

Additiv gefertigte Formelektroden aus Kupfer für das funkenerosive Senken

Additive Fertigung für Werkzeugelektroden

E. Uhlmann, R. Bolz, C. Hein, J. Polte, T. Neuwald, B. Reinarz

ZUSAMMENFASSUNG Die additive Fertigung bietet aufgrund ihrer geometrischen Freiheiten Vorteile in den unterschiedlichsten Bereichen. So ist es möglich, komplexe Strukturen zu fertigen, die durch spanende Fertigungsverfahren nicht oder nur unter erhöhtem Aufwand umsetzbar sind. Ein möglicher Anwendungsbereich ist die Werkzeugelektrodenfertigung für das funkenerosive Senken und hierbei das Einbringen von Spülkanälen. Mögliche Vorteile einer solchen Prozesskette werden im Beitrag aufgeführt.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Erodieren, Werkzeug-/Formenbau

Additively manufactured tool electrodes

ABSTRACT Due to its geometric possibilities, additive manufacturing (AM) offers advantages in a wide variety of areas. By applying AM, it is possible to produce complex structures which can only be realized with increased effort or not at all with cutting processes. One possible area of application is tool electrode manufacturing for electrical discharge machining, especially with interior flushing channels. This work presents possible advantages of such a process chain.

1 Herausforderungen in der funkenerosiven Senkbearbeitung

Die funkenerosive Bearbeitung (englisch: EDM) wird für die Bearbeitung von schwer zu zerspanenden Werkstoffen wie gehärteten Stählen, Hartmetallen, Hochtemperaturlegierungen sowie elektrisch leitfähigen Keramiken eingesetzt. Aus diesem Grund wird sie hauptsächlich im Bereich des Werkzeug- und Formenbaus und für Komponenten aus der Luft- und Raumfahrtindustrie verwendet [1, 2].

Das Fertigungsprinzip der Funkenerosion, bei dem durch elektrische Funkenentladungen kleine Materialmengen abgetragen werden, führt zur Ansammlung von Abtragpartikeln im Arbeitsspalt zwischen der Werkzeug- und der Werkstückelektrode. Diese Abtragpartikel verändern die elektrischen Eigenschaften des Dielektrikums, wenn sie eine hohe Konzentration c im Bearbeitungsbereich erreichen [1, 3, 4]. Dies führt zu Prozessinstabilitäten aufgrund von Kurzschlüssen und Fehlentladungen durch die erhöhte elektrische Leitfähigkeit κ im Bearbeitungsbereich und damit zu längeren Bearbeitungszeiten t_B und einem erhöhtem Verschleißvolumen V_E . Im schlimmsten Fall kommt der Prozess zum Stillstand, da durch die sich im Arbeitsspalt befindenden Abtragpartikel kein Abtrag mehr am Werkstück generiert werden kann [1, 5, 6].

Daher ist die Entfernung von Partikeln aus dem Bearbeitungsbereich ein wesentlicher Faktor für einen effizienten EDM-Prozess. Dies wird durch aktive oder passive Spülung realisiert. Bei der aktiven Spülung wird Dielektrikum über Kanäle innerhalb der Werkzeugelektrode oder über einen externen Schlauch zur Bearbeitungsstelle geführt. Bei der passiven Spülung erfolgt

eine Hubbewegung der Werkzeugelektrode, wodurch eine lokale Druckänderung Δ_p im Arbeitsspalt erzeugt wird. Dies führt zu einer Bewegung der Dielektrikumflüssigkeit im Bearbeitungsbereich, was einem Spüleffekt entspricht.

Die Anwendung der aktiven Spülung beim Senkerosionsverfahren (S-EDM) durch Spülrohre nimmt aufgrund möglicher Störungen mit automatisierten Handhabungssystemen ab. Die Integration von Spülkanälen in Formelektroden erhöht die Komplexität der Herstellung erheblich. Dabei verursacht die Herstellung von Formelektroden, je nach Anwendungsfall, einen Großteil der Kosten. Daher wird in den meisten Fällen eine passive Spülung angewendet. Neuere Maschinen sind dafür mit einer erhöhten Hubgeschwindigkeit v_{hub} ausgestattet, um die Hubzeit t_{hub} zu reduzieren, in der keine Entladungen auftreten können. Dadurch wird auch der Spüleffekt erhöht. Bei der Fertigung von Features mit hohem Aspektverhältnis α ist jedoch eine aktive Spülung direkt durch die Werkzeugelektrode, wie üblicherweise bei der funkenerosiven Bohrbearbeitung mit Rohrelektroden angewendet, nach wie vor die beste Option [2, 3].

2 Additive Fertigung von Formelektroden

Das PBF-LB/M-Verfahren (englisch: Powder Bed Fusion – Laser Beam/Metal) ist den Additiven Fertigungsverfahren (englisch: Additive Manufacturing, AM) zuzuordnen und bietet aufgrund seiner Funktionsweise großes Potenzial für die Fertigung von komplexen Bauteilstrukturen. Vor allem bei der Herstellung von innen liegenden Kühl- und Spülkanälen mit der Anforderung an einen hohen geometrischen Freiheitsgrad, bietet das schichtweise Herstellungsverfahren optimale Voraussetzungen [7].



Bild 1. Unterschiedliche, additiv gefertigte Geometrien aus Kupfer vor und nach dem funkenerosiven Senkprozess und die entsprechenden Einsenkungen in Werkzeugstahl. *Grafik: eigene Darstellung*

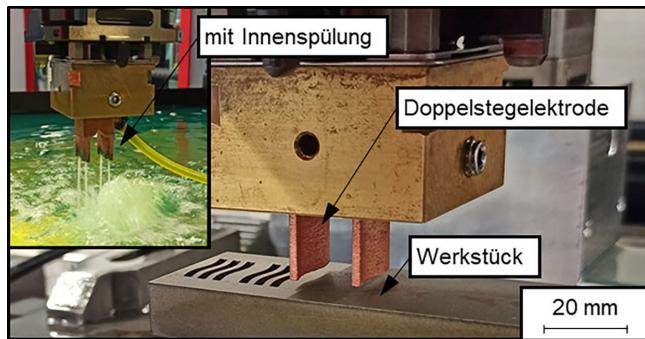


Bild 2. Aufnahmen einer additiv gefertigten Formelektrode im Arbeitsraum. *Grafik: eigene Darstellung*

Die additive Fertigung von Formelektroden für das funkenerosive Senken wird bereits seit mehreren Jahren untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Werkstoffe auf ihre Anwendbarkeit hin evaluiert [8, 9].

Die Verwendung von Kupfer wurde in diesem Kontext bislang kaum untersucht, obwohl Kupfer ein weit verbreiteter Werkstoff für Formelektroden ist. Die additive Verarbeitung von hochreinem Kupfer war bislang nur bedingt möglich, da technologische Limitierungen die Verarbeitung des Werkstoffs nur mit einem sehr hohen Anteil an Restporosität erlaubten. Einhergehend mit einem hohen Porenanteil sinkt jedoch sowohl die thermische wie die elektrische Leitfähigkeit, was einen negativen Einfluss auf das Abtrag- und Verschleißverhalten der Formelektroden hat.

Durch die technologische Weiterentwicklung ihrer Anlagen-technik hinsichtlich erhöhter Energiedichte und optimierter Prozessführung gelingt es der Firma EOS Electro Optical Systems GmbH, Bauteile aus Reinkupfer mit einer relativen Dichte von $\rho_{rel} > 99,5\%$ herzustellen [10]. So können nahezu die gleichen Werkstoffeigenschaften wie mit Elektrolytkupfer abgebildet werden. Der Einsatz von 3D-gedruckten Formelektroden bei der Funkenerosion scheint somit äußerst vielversprechend.

Um diese Möglichkeit zu evaluieren hat das Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK mit Unterstützung der Firma EOS GmbH erste Machbarkeitsstudien durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Geometrien aus Kupfer additiv gefertigt und anschließend funkenerosiv in Werkzeugstahl eingesenkt. **Bild 1** sind einige Beispiele dargestellt, die jeweils die Werkzeugelektroden vor und nach dem funkenerosiven Senkprozess gemeinsam mit der funkenerosiv gefertigten Einsenkungen zeigen.

Gerade bei der Fertigung von komplexeren Strukturen zeigt die additive Fertigung ihre Vorteile. Durch die Möglichkeit, bestimmte Geometrien hohl oder mit innen liegenden Stützstrukturen zu fertigen, ergibt sich ein hohes Einsparpotenzial für den Kupferwerkstoff.

Kritisch betrachtet werden muss die erreichbare Oberflächengüte. Da die Funkenerosion ein abbildendes Fertigungsprinzip ist, ist es kaum möglich eine Oberflächengüte zu erzeugen, die geringere Oberflächenrauheitskennwerte aufweist als die verwendete Formelektrode. Relativbewegungen der Formelektrode zur Kompensation der Rauheitsspitzen in der funkenerosiven Bearbeitung können nur geringe Verbesserungen erzeugen.

3 Vergleich konventioneller und additiv gefertigter Formelektroden aus Kupfer

Um einen Vergleich zwischen einer Prozesskette mit additiv gefertigten Werkzeugelektroden und einer Prozesskette mit konventionell gefrästen Werkzeugelektroden aus Elektrolytkupfer zu ermöglichen, wurde eine vereinfachte Geometrie aus zwei geschwungenen Stegen verwendet, siehe **Bild 2**.

Diese Struktur wurde gewählt, da sie einerseits einen typischen Anwendungsfall des funkenerosiven Senkens, die Fertigung von Schlitten beziehungsweise Strukturen mit hohem Aspektverhältnis α repräsentiert, andererseits mittels Frä- sowie additiver Bearbeitung gefertigt werden kann.

Das Fräsen einer Formelektrode mit dieser Doppelstegstruktur dauerte circa $t_{fräz} = 22,5$ min, die additive Fertigung $t_{AM} = 23,8$ min. Dabei wurden 48 Werkzeugelektroden in einem etwa 19-stündigen, additiven Bauprozess hergestellt. Die fast identische Herstellungszeit bei einfachen Strukturen bedeutet gerade bei komplexen Strukturen einen Zeitvorteil für die additive Fertigung.

Bild 3 stellt die Prozessergebnisse des funkenerosiven Senkens dieser Doppelstegstruktur hinsichtlich Abtrag- und Verschleißverhalten dar. Die ersten beiden Versuchsreihen zeigen die Ergebnisse für die AM-Formelektroden. Die Versuchsreihe 3 dient als Referenz mit gefrästen Formelektroden aus Elektrolytkupfer Cu-ETP.

Es ist erkennbar, dass die Werte für die Abtragrate mit $V_W = 51,4 \text{ mm}^3/\text{min}$ für Versuchsreihe 1 und $V_W = 52,1 \text{ mm}^3/\text{min}$ für Versuchsreihe 3 nahezu identisch ausfallen. Die AM-Formelektroden ermöglichen also eine genauso schnelle funkenerosive Bearbeitung wie die Pendants aus gefrästem Elektrolytkupfer bei passiver Spülung durch eine Hubbewegung der Formelektrode. Wird eine Innenspülung verwendet, wie in Versuchsreihe 2, kann die Abtragrate auf $V_W = 57,3 \text{ mm}^3/\text{min}$ erhöht werden. Eine

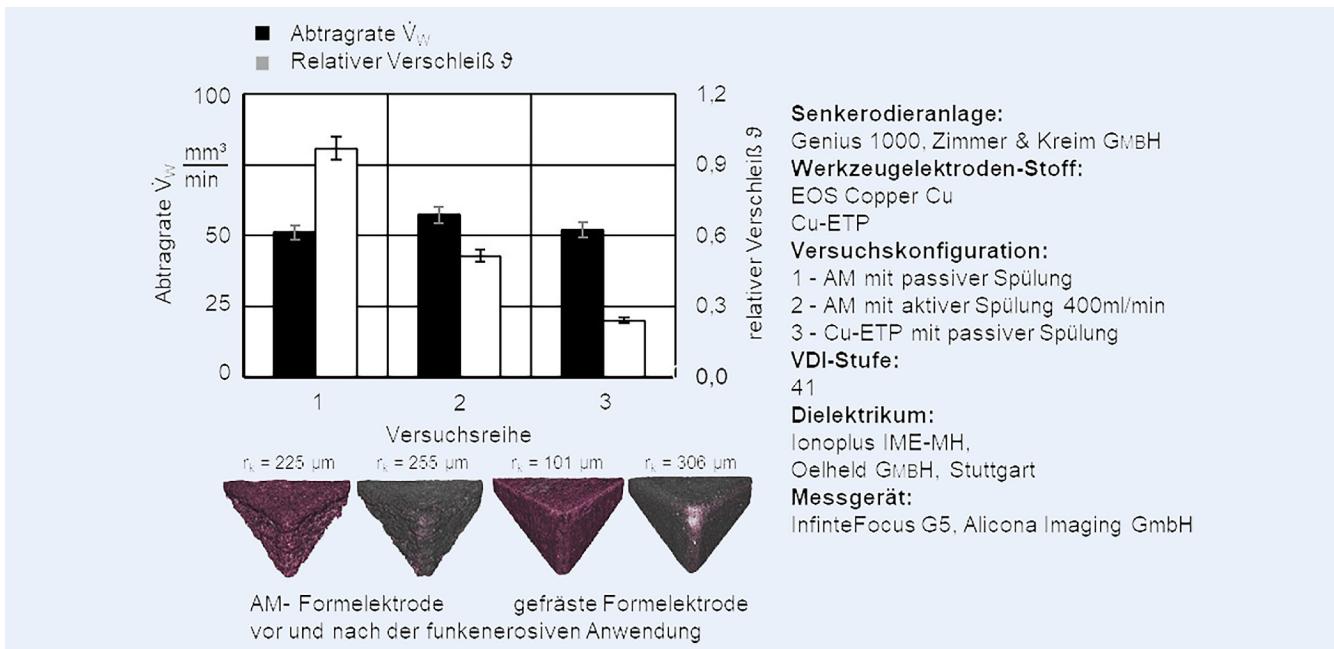


Bild 3. Darstellung der Prozessergebnisse zum Vergleich von gefrästen und AM (Additive Manufacturing)-Formelektroden. Grafik: eigene Darstellung

solche Innenspülung ist, wie anfangs erwähnt, bei der frästechnischen Fertigung von Formelektroden oft nur unter erhöhtem Aufwand, häufig auch gar nicht, realisierbar.

Bei der Betrachtung des relativen Verschleißes Φ konnte diese Verbesserung der Prozesswerte für AM-Formelektroden nicht erreicht werden. Die AM-Formelektroden erreichen ohne Spülung einen relativen Verschleiß von $\Phi = 1,0\%$, der somit mehr als dreimal so hoch ausfällt wie die Werte für gefräste Formelektroden mit $\Phi = 0,3\%$. Durch eine Innenspülung kann der relative Verschleiß für die AM-Formelektroden jedoch auf $\Phi = 0,5\%$ gesenkt werden. Da die Verschleißwerte hierbei nur mithilfe der Längenänderung Δl der Formelektroden bestimmt wurde, sind zudem die Werte der Kantenradien r_k vor und nach dem funkenerosiven Einsenken dargestellt.

Die Kantenradien unterscheiden sich für gefräste und AM-Formelektroden bereits vor der funkenerosiven Anwendung deutlich. Dabei weisen die AM-Formelektroden mit $r_k = 225\text{ }\mu\text{m}$ wesentlich höhere Kantenradien auf als die gefrästen Formelektroden mit $r_k = 101\text{ }\mu\text{m}$. Obwohl letztere einen geringeren relativen Verschleiß Φ aufweisen, steigen die Kantenradien während der funkenerosiven Bearbeitung auf $r_k = 306\text{ }\mu\text{m}$, im Vergleich zu $r_k = 255\text{ }\mu\text{m}$ für AM-Formelektroden, stärker an. Da geometrische Strukturen wie Kanten in der funkenerosiven Bearbeitung eine höhere elektrische Entladungsdichte Ψ_e aufweisen, sind diese Strukturen besonders stark von Verschleiß betroffen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In den beschriebenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass AM-Formelektroden aus Kupfer ein großes Potenzial für das

funkenerosive Senken bestimmter Geometrien aufweisen. Gerade das Abtragverhalten von additiv gefertigten Formelektroden ist vergleichbar mit dem Abtragverhalten konventionell gefräster Formelektroden und kann durch geeignete Implementierung einer Innenspülung weiter verbessert werden.

Nachteilig zeigte sich hier das Verschleißverhalten der AM-Formelektroden, wobei angemerkt werden muss, dass die AM- als auch die EDM-Prozessparameter nicht spezifisch auf diese Anwendung hin optimiert wurden. Kritisch gesehen werden muss zudem der hohe Kostenaufwand der additiven Fertigung, der durch eine etwaige Zeiter sparsnis in der Herstellung komplexer Formelektroden und einer Materialersparnis durch geeignete Designs der Formelektroden nicht gänzlich kompensiert werden kann. Nichtsdestotrotz ermöglicht die additive Fertigung das Herstellen von Formelektroden, die die konventionelle Fertigung von Formelektroden nur mit größtem Aufwand und in einigen Fällen auch gar nicht umsetzen könnte.

Neben Untersuchungen zur Optimierung der AM- und EDM-Prozessparameter sind weitere Untersuchungen zur Verbesserung der Oberflächenrauheitskennwerte denkbar.

L iteratur

- [1] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren Band 3. 4. Auflage. Heidelberg: Springer 2007
- [2] Boos, W.; Kelzenberg, C.; Prümmer, M. et al.: Tooling in Germany. Studie. Stand: 2020. Internet: www.upt.fraunhofer.de/content/dam/upt/de/documents/Studien/Studie_Tooling-in-Germany-2020.pdf. Zugriff am 24.07.2024

- [3] Kunieda, M.; Lauwers, B.; Rajurkar, K. P. et al.: Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. CIRP Annals – Manufacturing Technology 54 (2005) pp. 64–87
- [4] Uhlmann, E.; Schimmelpfennig, T.; Perfilov, I. et al.: Comparative Analysis of Dry-EDM and Conventional EDM for the Manufacturing of Micro Holes in Si₃N₄-TiN. Procedia CIRP 42 (2016) pp. 173–178
- [5] Cao, M.; Wang, Y.; Yang, S. C. et al.: Effects of Non-Electrical Parameters on Material Removal Rate of High-Speed Small Hole EDM Drilling. Advanced Materials Research 53–54 (2008) pp. 403–407
- [6] Ayesta, I.; Flaño, O.; Izquierdo, B. et al.: Experimental Study on Debris Evacuation during Slot EDMing. Procedia CIRP 42 (2016), pp. 6–11
- [7] EOS GmbH: Additive Manufacturing, Laser-Sintering and Industrial 3D Printing: How Does Additive Manufacturing Work? Internet: www.eos.info/en-us/about-us/what-we-do/additive-manufacturing. Zugriff am 08.08.2024
- [8] Amorim, F.; Lohrengel, A.; Neubert, V. F. et al.: Selective laser sintering of Mo-CuNi composite to be used as EDM electrode. Rapid Prototyping Journal 20 (2014), pp. 59–68
- [9] Uhlmann, E.; Polte, J.; Bolz, R. et al.: Application of additive manufactured tungsten carbide-cobalt electrodes with interior flushing channels in S-EDM. Procedia CIRP 95 (2020), pp. 460–465
- [10] Reinarz, B.; Weiskopf, W.: Taming the Beast – EOS overcomes the challenges of pure copper AM. TCT Mag – Europe Edition 31 (2023) 2, pp. 8–9



Prof. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Foto: Fraunhofer IPK
Robert Bolz, M.Sc.
robert.bolz@ipk.fraunhofer.de
Tel. +49 30 / 39006-390

Dr.-Ing. Christoph Hein

Prof. Dr.-Ing. Julian Polte

Tobias Neuwald, M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
www.ipk.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Bernd Reinarz

EOS GmbH, Electro Optical Systems
Robert-Stirling-Ring 1
82152 Krailling / München

LIZENZ



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