

Vergleich und Kombination trockener, nahe-trockener und konventioneller Dielektrika

Multifluide Dielektrika beim funkenerosiven Bohren

E. Uhlmann, M. Polte, M. Osmanovic

ZUSAMMENFASSUNG Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse zur Untersuchung multifluider Dielektrika beim funkenerosiven Mikrobohren vor. Dazu werden flüssige, gasförmige sowie gemischte Dielektrika einzeln sowie in Kombination untersucht. Als Werkstoffe kamen für das Werkzeug Hartmetall (WC-Co) und für das Werkstück gehärteter Stahl (PMHS 6–5–4) zum Einsatz. Im Ergebnis zeigte sich Öl als stabilster Erosionsprozess. Öl und Argon führten zu einer um 26 % geringeren Erosionsdauer unter den kombinierten Dielektrika.

STICHWÖRTER

Erodieren, Mikrotechnik, Trockenbearbeitung

Comparison and combination of dry, near-dry and conventional dielectrics – Multifluid dielectrics in electrical discharge drilling

ABSTRACT This paper presents the results of the investigation of multifluid dielectrics in electrical discharge micro drilling. Liquid, gaseous and mixed dielectrics are investigated individually and in combination. Tungsten carbide (WC) was used for the tool and hardened steel (PMHS 6–5–4) for the workpiece. The result indicated that oil was the most stable erosion process. Oil and argon led to a 26 % shorter erosion duration among the combined dielectrics.

1 Einleitung

In der Produktionstechnik haben sich die spanenden Fertigungsmethoden weitestgehend als Repräsentanten der Trennverfahren durchgesetzt. Diese werden in vielen Anwendungen eingesetzt, besitzen ein breites Spektrum an Möglichkeiten und gelten als traditionelle Verarbeitungsmethoden, welche in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Optimierungsvorgänge durchlaufen haben. Dennoch sind die Potenziale spanender Bearbeitungsverfahren bei der Fertigung von Bohrungen mit hohen Aspektverhältnissen a sowie der Herstellung von komplexen Konturverläufen, Sphären oder anderen dreidimensionalen Teilformen durch die mechanischen Eigenschaften der zu bearbeitenden Werkstoffe zunehmend erschöpft. Hierdurch werden ihre Wirtschaftlichkeit aufgrund langer Prozessdauern t_p und des hohen technologischen Aufwands zunehmend kritisch betrachtet. Hochvergütete Stähle und Superlegierungen sowie Hartmetalle und technische Keramiken lassen sich nur mit großem technologischem Aufwand und hohen Fertigungskosten zerspanen. Im Vergleich dazu gewinnen thermische Abtragverfahren aufgrund steigender Qualitäts- und Genauigkeitsanforderungen stetig an Bedeutung [1].

Die Funkenerosion (electrical discharge machining, kurz EDM) ist ein bereits etabliertes Fertigungsverfahren zur effizienten Bohr- und Bahnbearbeitung derartiger Werkstoffe. EDM findet speziellen Einsatz für die Herstellung von Produkten mit höchsten Anforderungen in verschiedenen Anwendungsbereichen. In der Luftfahrtindustrie ist das funkenerosive Bohren zur Bearbeitung hochwarmfester Legierungen ein verbreitetes Verfahren für die Herstellung von Kühlluftbohrungen [2]. Weitere Anwen-

dungsfelder des funkenerosiven Bohrens erstrecken sich über den Applikationsbereich hochpräziser sowie komplexer Mikrobohrungen in verschiedenen Hochleistungswerkstoffen und damit über zahlreiche Branchen der deutschen Industrie, wie der Medizintechnik, der Luft- und Raumfahrttechnik sowie dem Werkzeug- und Formenbau.

Ein grundlegender Bestandteil der Funkenerosion ist die Verwendung eines fluiden Dielektrikums im Arbeitsspalt s zwischen Werkzeug- und Werkstückelektrode. Prozessabhängig kann mit flüssigen (konventionell), gasförmigen (trocken) oder gemischten (nahe-trocken/dispergiert) Dielektrika gearbeitet werden. Das Dielektrikum dient der elektrischen Isolation der Elektroden, erfüllt jedoch auch Aufgaben des Spülens und Kühlens. Dem Abtransport der Abtragpartikel und Gasblasen kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu [3, 4]. Prozesstechnisch bieten sowohl die trocken- als auch die nahe-trocken-funkenerosive Bearbeitung mit Gasen, beispielsweise Sauerstoff, entscheidende Vorteile zur Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} sowie des relativen Verschleißes ϑ [5, 6].

Kohlenwasserstoffbasierte Dielektrika eignen sich aufgrund ihrer erhöhten Viskosität gegenüber deionisiertem Wasser und den damit verbundenen hohen Abtragraten VW für eine Schrubbearbeitung zur Herstellung von Mikrobohrungen. Die hohen Energiedichten ρ an den Fußpunkten des Entladekanals führen jedoch zu erhöhten Rauheitskennwerten und somit zu schlechten Oberflächengüten in der Bohrung. Das konventionelle Bohren mit deionisiertem Wasser hingegen verspricht hohe Oberflächengüten, geringe Bohrungseintrittsradien R_{in} sowie eine geringe Dicke der sogenannten weißen Randschicht d_w . Deionisiertes

Tabelle. Parameter für Dielektrika und ausgewählten Dielektrikakombinationen.

	Öl	Deionisiertes Wasser		Sauerstoff	Dispergiert	Argon
		Schruppen	Schlachten			
Leerlausspannung U_0 in V	100	160	100	100	160	250
Entladestrom i_e in A	8,3	2,4	3,2	1,4	2,4	5,6
Impulsdauer t_i in μ s	3,2	2,4	1,8	10	2,4	13
Pausendauer t_0 in μ s	18	56	56	7,5	56	130
Entladekapazität C_e in nF	101	33	10,33	18,43	33	33
Spüldruck p_s in bar	40	20	20	20	25	9

Wasser kann aufgrund der guten Kühlwirkung mit sehr hohen Strömen beaufschlagt werden und erzielt somit hohe Abtragraten.

Laut den Untersuchungen von *Schimmelpfennig* [7] kann Argon als Dielektrikum für eine verschleißarme Schlichtbearbeitung eingesetzt werden. Innerhalb der Umschaltphase können die konventionellen Dielektrika mit Argon problemlos dispergieren, da hier keine Gefahr der Entflammbarkeit durch Argon besteht. Ein wesentlicher Nachteil dieser Kombination ist die Anpassung von elektrischen Parametern, welche eine Schlichtbearbeitung mit Argon voraussetzt. Weiterhin besitzt Argon geringe Abtragraten VW, wodurch die Wirtschaftlichkeit reduzierbar ist.

Eine Kombination der Vorteile des schnellen sowie hochpräzisen Bohrens mittels Trocken- beziehungsweise konventioneller Funkenerosion verspricht erhebliche Vorteile in Hinblick auf eine wirtschaftliche Fertigung präziser Bohrungen, welche im Folgenden zu untersuchen ist.

2 Material und Methoden

Für die Untersuchungen wird eine Funkenerosionsmaschine vom Typ „Agie compact 1“ der Firma GF Machining Solutions SA, Losone/Schweiz eingesetzt, welche mit einem Relaxationsgenerator zur Erzeugung der Entladungen ausgestattet ist. Weiterhin ist ein im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit der Firma Hugo Reckerth GmbH, Stuttgart, entwickeltes System, bestehend aus einer Spindel und der dazugehörigen Spindelperipherie verwendet worden, wodurch der multi fluide Einsatz sowie die Untersuchungen durchführbar sind.

Eingesetzt wurden Stahlwerkstücke des Typs „PMHS 6-5-4“ (Werkstoffnummer 1.3336, kurz: PM4) mit den Abmessungen $H \times B \times T = 13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Als Werkzeug wurden Einkanalektroden aus Hartmetall (WC-Co) mit einem Außen-durchmesser $d_A = 0,3 \text{ mm}$ und Innendurchmesser $d_I = 0,12 \text{ mm}$ verwendet, um das geforderte Aspektverhältnis a einhalten zu können. Da die Elektroden einen geringen Außendurchmesser d_A besitzen, wurde WC-Co als Werkstoff gewählt, um eine höhere mechanische Stabilität zu erlangen, welche für die nachfolgenden Versuche essenziell ist.

Zunächst werden die einzelnen Dielektrika Öl des Typs „IME63“, deionisiertes Wasser, Sauerstoff sowie eine dispergierte Mischung aus Sauerstoff und deionisiertem Wasser untersucht. Das Verhältnis der dispergierten Mischung betrug 70 % deionisiertes Wasser und 30 % Sauerstoff. Zur Auswahl der eingesetzten Dielektrikakombinationen wurden die Gegenwirkungen der Dielektrika untereinander verglichen. Demnach wird ergän-

zend neben der Untersuchung von Öl und Argon sowie Wasser und Argon, die Kombination der Dielektrika Öl und deionisiertes Wasser untersucht. Hierbei wird mit dem erstgenannten Dielektrikum zunächst eine Schrubbearbeitung und anschließend mit dem zweiten Dielektrikum eine Schlichtbearbeitung durchgeführt. Alle Versuche werden als Durchgangsbohrungen jeweils dreimal durchgeführt und anschließend ein Mittelwert für die Zielparameter sowie die relative Standardabweichung s_{rel} ermittelt.

Die elektrischen Parameter und Spülparameter für das jeweilige Dielektrikum beziehungsweise die Dielektrikakombinationen sind in der **Tabelle** zusammengefasst. Die Drehzahl $n_S = 2000 \text{ 1/min}$ wurde bei allen Versuchen konstant gehalten. Betrachtet wurden die Zielgrößen Erosionsdauer t_{ero} und Längenabnutzung der Werkzeugelektrode Δl_E . Weiterhin wurden die Eintrittsdurchmesser D_E und Austrittsdurchmesser D_A messtechnisch erfasst.

3 Ergebnisse

Der Erosionsprozess mit deionisiertem Wasser hat mit einer Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 322 \text{ s}$ und einer Längenabnutzung der Werkzeugelektrode $\Delta l_E = 1,08 \text{ mm}$ die besten Ergebnisse der getesteten Dielektrika erzielt. Die Versuche mit Sauerstoff mussten aufgrund der hohen Erosionsdauer $t_{\text{ero}} > 59 \text{ min}$ abgebrochen werden. Mit einer Erosionsdauer $t_{\text{ero}} = 823 \text{ s}$ eignet sich eine Dispersion von deionisiertem Wasser und Sauerstoff im Vergleich zu den konventionellen Dielektrika nicht. Die Ergebnisse sind in **Bild 1** dargestellt.

Der Erosionsprozess unter Öl wies bezüglich des prozentualen Anteils an Kurzschlüssen zunächst den stabilsten Prozess unter den eingesetzten Dielektrika auf. Auch der Bohrungseintrittsdurchmesser D_E und der Bohrungsaustrittsdurchmesser D_A sowie die sich daraus resultierende Konizität $\alpha_t = 0,4^\circ$ weisen gegenüber den anderen Dielektrika die höchste Formstabilität auf. Die durchgehend niedrigen Standardabweichungen unterstreichen die Wiederholgenauigkeit aller Versuche. Die gefertigten Bohrungen in deionisiertem Wasser besitzen hingegen trotz ähnlicher Prozessstabilität eine wesentlich geringere Güte. Die Eintrittsdurchmesser D_E und Austrittsdurchmesser D_A liegen im Vergleich mit dem Außendurchmesser $d_A = 0,3 \text{ mm}$ der Werkzeugelektroden rund 68 % höher und weisen auf deutlich vergrößerte laterale Arbeitsspaltweiten $s_l > 100 \mu\text{m}$ hin. Ein möglicher Grund hierfür könnte die höhere Viskosität ν liefern. Durch diese wird der Entladekanal erheblich eingeschnürt, wodurch sich Entladungen mit

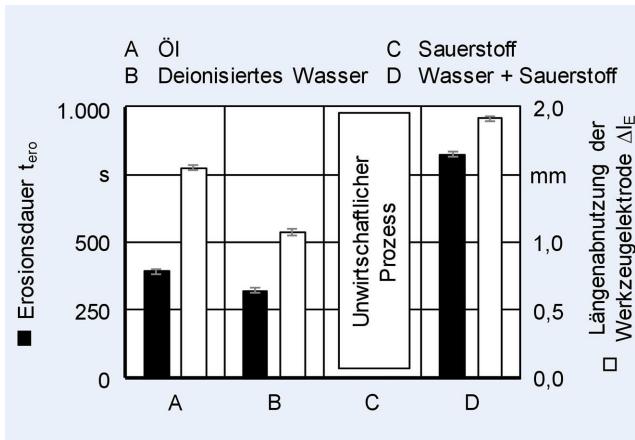


Bild 1. Erosionsdauer t_{ero} und Längenabnutzung der Werkzeugelektrode Δl_E der einzelnen Dielektrika. *Grafik: IWF*

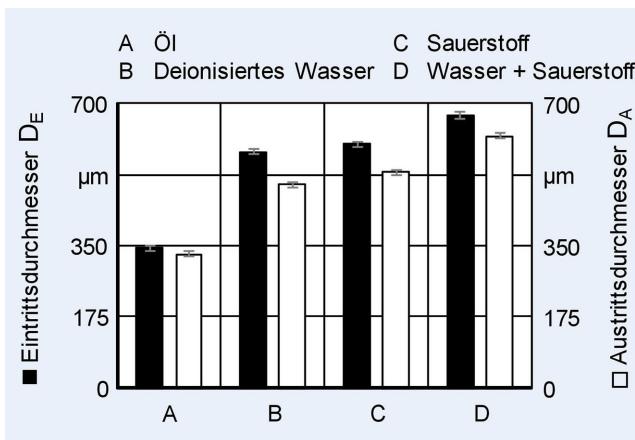


Bild 2. Eintritts- und Austrittsdurchmesser D_E und D_A der gefertigten Bohrungen der einzelnen Dielektrika. *Grafik: IWF*

höherer Energiedichte ρ im Arbeitsspalt s entladen können. Nachfolgend zeigt das **Bild 2** die Eintrittsdurchmesser D_E und Austrittsdurchmesser D_A zur Klassifizierung der Bohrungsqualität.

In **Bild 3** werden exemplarische Bohrungen für die vier Dielektrika dargestellt. Da mit dem Öl prozessbedingt eine höhere Energiedichte ρ erreicht wird, sind die Durchmesser D der gefertigten Bohrungen, im Vergleich zum Einsatz mit deionisiertem Wasser, größer. Da jedoch der Eintrittsdurchmesser D_E nahezu gleich groß wie der Austrittsdurchmesser D_A ist, wurde eine geringe Konizität α_t der Bohrungen ermittelt. Dies lässt auf ein gesteigertes Entladungsverhalten beim Durchbruch unter der Spülung mit kohlenwasserstoffbasierten Dielektrika schließen. Bei der Verwendung von Wasser ist deutlich erkennbar, dass der Eintrittsdurchmesser D_E größer als der Austrittsdurchmesser D_A ist, was entsprechend zu einer höheren Konizität α_t führt. Weiterhin ist deutlich zu erkennen, dass unter Sauerstoff und der Dispersion mit deionisiertem Wasser und Sauerstoff der Bohrungsrand vergrößert wird und sich eine weiße Randschicht ausbildet.

In **Bild 4** werden die Erosionsdauer t_{ero} sowie die Längenabnutzung der Werkzeugelektrode Δl_E der kombinierten Dielektrika verglichen. Beim kombinierten Einsatz der Dielektrika erreicht die Kombination aus Öl und Argon mit einer Erosionsdauer $t_{ero} = 487$ s das schnellste Bearbeitungsergebnis bei der höchsten Längenabnutzung der Werkzeugelektrode $\Delta l_E = 1,69$ mm.

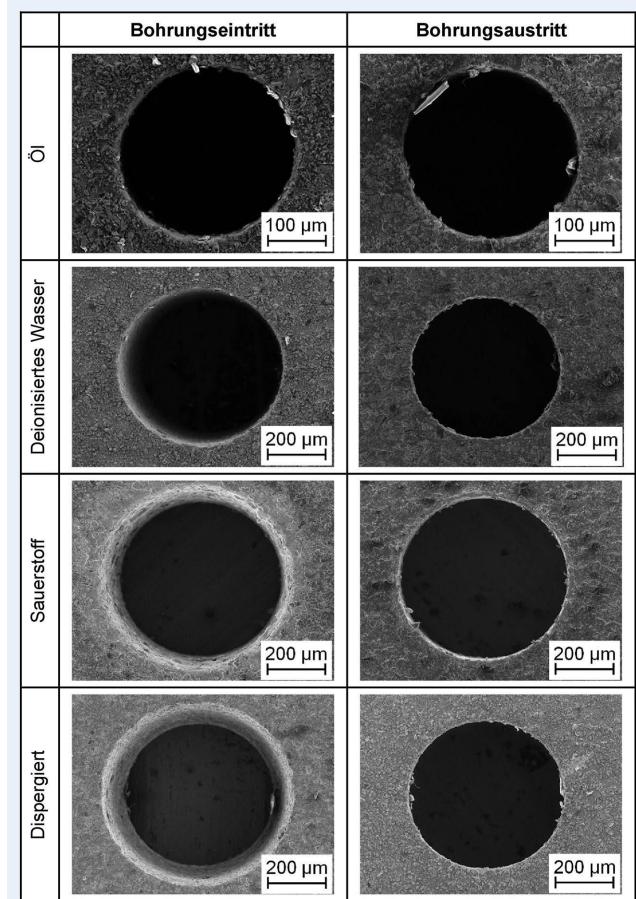


Bild 3. Vergleich der Bohrungen unter Einfluss verschiedener Dielektrika. *Grafik: IWF*

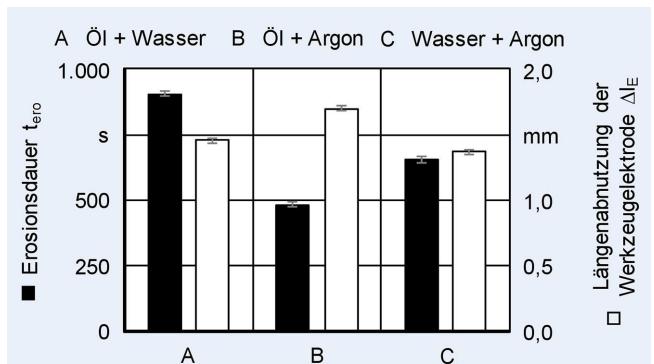


Bild 4. Erosionsdauer t_{ero} und Längenabnutzung der Werkzeugelektrode Δl_E der eingesetzten Dielektrika. *Grafik: IWF*

ten Längenabnutzung der Werkzeugelektrode $\Delta l_E = 1,69$ mm. Insgesamt besitzen die Kombinationen der Dielektrika eine deutlich höhere Erosionsdauer t_{ero} und höhere Längenabnutzungen der Werkzeugelektrode Δl_E verglichen mit dem Einsatz singulärer Dielektrika. Grund hierfür ist, dass die Fertigung dieser Bohrungen in zwei Arbeitsschritten vollzogen werden muss.

In **Bild 5** sind die Eintrittsdurchmesser D_E und Austrittsdurchmesser D_A der kombinierten Dielektrika dargestellt. Die Kombination aus Öl und Argon weist die kleinsten Eintrittsdurchmesser D_E und Austrittsdurchmesser D_A auf. Zudem ist die

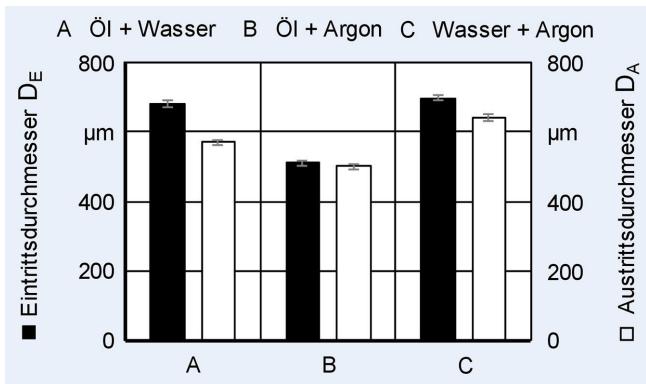


Bild 5. Eintritts- und Austrittsdurchmesser D_E und D_A der gefertigten Bohrungen der kombinierten Dielektrika. *Grafik: IWF*

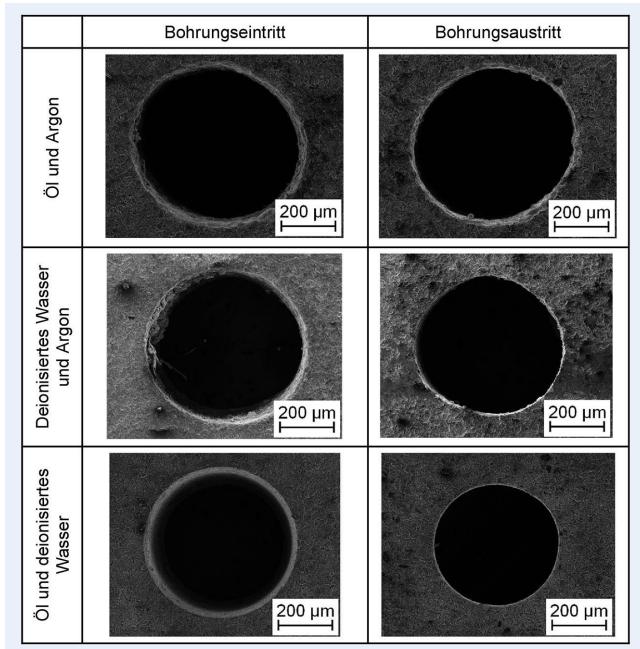


Bild 6. Vergleich der Bohrungen in den verschiedenen Dielektrikakombinationen. *Grafik: IWF*

Konizität von $\alpha_t = 0,3^\circ$ bei dieser Kombination am geringsten. Jedoch ist aus **Bild 6** ersichtlich, dass es hier zu Rundheitsfehlern kommt. Auch bei der Kombination aus Wasser und Argon zeigt sich, dass nicht nur die Eintrittsdurchmesser D_E und Austrittsdurchmesser D_A sowie die Konizität $\alpha_t = 1,7^\circ$ erhöhte Werte aufweisen, sondern es auch hier zu Rundheitsfehlern an den Bohrungsaustritten kommt. Dies kann auf die schlechteren Spülbedingungen beim Schlichten mit Argon zurückzuführen sein. Da das Prozessgas in die bereits bestehende Bohrung mit einem in Referenz zum Prozessmedium zu großen Arbeitsspalt s eingeführt werden muss, ist kein stabiler Strömungszustand der Spülung erreichbar. Die erhöhte Kompressibilität des gasförmigen Dielektrikums begünstigt hierbei eine Auslenkung der Werkzeugelektrode aus ihrer zentrierten Lage. Zudem liegt die Vermutung nahe, dass die Rotation der Werkzeugelektrode Schwingungen innerhalb der Bohrung sowie seitlichen Entladungen begünstigt.

Die Kombination aus Öl und deionisiertem Wasser besitzt zwar mit einer Konizität $\alpha_t = 3,1^\circ$ die größte Abweichung von Bohrungseintritt- zu -austritt, jedoch ist in Bild 6 zu erkennen,

dass der Rundheitsfehler hier am geringsten ist. Das Schlichten mit deionisiertem Wasser fand unter Flutung des Arbeitsbeckens statt. So konnte das Dielektrikum seine Spülauflagen gezielter erfüllen und seitliche Entladungen minimieren.

4 Fazit und Ausblick

Diese wissenschaftliche Untersuchung liefert bedeutende Erkenntnisse, welche zur Entwicklung effektiver Bearbeitungstechnologien für das funkenerosive Mikrobohren in verschiedenen Anwendungsbereichen beitragen können. Insbesondere wurden die Auswirkungen verschiedener Dielektrika auf den Erosionsprozess untersucht. Dabei lieferte das Bohren mit deionisiertem Wasser die besten Ergebnisse unter den einfach eingesetzten Dielektrika, mit einer Erosionsdauer $t_{ero} = 322$ s und einer Längenabnutzung der Werkzeugelektrode $\Delta l_E = 1,08$ mm. Zudem zeigte sich, dass das Öl die stabilsten Ergebnisse erzielte und eine höhere Formstabilität in Bezug auf den Ein- und Austrittsdurchmesser D_E und D_A sowie die Konizität α_t aufwies.

Die Kombination von Öl und Argon führte zu einer erheblichen Reduzierung der Erosionsdauer t_{ero} um 26 %. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei einem kombinierten Einsatz der Dielektrika, die Kombination von Öl und Argon die besten Bearbeitungsergebnisse beim funkenerosiven Mikrobohren erzielen kann. Zwar resultiert beim Einsatz von kombinierten Dielektrika, aufgrund der Notwendigkeit von zwei Erosionsdurchläufen, eine insgesamt höhere Erosionsdauer t_{ero} , jedoch besteht die Möglichkeit bei der Anwendung eines kleineren Außendurchmesser d_A der Werkzeugelektrode für den Schrubbvorgang im Gesamtergebnis eine bessere Konizität α_t der Bohrung zu fertigen.

Die vorliegende Untersuchung trägt somit wesentlich zur Weiterentwicklung der Bearbeitungstechnologien für das funkenerosive Mikrobohren bei und bietet eine solide Grundlage für zukünftige Forschungen auf diesem Gebiet. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen es Forschern und Ingenieuren, effizientere und präzisere Bearbeitungsprozesse zu entwickeln und anzuwenden, um den Anforderungen verschiedener Anwendungen gerecht zu werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass diese wissenschaftliche Untersuchung einen bedeutenden Beitrag zur Entwicklung effektiver Bearbeitungstechnologien für das funkenerosive Mikrobohren leistet. Durch die Untersuchung verschiedener Dielektrika wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen, insbesondere hinsichtlich der Stabilität des Erosionsprozesses und der Formstabilität der Bohrungen.

Insgesamt trägt die Untersuchung zur Weiterentwicklung des funkenerosiven Mikrobohrrens bei und schafft einen Mehrwert für die Industrie durch verbesserte Bearbeitungstechnologien und präzisere Bauteile. Diese stellt die Grundlage für zukünftige Forschungen und Innovationen dar, um die Leistungsfähigkeit dieser Technologie weiter zu verbessern und neue Anwendungsbereiche zu erschließen.

DANKSAGUNG

Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] Langmack, M.: Laserwendel- und funkenerosives Mikrobohren. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2015
- [2] Klocke, F.; Klink, A.; Veselovac, D.; Aspinwall, D.K.; Soo, S.L.; Schmidt, M.; Schilp, J.; Levy, G.; Kruth, J.-P.: Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. CIRP Annals – Manufacturing Technology 63 (2014) 2, S. 703 – 726
- [3] Qin, Y.: Micromanufacturing Engineering and Technology. In: Micro and Nano Technologies. 1st edition. William Andrew, 2010
- [4] Wessels, T.: Bohren in Titan- und Nickelbasislegierungen, Vikan, Braunschweig, 2007
- [5] Kunieda, M.; Yoshida, M.: Electrical Discharge Machining in Gas. CIRP Annals – Manufacturing Technology 46 (1997) 1, S. 143 – 146
- [6] Tao, J.; Shih, A.J.; Ni, J.: Experimental Study of the Dry and Near-Dry Electrical Discharge Milling Processes. J. Manuf. Sci. Eng. 130 (2008) 1, S. 011002-1 – 011002-9
- [7] Schimmelpfennig, T.-M.: Trockenfunkenerosives Feinbohren von Hochleistungswerkstoffen. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg. Uhlmann, E. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2016

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

Dr.-Ing. Mitchel Polte



Mirsad Osmanovic, M.Eng.
Foto: IWFTU Berlin

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF
Technische Universität Berlin
Pascalstr. 8 – 9, 10587 Berlin
Tel. +49 30 / 314 75305
osmanovic@iwf.tu-berlin.de
www.iwf.tu-berlin.de

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann
Dr.-Ing. Mitchel Polte
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstr. 8 – 9, 10587 Berlin



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)