, M.: Investigations on Electrode Wear in Micro-EDM. *Proceedings of the 13th International Symposium for Electromachining (ISEM XIII)*, Vol. II, Bilbao, Spain, 2001, S. 719 – 726.
- TSA04 Tsai, Y. Y.; Masuzawa, T.: An index to evaluate the wear resistance of the electrode in micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 2004, S. 304 – 309.
- UHL01 Uhlmann, E.; Piltz, S; Doll, U.: Funkenerosion in der Mikrotechnik - Einsatzgebiete und Verfahrensgrenzen. *wt Werkstattstechnik online* 91, H. 12, 2001, S. 733 – 737.

- UHL03 Uhlmann, E.; Klocke, F.; Neyer, A.; Doll, U.; Lung, D.; Neumann, F.; Piltz, S.; Teepe, M.: Potenziale der Funkenerosion für Anwendungen in der Mikrotechnik. Tagungsband zum Abschlusskolloquium des DFG-Schwerpunktprogramms 1012 „Mikromechanische Produktionstechnik“, Shaker, Aachen, 2003, S. 89 – 114.
- UHL05 Uhlmann, E.; Piltz, S.; Doll, U.: Machining of micro/miniature dies and moulds by electrical discharge machining - Recent development. *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 2005, S. 488 – 493.
- UHL11 Uhlmann, E.; Langmack, M.; Garn, R.; Oberschmidt, D.; Fecher, J.; Rosiwal, S.M.; Singer, R.F.: Using diamond coated tool-electrodes for drilling micro holes with EDM. *Proceedings of the 11th euspen International Conference*, Vol. 1, Como, 2011.
- UHL12 Uhlmann, E.; Schimmelpfennig, T.-M.; Langmack, M.: *Keramische Werkstoffe trocken erodieren*, Mikroproduktion MIKROvent-Verlag, Mainburg, 2012, S. 23 – 37.
- VAS96 Vaseekaran, S.; Brown, C.A.: Single discharge, spark erosion in TiB₂ and zinc part I: Experimental. *Journal of Materials Processing Technology* 58, 1996, S.70 – 78.
- VER03 Verband der Keramischen Industrie e.V.: *Brevier Technische Keramik*, 2003
URL: http://www.keramverband.de/brevier_dt/brevier.htm (Zugriff: 05.08.2014)
- WAS92 Waßenhofer, K.: *Bahnerosion mit rotierender Stiftelektrode, Prozessanalyse und Verfahrensauslegung*, RWTH-Aachen, Aachen, 1992.
- WON95 Wong, Y. S.; Lim, L. C.; Lee, L. C.: Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 48. 1995, S. 299 – 305.
- YEO04 Yeo, S. H.; Murali, M.; Cheah, H. T.: Magnetic field assisted micro electrodischarge machining. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14, 2004, S. 1526 – 1529.
- YU02 Yu, Z.; Rajurkar K. P.; Shen H.: High Aspect Ratio and Complex Shaped Blind Micro Holes by Micro EDM. *Annals of the CIRP*, Vol. 51, 2002, S. 359 – 362.
- YU03 Yu, Z.; Rajurkar K. P.; Narasimhan J.: Effect of Machining Parameters on Machining Performance of Micro EDM and Surface Integrity. *Proceedings of ASPE 18th Annual Meeting*, Portland, USA, 2003.
- YU04 Yu, ZhanBo; Takahashi, Jun; Kunieda, Masanori: Dry Electrical Discharge Machining of cemented Carbide. *Journal of Materials Processing Technology* 149, 2004, S.353 – 357.

- ZÄH10 Zähr, J.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung des Lichtbogens und des Schweißbads beim Schutzgasschweißen durch die Schutzgaseigenschaften und die Schutzgaszusammensetzung, Abschlussbericht, Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik, Dresden, 2010.
- ZOL55 Zolotych, B. N.: Physikalische Grundlagen der Elektrofunkensbearbeitung von Metallen. VEB Verlag Technik, Berlin, 1955.
- ZOL71 Zolotych, B. N.: Theorie zum Phänomen der funkenerosiven Bearbeitung. Fertigung 6, 1971, S. 185 – 191.

Normen und Richtlinien

- DIN439 DIN EN 439, Schutzgaszusätze – Schutzgase zum Lichtbogenschweißen und Schneiden. Beuth, Berlin, 1995.
- DIN8590 Fertigungsverfahren Abtragen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth, Berlin, 2003.
- DIN12212 DIN V ENV 12212, Advanced technical ceramics - Unified method for classification, 1995.
- VDI3400 Elektroerosive Bearbeitung - Begriffe, Verfahren, Anwendung. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf, 1975.
- VDI3402 Elektroerosive Bearbeitung - Definitionen und Terminologie. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf, 1976.

Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin

Wissensbasierte Diagnose technischer Systeme mit konnektionistischen Modellen
Hartwig Weber. 201 Seiten, 46 Abb., 7 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4496-6

Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten industrieller Qualitätstechniken im Dienstleistungsbereich
Alexander Gogoll. 173 Seiten, 71 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4498-2

Perforierschneiden mit Nd:YAG-Festkörper hoher Impulsenergien
Jürgen Betz. 167 Seiten, 97 Abb., 5 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4499-0

Analyse der Werkstückhaltekräfte am Dreibackenfutter im Rahmen einer Maschinen- und Prozeßüberwachung
Rolf Thiel. 130 Seiten, 69 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4495-8

Gestaltung von Entscheidungsstrukturen zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen
Florian Golm. 173 Seiten, 83 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4497-4

Fehlersensitive Produktgestaltung in integrierten Systemarchitekturen
Michael Stephan. 164 Seiten, 58 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4512-1

Wirtschaftliche Einführung der rechnerintegrierten Produktion in kleinen Unternehmen mit komplexer Produktionsstruktur
Wolfgang Bilger. 174 Seiten, 42 Abb., 1 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4511-3

Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen
Claudia Hentschel. 160 Seiten, 54 Abb., 16 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4513-X

Entwicklung eines Modells für eine rechnerunterstützte Qualitätswissensbasis
Jörg-Peter Brauer. 150 Seiten, 40 Abb., 2 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4520-2

Kühlschmierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe
Thomas Brücher. 330 Seiten, 124 Abb., 17 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4523-7

Einführen und Umsetzen von Total Quality Management
Christian Malorny. 310 Seiten, 68 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4524-5

Qualitätsmanagement für die Einführung bestandsarmer Produktionskonzepte
Torsten Walter. 143 Seiten, 37 Abb., 13 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4525-3

Virtuelle Tonmodellierung zur skizzierenden Formgestaltung im Industriedesign
Jörg Lüddemann. 166 Seiten, 76 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4519-9

Konzept zur Steigerung der Effektivität von Produktionsanlagen
Mehdi Al-Radhi, 165 Seiten, 45 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4528-8

Produktionsstrukturierung auf der Basis strategischer Eigenfertigungskomponenten
Olaf Sauer, 144 Seiten, 62 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4532-6

Auswahl und Konditionierung von Werkzeugen für das Außenrund-Profilschleifen technischer Keramiken
Ingo Liebe, 170 Seiten, 79 Abb., 16 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4509-1

Automatisiertes Nähen von Zuschnitten ungleicher Kontur

Thomas Gottschalk, 140 Seiten, 70 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4531-8

Featureintegrierte Fertigungsplanung

Armin Ulbrich, 209 Seiten, 93 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4529-6

Aufgabenbezogene Anordnung und Programmierung von Laserscannern für die 2D-Geometrieinspektion

Heinrich Schuler, 148 Seiten, 81 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4530-X

Arbeitsgestaltung zur Fehlervermeidung bei der SMD-Elektronikmontage

Stephan Krüger, 173 Seiten, 51 Abb., 22 Tab. 1996. Kartoniert.
ISBN 3-8167-4540-7

Modell der zyklischen Prozeßrestrukturierung als Teil des Total Quality Managements

Timo Füermann, 176 Seiten, 79 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4545-8

Analyse der Rentabilität von Qualitätstechniken

Philipp Theden, 158 Seiten, 50 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4544-X

Thermisch beschichtete CFK-Wellen im Maschinenbau

Andreas Kranz, 148 Seiten, 76 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4547-4

Integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz mit Multimedia- und Breitbandkommunikationstechnik

Thomas Kieseewetter, 169 Seiten, 60 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4548-2

Verbesserung der Planung von Produktionsprozessen im Werkzeugbau durch Qualitätsplanung mittels Quality Function Deployment (QFD)

Manfred Zoschke, 140 Seiten, 14 Abb., 7 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4546-6

Flexibel anpaßbare Softwaresysteme zur rechnerunterstützten Fertigungssteuerung

Harald Krause, 148 Seiten, 89 Abb., 27 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4551-2

Anpassung des Qualitätswesens bei Total Quality Management

Frank Krämer, 262 Seiten, 75 Abb., 40 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4558-X

Integration von Qualitäts- und Umweltmanagementsystemen und ihre betriebliche Umsetzung

Detlev Butterbrodt, 240 Seiten, 60 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4559-8

Die Entwicklung des deutschen Werkzeugmaschinenbaus in der Zeit von 1930 bis 1960

René Haak, 225 Seiten, 30 Abb., 9 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4556-3

Fertigungsintegrierte Instandhaltung

Ralf Jagodejkin, 195 Seiten, 55 Abb., 21 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4557-1

Analyse der Prozeßkette Pulverspritzgießen

Peter Merz, 165 Seiten, 78 Abbildungen. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4629-2

Bearbeitung von metallischen Gasturbinenwerkstoffen durch Tiefschleifen und Drahterodieren

Achim Meier, 220 Seiten, 80 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4627-6

Drehzahlsynchronisation der Wirkpartner beim Abrichten und Schleifen

Holger Eichhorn, 200 Seiten, 86 Abb., 13 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4630-6

Läppen von einkristallinem Silicium

Hendrik Engel, 200 Seiten, 85 Abbildungen, 13 Tabellen. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4631-4

Verschleißverhalten von polykristallinem Diamant bei instationärer Beanspruchung

Uwe Lachmund, 210 Seiten, 100 Abb., 15 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4632-2

Feature-basierte Meßplanung für Koordinatenmeßmaschinen

Michael Ciesla, 162 Seiten, 79 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4613-6

Informationssystem für heterogen verteilte Qualitätsinformationen

Volker Kleinhans, 150 Seiten, 67 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4612-8

Untersuchung und Interpretation der beim Schleifen der Nickelbasislegierung IN 738 LC induzierten Gefügeänderungen in der Randzone

Pengxi Li, 147 Seiten, 135 Abb., 19 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4634-9

Thermische Stabilisierung von Werkzeugmaschinen-Spindelkästen durch Carbonfaserverbundkunststoffe

Matthias Liebetau, 200 Seiten, 122 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4638-1

Kooperationsentwicklung mit Zulieferern in der Automobilindustrie Indonesien

Ida-Bagus Kesawa Narayana, 214 Seiten, 95 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4642-X

Flexible On-line-Prozeßoptimierung mit integrierten adaptiven Modellen

Martin Bauer, 160 Seiten, 55 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4622-5

Einsatz eines Mobilrobotersystems in der Endmontage des Schiffsstahlkörperbaus

Henning Müller, 170 Seiten, 62 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4552-0

Prozeßmodell für die Kraftübertragung durch neue Wirkflächen zur Entwicklung geometrietoleranter Demontagewerkzeuge

Martin Wagner, 170 Seiten, 100 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5130-X

Honen keramischer Werkstoffe

Uwe-Peter Weigmann, 250 Seiten, 103 Abb., 15 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4639-X

Modellierung und Vermessung linearer Gelenkbewegungen bei Industrierobotern

Michael Grethlein, 154 Seiten, 56 Abb., 5 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4644-6

Globalisierungspotentiale im Maschinenbau

Jens Nackmayr, 174 Seiten, 68 Abb., 5 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5132-6

Entwicklung und praktische Erprobung eines Kennzahlensystems für das Total Quality Management

Olaf Wolter, 190 Seiten, 52 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5136-9

Prozeßorientierte Techniken zur systematischen Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes

Ulrich Tammler, 185 Seiten, 72 Abb., 25 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5134-2

Eine Methode zur automatischen Strukturinterpretation in digitalisierten technischen Zeichnungen

Nailja Luth, 150 Seiten, 76 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4646-2

Ganzheitliches Modell zur Umsetzung von Total Quality Management

Philipp Radtke, 180 Seiten, 50 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5148-2

Ein methodischer Ansatz zum Strukturvergleich technischer Objekte

Matthias Müller, 245 Seiten, 54 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5160-1

Prozeßparameter beim Scherschneiden von Karosserieblechteilen

Andreas Pöllmann, 154 Seiten, 80 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5150-4

Biologisch basierte Verfahren zur Objekterkennung und Texturanalyse

Javier Ruiz-del-Solar, 145 Seiten, 98 Abb., 8 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4647-0

Methodisches Konstruieren als Mittel zur systematischen Gestaltung von Dienstleistungen

Wolfgang Schwarz, 130 Seiten, 80 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5140-7

Techniken zur Entwicklung von Führungsqualität im Total Quality Management

Claudia Kostka, 200 Seiten, 30 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5165-2

Metamodellierung als Instrument der Verknüpfung von Unternehmensmodellen

Wolfgang Müller, 170 Seiten, 61 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5164-4

Entwicklung und Realisierung einer Methode für die flexible Auswertung von Profillinien

Lorenz Voit, 145 Seiten, 75 Abb., 20 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5174-1

Gewichts- und Lärminderung von Laufrädern für Schienenfahrzeuge durch Einsatz von Faserverbundwerkstoffen

Frank Warmuth, 130 Seiten, 110 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5173-3

Prozeß-Benchmarking – Methode zum branchenunabhängigen Vergleich von Prozessen

Gunnar Siebert, 130 Seiten, 45 Abb., 21 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5182-2

Modellierungsvorgehen zur Planung von Geschäftsprozessen

Martin Schwermer, 160 Seiten, 54 Abb., 6 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5163-6

Bewertung und Verkürzung von Anlaufprozessen für Betriebsmittel

Ronald Fritsche, 135 Seiten, 71 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5169-5

Analyse des Drehens duktiler Werkstoffe mit der Finite-Elemente-Methode

Steffen Gerloff, 272 Seiten, 116 Abb., 7 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5161-X

Prozeßorientierte Auswahl von PPS-Systemen

Georg Neubauer, 146 Seiten, 85 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5184-9

Featurebasiertes Gestalten von Produkten mit Freiformgeometrien

Christiane Stiel, 153 Seiten, 50 Abb., 1 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5170-9

Entwicklung und Verifizierung eines Prozeßmodells für das Einzelpunktlöten in der Elektronikfertigung

Jörg Niemeier, 120 Seiten, 75 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5177-6

Beschleunigte Evolutionsstrategie zur Optimierung von Fertigungsprozessen

Jürgen H. Bremer, 125 Seiten, 38 Abb., 23 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5183-0

Konfigurierbares, multimediales Fernbetreuungssystem für rechnergesteuerte Fertigungseinrichtungen

Zaharya Menevidis, 155 Seiten, 51 Abb., 9 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5171-7

Funkenerosive Bearbeitung von polykristallinem Diamant

Steffen Appel, 150 Seiten, 62 Abb., 10 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5162-8

Analyse und Simulation des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen
Stefan Liebelt, 180 Seiten, 70 Abb., 12 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5190-3

Flexible Spannbacken für die Drehbearbeitung
Udo Bahrke, 168 Seiten, 120 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5193-8

Controlling des Fabrikbetriebes auf der Basis des Total Quality Managements (TQM)
Dirk Wilmes, 195 Seiten, 51 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5194-6

Ein Modell zur Reduzierung der Variantenvielfalt in Produktionsunternehmen
Sven-Norman Gembrys, 120 Seiten, 48 Abb.. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5199-7

Konzept eines Modells zur Produktentwicklung
Hanno Weber, 160 Seiten, 85 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5205-5

**Entwicklung einer handlungsorientierten Interaktionsmethode zur Benutzung
produktionstechnischer Datenbanken**
Regine Gernert, 168 Seiten, 40 Abb., 15 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5213-6

Modell zur Gestaltung und Auswahl von CAQ-Lösungen
Thomas Konert, 172 Seiten, 68 Abb., 5 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5207-1

Globales Produktdatenmanagement zur Verbesserung der Produktentwicklung
Matthias Doblies, 139 Seiten, 49 Abb., 21 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5224-1

Designintegrierte Produktplanung und Produktkonzeption
Timm Kehler, 158 Seiten, 78 Abb.. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5237-3

Verkürzung der Produktentwicklungszeit durch Parallelverarbeitung
Haygazun Hayka, 175 Seiten, 46 Abb., 13 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5228-4

**Analyse der Schnitt- und Kerbgeometrie sowie des Strahls beim
Abrasive Wasserstrahlschneiden**
Bernhard Axmann, 199 Seiten, 100 Abb., 20 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5236-5

Anwendung neuronaler Netze zur Werkzeugverschleißerkennung beim Fräsen
Edgar Fries, 200 Seiten, 106 Abb., 14 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5244-6

**Konzept zur lebenszyklusorientierten Verbesserung der Effektivität von
Produktionseinrichtungen**
Ulf Perlewitz, 162 Seiten, 75 Abb., 6 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5260-8

Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken
Jörg Krüger, 170 Seiten, 101 Abb., 21 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5268-3

Beitrag zur Entwicklung eines modularen TQM-Modells für das Krankenhauswesen
Bettina Hahne, 180 Seiten, 50 Abb., 5 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5290-X

Steuerungsintegriertes Prozeßüberwachungssystem für Drehmaschinen
Ireneus Suwalski, 167 Seiten, 106 Abb., 13 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5286-1

Montagesystemplanung und -steuerung für die variantenreiche Serienmontage
Kuo-Wen Chang, 148 Seiten, 59 Abb. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5294-2

Werkstückspannsysteme aus faserverstärkten Kunststoffen für die Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung

Uwe Mette, 227 Seiten, 106 Abb., 27 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5271-3

Bildanalysesystem zur robusten Erkennung von Kennzeichen an Fahrzeugen

Lutz Lohmann, 184 Seiten, 81 Abb., 18 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5534-8

Planung und marktorientierter Betrieb von Demontagefabriken

Holger Perlewitz, 180 Seiten, 72 Abb., 53 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5538-0

Simulation von Produktentwicklungsprozessen

Hans-Christoph Raupach, 150 Seiten, 60 Abb., 4 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5544-5

Induktive Wegsensoren zur Überwachung und Regelung des Blecheinzugs beim Tiefziehen

Ute Forstmann, 110 Seiten, 59 Abb., 2 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5547-X

Konstruktive Berechnungsmodelle auf Basis Neuronaler Netze

Alexander Carl, 135 Seiten, 53 Abb., 2 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5568-2

Konzeption eines webbasierten Beratungs-Unterstützungs-Systems am Fallbeispiel einer PDM-Systemauswahl

Toralf Kahlert, 140 Seiten, 50 Abb., 4 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5569-0

Ein Ansatz zum Konstruieren mit Lösungsräumen

Petrik Ziebel, 155 Seiten, 44 Abb., 6 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5577-1

Rapid Styling Validation - Berechnung und Simulation in der Konzeptphase der Produktentwicklung

Yasmina Bock, 150 Seiten, 57 Abb., 5 Tab. 2000. Kartonierte. ISBN 3-8167-5592-5

Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik

Thomas Ardel, 200 Seiten, 102 Abb., 19 Tab. 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5609-3

Beitrag zum Greifen von Textilien

Jörg Stephan, 140 Seiten, 100 Abb., 20 Tab. 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5622-0

Integrierte Unternehmensplanung auf der Basis von Unternehmensmodellen

Roland Jochem, 170 Seiten, 77 Abb. 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5623-9

Wege zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen

Katrin Müller, 177 Seiten, 45 Abb., 46 Tab. 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5884-3

Business-Exzellenz als qualitätsorientierter Entwicklungsansatz für Gründungsaktivitäten

Gunter Busch. 199 Seiten, 46 Abb., 4 Tab., 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-6045-7

Nutzung von Felddaten in der qualitätsgetriebenen Produktentwicklung und im Service

Andreas Edler. 131 Seiten, 64 Abb., 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5902-5

Package-Features für die Kommunikation in den frühen Phasen der Automobilentwicklung

Karsten Gessner. 154 Seiten, 39 Abb., 6 Tab., 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5636-0

System zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Werkzeugmaschinen

Michael Ising, 200 Seiten, 101 Abb., 5 Tab. 2001. Kartonierte. ISBN 3-8167-5890-8

Verteilte Simulation des Materialversorgungsprozesses in Produktionsverbänden
Dirk Krützfeld, 141 Seiten, 78 Abb., 13 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6035-X

Integration eines visuellen Lageregelungssystems für sechs Freiheitsgrade in Industrieroboter
Yong-Uk Kwon, 161 Seiten, 63 Abb., 9 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6044-9

Magnetische Flüssigkeiten als Schmierstoff in hydrodynamischen Gleitlagern
Reiner Patzwald, 176 Seiten, 148 Abb., 27 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5892-4

Beitrag zum flexiblen Greifen in der Demontage
Alexander Stenzel, 129 Seiten, 66 Abb., 6 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5885-1

Strategische Unternehmensprozessgestaltung mit der Methode des Target Processing
Florian Weymar. 170 Seiten, 59 Abb. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5898-3

Beitrag zur Innovationsentwicklung in indonesischen Unternehmen durch kompetenzorientierte Netzwerkbildung
Agung Budi Utomo Halim. 206 Seiten, 73 Abb., 53 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6065-1

Fehlerbeseitigungsmanagement unter Berücksichtigung der Plattformstrategie am Beispiel der Automobilindustrie
Daniel Schukraft. 137 Seiten, 87 Abb. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6079-1

Auslegung magnetumgeformter Verbindungen durch Simulation
Stefan Mehnert. 141 Seiten, 118 Abb., 17 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6086-4

Statistische Prozessregelung bei administrativen Prozessen im Rahmen eines ganzheitlichen Prozesscontrollings
Thomas Gerboth. 123 Seiten, 46 Abb., 12 Tab., 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6080-5

Sichere synchrone Telekooperation zur Optimierung der verteilten Produktentstehung
Ralf Schultz. 150 Seiten, 61 Abb., 4 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6088-0

Verbesserte Anpassungsfähigkeit des Änderungsmanagements durch komplementäre Selbstorganisation
Ralf Brunken. 134 Seiten, 52 Abb., 2 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6144-5

Durchlaufzeitreduzierung durch Harmonisierung von Belegungszeiten und Einführung flexibler Prozeßteams
Reiner Friedland. 170 Seiten, 47 Abb., 13 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6139-9

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch eine Life Cycle Unit
Waldemar Grudzien. 170 Seiten, 75 Abb., 33 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6174-7

Beitrag zum Variantenmanagement und zur Prozessoptimierung im Wagenkastenbau von Schienenfahrzeugen
Holger Schmidt. 170 Seiten, 84 Abb., 10 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6178-X

Modellierung von Layout und Steuerungsregeln für die Materialfluss-Simulation
Markus Rabe. 222 Seiten, 135 Abb. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6262-X

CVD-Diamant als Schneidstoff
Marcus Brücher. 187 Seiten, 87 Abb., 18 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6280-8

Berechnungsmodell zur Ermittlung von Spannkraften bei Backenfuttern
Pingfa Feng. 213 Seiten, 203 Abb., 17 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6371-5

Beitrag zur Entwicklung modularer Demontagewerkzeuge
Uwe Rebařka. 138 Seiten, 78 Abb., 28 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6381-2

Beitrag zur voxelbasierten Simulation des fünffachsigen NC-Fräsens
Zengxuan Hou. 160 Seiten, 80 Abb., 3 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6401-0

Aufbau hierarchiearmer Produktionsnetzwerke – Technologiestrategische Option und organisatorische Gestaltungsaufgabe
Carsten S. Schröder, 210 Seiten, 59 Abb., 1 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6398-7

Sprache zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen
Roland Heimann, 158 Seiten, 55 Abb., 6 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6456-8

Beitrag zur dynamischen Prozessplanung und Generierung von Steuerungssequenzen für flexible Demontagesysteme
Hyung-Ju Kim. 164 Seiten, 75 Abb., 19 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6559-9

Öko-Effizienz durch Nutzenverkauf am Beispiel der Automobilindustrie
Gitta Vischer. 193 Seiten, 62 Abb., 42 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6561-0

Applications of Subdivision Techniques in Product Development
Nele Gross. 136 Seiten, 51 Abb. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6576-9

Werkzeuge zum impuls-magnetischen Warmfügen von Profilen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen
Robert Hahn. 209 Seiten, 95 Abb., 18 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6642-0

Ultraschallunterstütztes Quer-Seiten-Schleifen
Nikolai-Alexander Daus. 145 Seiten, 78 Abb., 5 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6657-9

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch Anpassen von Mobiltelefonen
Bahadır Basdere. 208 Seiten, 77 Abb., 26 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6662-5

Informationstechnische Integration hybrider Demontagesysteme
Thomas Keil. 183 Seiten, 79 Abb., 15 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6688-9

Soft Data Fusion for Computer Vision
Aureli Soria-Frisch. 242 Seiten, 118 Abb., 7 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6689-7

Trennende Schutzeinrichtungen für Werkzeugmaschinen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung
Jörg Bold. 220 Seiten, 99 Abb., 39 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6697-8

Auslegung dünner Hartstoffschichten für Zerspanwerkzeuge
Karsten Klein. 172 Seiten, 88 Abb., 17 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6700-1

Methode zur Komplexitätsreduzierung der Auftragssteuerung in der Elektronikmontage
Dietrich Fischer. 202 Seiten, 97 Abb., 6 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6729-X

Sicherheitszentrierte Architektur für Internet-basierte Dienste im Maschinen- und Anlagenbau
Ralf Berger. 120 Seiten, 70 Abb., 16 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6777-X

Methodische Entwicklung von modularen IT-Dienstleistungen

Klaus Herbst. 219 Seiten, 63 Abb. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6778-8

Flexible Integration von Rapid Prototyping Prozessketten in die Produktentwicklung

Stefan Dreher. 139 Seiten, 54 Abb., 10 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6843-1

Risikominimierung bei der Beschaffung investiver Dienstleistungen durch den Einsatz von Methoden des Qualitätsmanagements

Marc Bockschecker. 195 Seiten, 36 Abb., 6 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6900-4

Verfahren zum Einzelpunktlöten von elektrischen Anschlusskontakten mit getrennter Erwärmung von Lötstelle und Lot

Andreas Frenzke. 140 Seiten, 69 Abb., 17 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6919-5

Adaptive Modellierung und Simulation von Produktentwicklungsprozessen

Johannes Voigtsberger. 174 Seiten, 58 Abb. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6929-2

Konditionieren von Diamantschleifscheiben

Frank Sroka. 229 Seiten, 111 Abb., 7 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6937-3

Zustandsorientierte Instandhaltung von Standardkomponenten mit Life Cycle Units

Alexander Buchholz. 200 Seiten, 99 Abb., 9 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6938-1

Beitrag zur Gestaltung horizontaler Innovationskooperationen in Klein- und Mittelbetrieben am Beispiel Schienengüterverkehr

Ulrich Kroß. 166 Seiten, 56 Abb., 11 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6962-4

Verfahren und Systeme zur Demontage komplexer technischer Gebrauchsgüter

Jens-Peter Härtwig. 242 Seiten, 108 Abb., 19 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6963-2

Neue Einsatzmöglichkeiten von Ferrofluiden in technischen Systemen mit relativ zueinander bewegten Komponenten

Nayim Bayat. 175 Seiten, 113 Abb., 19 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7014-2

Wissensbilanzen für mittelständische Organisationen

Kay Alwert. 181 Seiten, 65 Abb., 25 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7033-9

Entwicklung eines lernfähigen Bildverarbeitungssystems unter Einsatz von Verfahren des Soft Computing

Mario Köppen. 158 Seiten, 56 Abb., 7 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7056-8

Hochleistungsfräsen von Superlegierungen

Eric Wiemann. 239 Seiten, 124 Abb., 34 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7082-7

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität durch Anpassungsprogrammplanung

Carsten Franke. 220 Seiten, 82 Abb., 34 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7095-9

Beitrag zur simulationsgestützten Planung von Demontagefabriken für Elektro- und Elektronikaltgeräte

Markus Ciupek. 179 Seiten, 77 Abb., 26 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7112-2

Management von Ingenieurkompetenzen im Spannungsfeld beruflicher Arbeitsteilung

Matthias Patrick Meyer. 180 Seiten, 31 Abb., 7 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7127-0

Approach of Integrated Order Scheduling and Flexible Resource Planning for Mass Customization

Ingo Lümke. 193 Seiten, 38 Abb., 10 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7223-4

Entwicklung von Hartmetallwerkzeugen für die Mikrozerspannung mit definierter Schneide

Kai Schauer. 178 Seiten, 107 Abb., 15 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7245-5

Informationssystemische Prozessorganisation mit sozioorientierter Transformation

Dieter Schacher. 163 Seiten, 65 Abb. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7285-9

Eigenschaften und Einsatzverhalten CVD-diamantbeschichteter Hartmetallwerkzeuge

Rouven Kott. 166 Seiten, 84 Abb., 7 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7323-8

Grundlagen und Prozessstrategien der Mikrofunktenerosion für die Bearbeitung von Rotationsbauteilen

Sascha Piltz. 266 Seiten, 139 Abb., 27 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7345-0

Verfahrensgrundlagen und Technologie des Hubschleifens mit viskosen Schleifmedien

Hubert Szulczynski. 175 Seiten, 87 Abb., 13 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7379-5

Modellierung und Analyse verteilter Entwicklungsprozesse für mechatronische Systeme

Chris Biantoro. 174 Seiten, 102 Abb. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7406-8

Beitrag zum Vereinzeln flächiger biegeschlaffer Bauteile

Frank Szimmat. 177 Seiten, 106 Abb., 19 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7424-2

Kompetenzabhängiges Simulationsverfahren zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen

Matthias Strebler. 132 Seiten, 33 Abb., 1 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7432-7

Integriertes Benchmarking für kleine und mittlere Unternehmen

Holger Kohl. 166 Seiten, 41 Abb., 19 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7439-6

Informationsmanagement zur Planung und Verfolgung von Produktlebenszyklen

Holger Jungk. 147 Seiten, 72 Abb., 5 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7461-7

Beitrag zum wirtschaftlichen Betrieb von Recyclingnetzwerken

Monica Vanegas. 174 Seiten, 65 Abb., 41 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7558-4

Eine Ontologie-basierte Methode zur Entscheidungsunterstützung in der Produktentwicklung

Hauke Arndt. 193 Seiten, 59 Abb. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7641-3

Analyse der Effekte beim Trockeneisstrahlen

Mark Claudius Krieg. 144 Seiten, 60 Abb., 27 Tab. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7625-3

Optimierte Zulieferintegration in der Produktentwicklung durch Ad-hoc-Kooperationswerkzeuge

Hendrik Gärtner. 166 Seiten, 61 Abb. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7655-0

Zerspannsimulationslösungen für die Werkzeugkonstruktion und Prozessauslegung beim Fräsen

Alexander Marc Mattes. 169 Seiten, 79 Abb., 20 Tab. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7847-9

Aerodynamische Trenn- und Förderprozesse zur Steigerung der Demontageflexibilität bei Automobilkomponenten

Stefano Consiglio. 154 Seiten, 71 Abb., 13 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7955-1

Planung der Wiederverwendung von Elektro(nik)altgeräten

Sebastian Kernbaum. 236 Seiten, 87 Abb., 19 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7966-7

Verfahren zur ad hoc-Modellierung und -Simulation räumlicher Feder-Masse-Systeme für den Einsatz in Virtual Reality-basierten Handhabungssimulationen

Jens Neumann. 226 Seiten, 106 Abb., 27 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7955-1

Beeinflussung des Vorbehandlungszustandes der Substratrandzone durch Trockeneisstrahlen am Beispiel von Klebverbindungen

Adil El Mernissi. 157 Seiten, 72 Abb., 21 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7980-3

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität durch Modularisierung von Produkten

Marco Zettl. 236 Seiten, 65 Abb., 18 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7986-5

Herstellung und Einsatz CVD-diamantbeschichteter Bohrgewindefräser

Jens König. 188 Seiten, 65 Abb., 18 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0025-2

Akzeptanzförderung bei der Einführung von Wissensmanagement - Ein Methodenbaukasten für kleine und mittlere Unternehmen

Ina Kohl. 178 Seiten, 30 Abb., 13 Tab., 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0050-4

Technisch-wirtschaftliche Bewertung von Flexibilität in Rohbauebenenlinien

Arne Lambertz. 240 Seiten, 164 Abb., 10 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0117-4

Charakterisierung und Auslegung der Grenzschicht PVD-beschichteter Schneidkeramiken.

Tom Hühns. 179 Seiten, 72 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0132-7

Virtuelle Rekonstruktion von Innenräumen basierend auf Messdaten von Tiefenkameras

Alexander Sabov. 174 Seiten, 86 Abb., 10 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0144-0

Ermittlung, Berechnung und Optimierung des strukturmechanischen Verhaltens am Beispiel von Fräsmaschinen

Carsten Mense. 169 Seiten, 58 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0156-3

Beitrag zur nachhaltigen industriellen Wertschöpfung durch multiattributive Bewertung von Montageanlagen

Timo Fleschutz. 193 Seiten, 62 Abb., 8 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0171-6

Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme

Nils Weinert. 174 Seiten, 52 Abb., 16 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0173-0

Semantic-Web-Wissensbank für Planungsprozesse bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen

Robert Harms. 210 Seiten, 93 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0180-8

Einsatzverhalten genuteter CBN-Schleifscheiben mit keramischer Bindung beim Außenrund-Einsteichschleifen

Mathias Kirchgatter. 173 Seiten, 85 Abb., 19 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0211-9

Planung ingenieurwissenschaftlicher Qualifizierung mit Semantik-Web-Wissensbanken

Carsten Reise. 178 Seiten, 61 Abb., 26 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0217-1

Development of an Intellectual Capital-Based Management System for Science Parks
Hamad Al Hashemi. 154 Seiten, 54 Abb., 7 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0218-8

Adaptive physikbasierte Modelle für die interaktive Deformationssimulation in der Virtuellen Realität

Ulrike Völlinger. 222 Seiten, 109 Abb., 25 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0273-7

Beitrag zu verteilten technischen Innovationsprozessen unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien

Semih Severengiz. 208 Seiten, 35 Abb., 15 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0232-4

Hybride Interaktionstechniken des immersiven Skizzierens in frühen Phasen der Produktentwicklung

Johann Habakuk Israel. 389 Seiten, 120 Abb., 26 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0330-7

Depth Data based Determination of Gait Parameters of Subjects after Stroke for the Use in Clinical Gait Rehabilitation

Jochen Radmer. 152 Seiten, 84 Abb., 14 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0332-1

Integration von Modellkonzeption und Management der Unternehmensmodellierung

Thomas Knothe. 190 Seiten, 48 Abb., 32 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0355-0

Wissensgenerierung in hybriden Leistungsbündeln durch die Virtual Life Cycle Unit

René Gegusch. 184 Seiten, 81 Abb. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0371-0

Strategische Unternehmensentwicklung auf Basis immaterieller Werte in KMU

Markus Will, 219 Seiten, 56 Abb., 31 Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0376-5

Modellbasierte Prozessauslegung des Druckfließlappens am Beispiel keramischer Werkstoffe

Vanja Mihotovic, 166 Seiten, 65 Abb., 5 Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0390-1

Schleifen von Hartmetall- und Vollkeramik-Schaftfräsern

Christoph Hübert, 154 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0393-2

A haptic control framework for end-effector based gait simulation interfaces and its application in patient-adaptive rehabilitation training

Sami Hussein, 160 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0464-9

Auditierung von Wissensbilanzen. Eine Methode zur Qualitätssicherung von Bilanzen des Intellektuellen Kapitals

Wen-Huan Wang, 200 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0490-8

Einsatzverhalten von PKD und Bor-dotiertem CVD-Diamant bei der Mikrofunkenerosion

Markus Röhner, 224 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0497-7

Effective Motion Design Applied to Energy-Efficient Handling Processes

Tobias Brett, 205 Seiten, 84 Abb. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0511-0

Fortschrittsbewertung von Fabrikplanungsprojekten

Sven Glinitzki, 230 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0520-2

Kompensation der Verlagerung an nachgiebigen Werkzeugmaschinengestellen am Beispiel von Fräsmaschinen für die Mikrobearbeitung

Jörg EBmann, 164 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0565-3

Approach for Integrating Predictive-Reactive Job Shop Scheduling with PLC-Controlled Material Flow

Azrul Azwan Abdul Rahman, 168 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0622-3

Product-Service Systems Enabling for Sustainable City Mobility

Jialiang Hu, 167 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0632-2

Integration optischer Messtechnik in Ultrapräzisionsmaschinen für die Korrekturbearbeitung beim Drehen mit Slow-Slide-Servo

Martin Kurz, 213 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0630-8

Contribution to efficient water use and reducing environmental impact of wastewater in industry

Chenqing Wang, 213 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0637-7

Patientengerechte Gestaltung computerbasierter Anwendungen in der gerätegestützten, motorischen Therapie nach Schlaganfall

Simone Schmid, 182 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0634-6

Einfluss der Oberflächenstrukturierung und -texturierung eines Kunststoffsubstrats auf die Anhaftung von Zellen

Quang Ut Huynh, 193 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0631-5

Modellierung und Simulation des thermischen Verhaltens einer Werkzeugmaschine mit der Finite-Elemente-Methode

Jiangmin Hu, 191 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0660-5

Möglichkeiten und Grenzen des Strahlspanens mittels CO₂ Hochdruckstrahlen

Martin Bilz, 170 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0661-2

Nachhaltige Technologiepfade für unterschiedliche Entwicklungsniveaus

Pia Gausemeier, 247 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0670-4

Enabling sustainable value creation by engineering capacity building

Sadiq Ahmad Muhammad Abd Elall, 161 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0687-2

Verwendung von Traceability-Modellen zur Unterstützung der Entwicklung technischer Systeme.

Grischa Beier, 378 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0681-0

Effiziente Erfassung und Pflege von Traceability-Modellen zur Entwicklung technischer Systeme

Asmus Figge, 311 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0705-3

Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim Mikrofräsen durch Schneidkantenpräparation mittels Tauchgleitlappen.

Armin Löwenstein, 222 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0652-0

Integrated Engineering of Products and Services

Patrick Müller, 366 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0549-3

Konzeption und Realisierung einer Methode zur templategestützten Systementwicklung

Simon Frederick Königs, 258 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0652-0

Community-Based Design of Process Chains for Manufacturing and Recycling
Steffen Heyer, 189 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0731-2

**Werker-Assistenz und -Qualifizierung für manuelle (De-)Montage durch bild- und schrift-
gestützte Visualisierung am Arbeitsplatz**
Aleksandra Barbara Postawa, 206 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert.
ISBN 978-3-8396-0733-6

Vereinfachung der Systemmontage von metalloptischen IR-Spiegelteleskopen
Sebastian Scheiding, 163 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0774-9

Geschäftsmodelle der Wiederaufbereitung für Hersteller von Originalteilen
Henry Widera, 218 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0820-3

**Verfahren zur mechanischen Erzeugung periodischer nanooptischer Strukturen mit
monokristallinen Diamantwerkzeugen am Beispiel von Blazegittern**
Kurt Haskic, 196 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0859-3

Absicherung des Innovationserfolgs unter Berücksichtigung des Open-Innovation-Ansatzes
Manuel Rothe, 184 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0861-6

Steigerung der Nutzungspotenziale von CVD-diamantbeschichteten Werkzeugen
Fiona Sammler, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0906-4

Prozessstrategien beim NC-Formschleifen mit Schleifstiften
Tiago Borsoi Klein, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0943-9

Netzfreie Zerspanungssimulation mit der Finite-Pointset-Methode
Robert Gerstenberger, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0946-0

**Untersuchung des Einflusses von Dreh-, Drehfräs-, Glattwalz- sowie Schleifprozessen auf das
tribologische Einsatzverhalten von Stahl am Beispiel des Rad-Schiene-Kontakts**
Stefan Gebhard, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0955-2

**Keramische Schafffräswerkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Nickelbasis-
Legierungen**
Manuel Wacinski, 148 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0965-1

**Additive Fertigung von Nickelbasis-Superlegierungen mittels Laserstrahlschmelzens am
Beispiel von Diamalloy 4004NS**
Kamilla König-Urban, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0978-1

Modellbasierte Prozessoptimierung für das Mikrofräsen
Frederik Felix Mahr, 234 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0986-6

Quantitative Betriebsmittelbedarfsplanung für die getaktete Fließfertigung
Jakob Dinse, 158 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0951-4

**Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung eines globalen
Qualitätsmanagementsystems**
Felix Meentken, 208 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0998-9

**Entscheidungsmethodik zur kompetenzbasierten Team-Organisation bei der
Implementierung von Energiemanagementsystemen**
Phillip Karcher, 240 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0991-0

Nutzenoptimierter Einsatz präventiver Qualitätsmethoden im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie

Markus Heintzmann, 238 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0993-4

Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung eines globalen Qualitätsmanagementsystems

Felix Meentken, 208 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0998-9

Qualitätsreferenzmodell für die Produktion von Unikaten und Kleinserien

Dominik Rößle, 281 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1035-0

Einfluss von Herstellungs- und Lagerungsfaktoren auf die Eigenschaften von Trockeneispellets und das Strahlergebnis.

Simon Motschmann, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1014-5

Niedrigdimensionale Modelle zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung der Pose.

Jens Hermann Wintering, 207 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert.

ISBN 978-3-8396-0999-6

Einfluss von Herstellungs- und Lagerungsfaktoren auf die Eigenschaften von Trockeneispellets und das Strahlergebnis.

Simon Motschmann, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1014-5

Die steigende industrielle Relevanz von hochleistungsfähigen Werkstoffen wie technische Keramiken erfordert aufgrund von wirtschaftlichen Aspekten eine Erhöhung der Effizienz bestehender Fertigungsverfahren und Technologien. Ziel dieser Arbeit ist die Leistungssteigerung bei der Fertigung von Mikrobohrungen durch die Entwicklung, Analyse und Anwendung einer neuartigen Technologie – das trockenfunkenerosive Feinbohren von Hochleistungswerkstoffen.

Beginnend mit technologischen Untersuchungen einzelner Relaxationsentladungen für unterschiedliche Werkstückwerkstoffe, wird eine grundlegende Analyse verfahrensspezifischer Unterschiede beim Einsatz flüssiger und gasförmiger Arbeitsmedien durchgeführt. Anschließend erfolgt die Entwicklung von Parameterkombinationen für das trockenfunkenerosive Feinbohren mit Luft als Dielektrikum. Über eine messtechnische Auswertung von Abtragpartikeln werden charakteristische Abtragmechanismen für die Werkstoffe $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ und TiB_2 identifiziert. Durch den Einsatz prozessfördernder Gase und durch eine systematische Prozessoptimierung erfolgt abschließend die Optimierung von Prozesstechnologien für die Schrapp- und Schlichtbearbeitung.

ISBN 978-3-8396-1060-2



9 783839 610602 **FRAUNHOFER VERLAG**