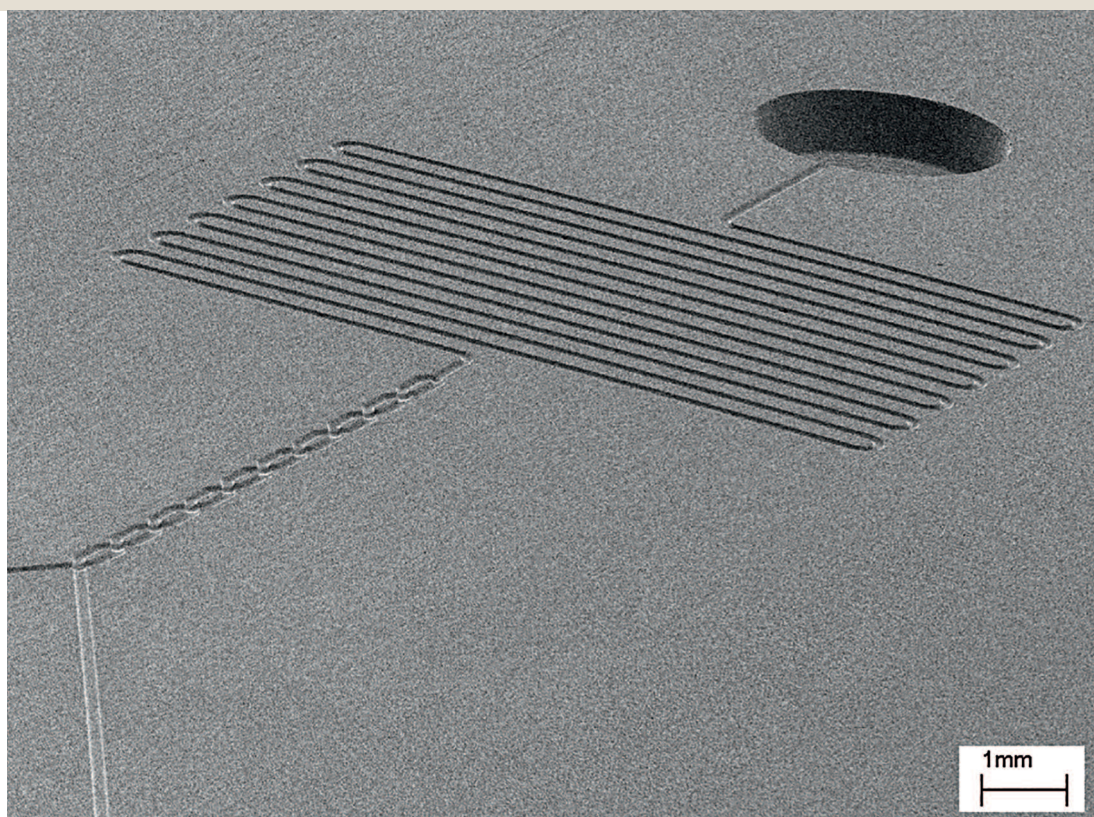


Elektrochemisches Abtragen im Freistrah

Das elektrochemische Abtragen mit geschlossenem elektrolytischen Freistrah (Jet-ECM) ermöglicht aufgrund hoher lokaler Stromdichten die Bearbeitung mit hohen **ABTRAGSRATEN**. Der Prozess lässt sich auch zum Mikrofräsen, -drehen und -strukturieren nutzen, ohne dass dazu aufwendige Formelektroden benötigt werden.

Bild 1. Mittels Jet-ECM hergestellter Mikroreaktor in Edelstahl 1.4541. Die Kanäle haben eine Breite von circa 200 µm und eine Tiefe von etwa 60 µm [2]



**ANDREAS SCHUBERT, ANDRÉ MARTIN,
MATIN YAHYAVI ZANJANI UND
MATTHIAS HACKERT-OSCHÄTZCHEN**

Das elektrochemische Abtragen mit geschlossenem elektrolytischen Freistrah (Jet-ECM) ist ein unkonventionelles Fertigungsverfahren zur Herstellung filigranter Strukturen [1]. Dabei kommen Elektrolytdüsen zum Einsatz, deren Bohrungsdurchmesser von wenigen Hundertstel Millimetern bis zu einem halben Millimeter reichen. Die Elektrolytlösung wird bei dieser Technik durch feine Düsen gepumpt, sodass sich ein geschlossener Elektrolytstrahl ausbildet, der mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 m/s auf dem Werkstück auftrifft. Wie bei alternativen elektrochemischen Abtragverfahren wird eine elektrische Spannung zwischen dem kathodischen

Werkzeug (der Elektrolytdüse) und dem Werkstück angelegt. Die gesamte für den elektrochemischen Abtrag benötigte Stromstärke ist beim Jet-ECM im Elektrolytstrahl gebündelt, sodass der Abtrag auf den Bereich des auftreffenden Elektrolytstrahls fokussiert ist. Auf diese Weise werden auf metallischen Oberflächen Mikrogeometrien abgetragen, ohne dass spezielle Maskierungen oder komplexe Formelektroden

> KONTAKT

INSTITUT
Technische Universität Chemnitz
Professur Mikrofertigungstechnik
09107 Chemnitz
Tel. +49 371 531-34580
www.tu-chemnitz.de/mb/MikroFertTech/

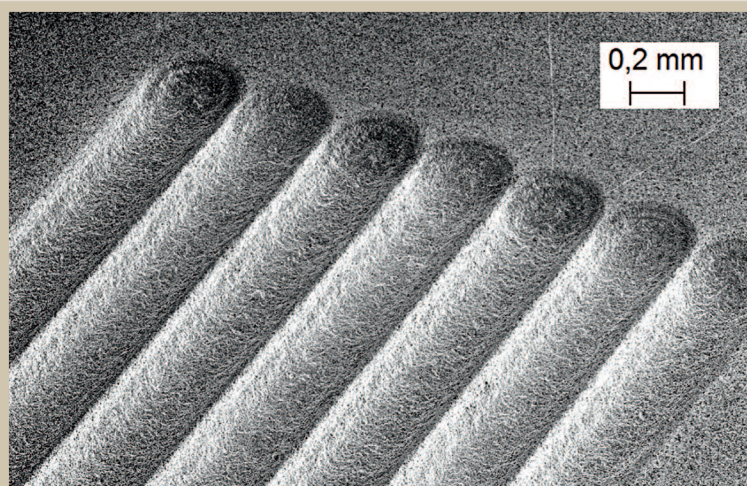


Bild 2. Jet-EC-bearbeiteter Bereich mit Mikrokanälen auf einer Werkstückoberfläche aus Hartmetall WC-Co6 [3]

erforderlich sind (**Bild 1**). Weil die mechanischen Materialeigenschaften eine untergeordnete Rolle spielen, können durch eine geeignete Wahl der Prozessparameter sogar Hartmetalle strukturiert werden (**Bild 2**).

Elektrochemisches Fräsen mit intelligenter Prozesssteuerung

Das Potenzial von Jet-ECM als mikroproduktionstechnischem Verfahren wird aktuell an der Professur Mikrofertigungstechnik der TU Chemnitz erforscht. Die Verwendung des geschlossenen elektrolytischen Freistrahls, der charakteristisch für das Verfahren Jet-ECM ist, ermöglicht die hochgradig lokalisierte, anodische Auflösung metallischer Werkstücke bei extrem hohen elektrischen Stromdichten. Durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Elektrolyts kann einfacher Gleichstrom appliziert werden, was gegenüber EC-Verfahren, die auf gepulstem Gleichstrom basieren, einen enormen Zuwachs an lokaler Abtragsrate ermöglicht. Durch die Steuerung der Düsenposition und die Regelung der elektrischen Stromstärke lassen sich anspruchsvolle Geometrien formgebend fertigen. Der Abtragbereich wird durch die Position und den Durchmesser des Elektrolytstrahls bestimmt. Eine aufwendige und kostenintensive Bemusterung von Formelektroden entfällt. Aktuell werden Düsen mit Durchmessern von 50 µm bis 500 µm in einer Abstufung von 50 µm eingesetzt.

In aktuellen Arbeiten werden tribologisch optimierte Oberflächen beispielsweise in Form von Kalotten strukturiert und Mikrokanäle für Mikrofluidik-Strukturen abgetragen (**Bild 3**). So wurden mit den verwendeten Jet-ECM-Parametern auf tribologisch optimierten Oberflächen Kalotten mit konstantem Durchmesser von circa 0,2 mm und Tiefen von 0,0 mm bis zu 0,1 mm bearbeitet. Unter Beachtung der Anzahl an Kalotten, die von wenigen Hundert bis zu mehr als zehntausend pro Oberfläche betrug, variierte die Bearbeitungszeit von wenigen Minuten bis zu mehreren Stunden. Für die Bearbeitung der Mikrofluidik-Struktur wurde eine Düsengeschwindigkeit von 9 mm/min verwendet, womit die dargestellten Kanaltiefen von 0,06 mm bei einer Kanalbreite von 0,2 mm realisiert wurden.

Zusätzlich werden prozessintegrierte Überwachungen des Arbeitsabstands zwischen der Elektrolytdüse und der Werkstückoberfläche beziehungsweise des elektrischen Potenzials entwickelt, die den resultierenden Materialabtrag maßgeblich beeinflussen. Wie in **Bild 4** dargestellt, führen Überlagerungen einzelner Bahnbearbeitungen zu lokalen Vertiefungen, die beispielsweise bei der Herstellung konstanter Kavitätsquerschnitte für Mikrofluidik-Anwendungen vermieden werden müssen. Zur Analyse der Überlagerungen wird die prozessspezifische elektrische Stromdichte gemessen und im



**IPG Fiber Laser
for Industrial
Applications**

ULTRAKURZPULS FASERLASER

Der UKP-Faserlaser YLPP-25-3-50-R von IPG mit Spitzenleistungen von mehr als 10 Megawatt ist ein vielseitiges Werkzeug für die Lasermaterialbearbeitung.

Metalle, Glas, Keramiken oder Halbleiter? Egal! Mit weniger als 3 Pikosekunden bearbeitet dieser Laser Materialien „kalt“.

Seine Kompaktheit ist einzigartig unter den UKP-Lasern: Der Laserkopf wiegt gerade einmal 1,5 kg.



www.ipgphotonics.com
sales.europe@ipgphotonics.com

The Power to Transform®

Bild 3. Jet-EC-Fräsen einer Mikrofluidik-Struktur

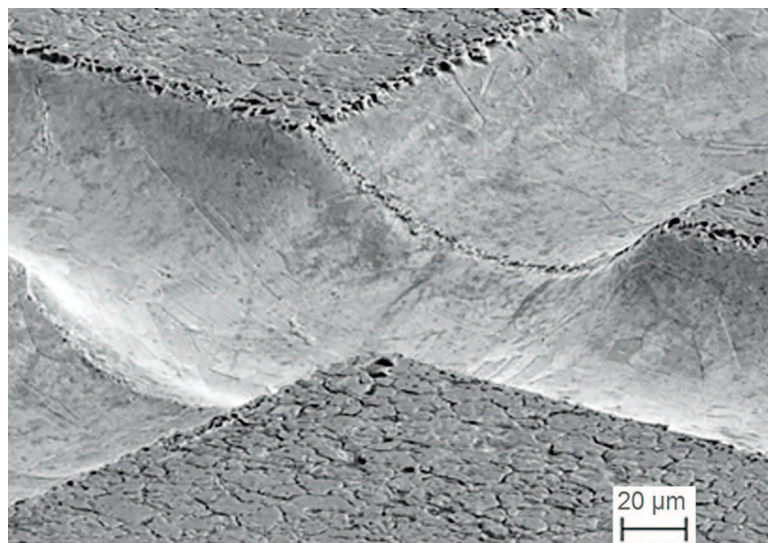
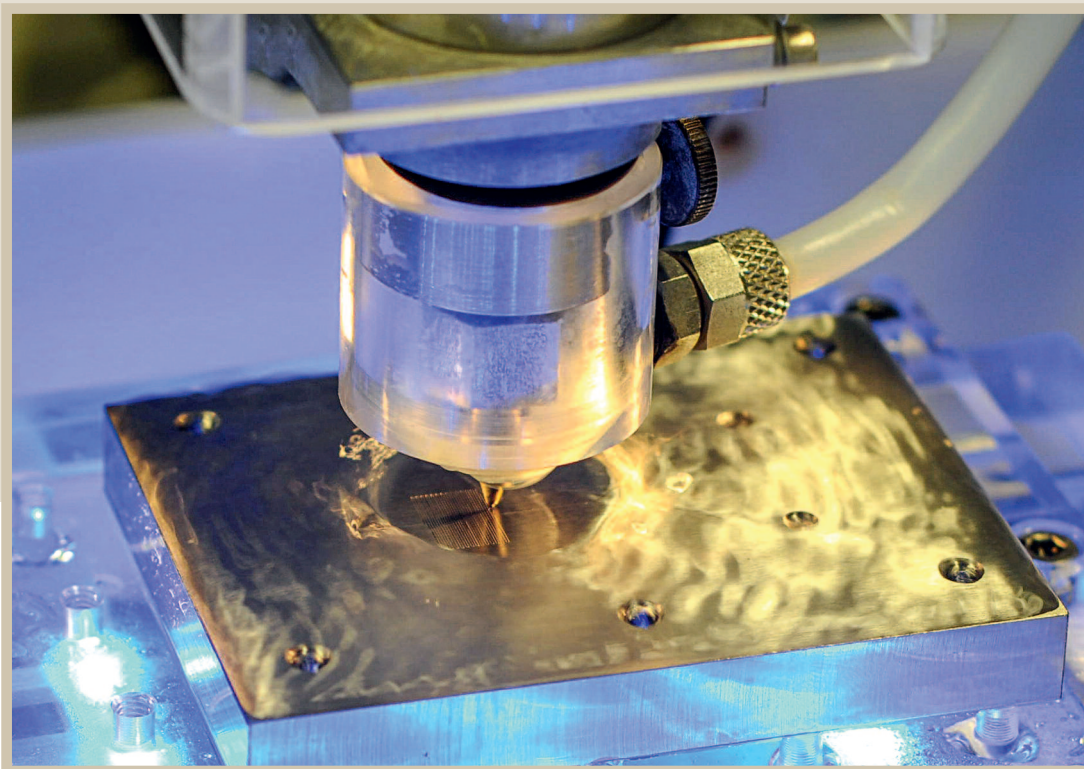
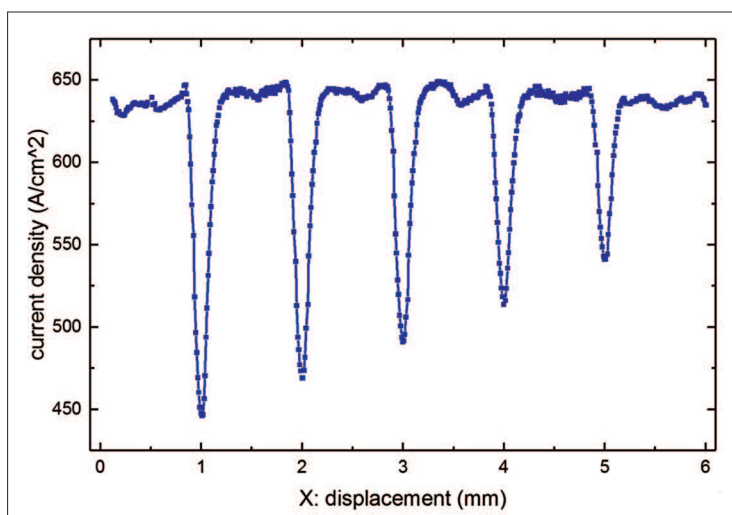


Bild 4. Detailansicht der bearbeiteten Mikrofluidikstruktur mit Überlagerungen der Einzelabträge in der Vermischungszone

Bild 5. Zeitverlauf der elektrischen Stromdichte beim Jet-EC-Abtragen von Mikrofluidik-kavitäten mit überlagerten Einzelabträgen



Prozess ausgewertet. In **Bild 5** ist der charakteristische Verlauf der Stromdichte beim Überqueren bereits abgetragener Mikrokanäle dargestellt. Die signifikanten Reduzierungen dienen zur Lokalisierung und Charakterisierung der vorhandenen Oberflächenabweichungen. Als eine Möglichkeit zur Regulierung des lokalen Materialabtrags wird aktuell eine Pulsweitenmodulation für die verwendete Gleichspannung entwickelt

Elektrochemisches Drehen mit Elektrolytstrahl

Durch die Adaption eines Drehantriebs wurde das Spektrum bearbeitbarer Werkstücke an der TU Chemnitz um rotationssymmetrische Geometrien erweitert (**Bild 6a**) [4]. Die Werkstücke werden mit einem hochpräzisen Sechsbuckenhalter gespannt,

um die erforderliche Abweichung von maximal circa 10 µm zu gewährleisten. Die für den elektrochemischen Abtrag benötigte elektrische Energie wird mithilfe eines Schleifkontakts übertragen. In **Bild 6b** sind beispielhafte Ergebnisse von Jet-EC-Drehbearbeitungen auf den Mantelflächen rotationssymmetrischer Werkstücke aus Edelstahl abgebildet. Um die Flexibilität des Verfahrens zu demonstrieren, wurden verschiedene Bearbeitungsstrategien angewendet. So wurden Kalotten ohne Düsenbewegungen während der Bearbeitung

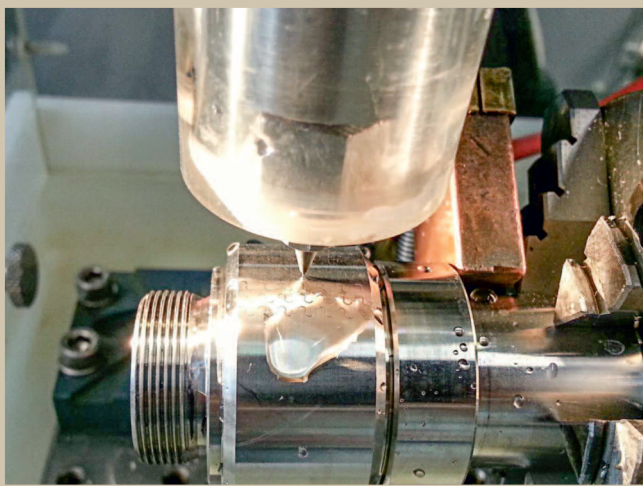


Bild 6a. Blick in den Arbeitsbereich des Set-ups für das Jet-EC-Drehen

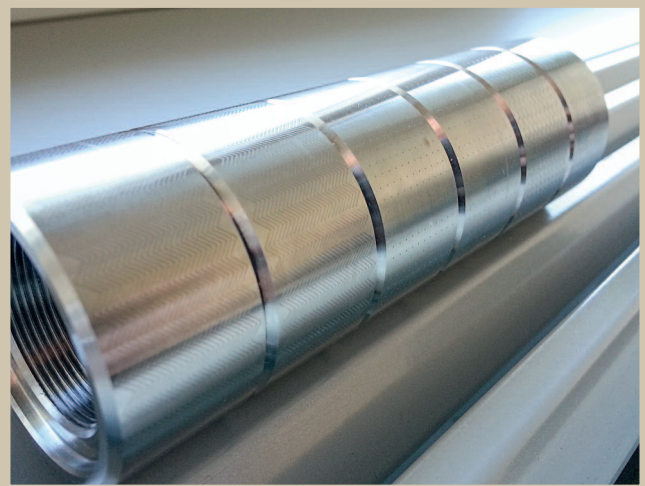


Bild 6b. Rotationssymmetrische Werkstücke aus Edelstahl nach der Bearbeitung durch Jet-EC-Drehen

abgetragen (**Bild 7**). Durch Überlagerung der Drehbewegung des Werkstücks mit ein- oder mehrdimensionalen Düsenbewegungen wurden zudem Kavitäten mit verschiedenen Verläufen erzeugt. Aufgrund der vernachlässigbaren Prozesskräfte auf das Werkzeug und des fehlenden Werkzeugverschleißes besitzt dieses Verfahren erhebliches Potenzial auch für die Bearbeitung gehärteter Stähle.

Die Forscher analysierten zudem die elementare Abtraggeometrie, die aus dem Jet-EC-Drehen ohne axiale Düsenbewegung resultiert [5]. Bei fehlendem Werkzeugvorschub ist dies mit dem konventionellen Einstechdrehen vergleichbar (**Bild 8a**). Die erzielten Abtragbreiten auf dem dargestellten Edelstahlwerkstück betragen konstant circa $75\text{ }\mu\text{m}$. Die Abtragtiefe wurde von circa $5\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Bearbeitungsdauer von 10 s auf etwa $20\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Bearbeitungsdauer von 40 s gesteigert. Die gemessene Linienrauheit liegt mit $R_z = 0,6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$ deutlich unterhalb der des unbearbeiteten Bereichs von $R_z > 1,6\text{ }\mu\text{m}$.

Zusätzlich analysierten die Forscher der TU Chemnitz die Abtraggeometrie, die sich beim Jet-EC-Drehen mit axialer Düsenbewegung einstellt – ein Verfahren, das dem konventionellen Runddrehen ähnelt. Durch die gezielte Anpassung der axialen Düsengeschwindigkeit an die Drehgeschwindigkeit des Werkstücks wurden Überlagerungen der Einzelabträge erzielt, mit denen Runddrehbearbeitungen realisiert wurden (**Bild 8b**). Die Abtragtiefen wurden von wenigen Mikrometern bis zu mehreren zehn Mikrometern variiert, um das Potenzial des Jet-EC-Drehens sowohl für die oberflächennahe Endbearbeitung als auch für die gezielte Mikrostrukturierung aufzuzeigen.

In dem dargestellten Beispiel wurde mit einer Düsengeschwindigkeit von $0,12\text{ mm/min}$ auf einer Bearbeitungslänge von 1 mm eine Abtragtiefe von $0,053\text{ mm}$ bei einer Linienrauheit von $R_z = 1,0\text{ }\mu\text{m}$ und einer Flächenrauheit von $S_z = 2,36\text{ }\mu\text{m}$ erzielt. Durch die Variation der linearen Düsengeschwindigkeit in axialer Richtung wurde das Verfahren

Precision Micro

**Schätzen Sie mal,
wie genau wir
arbeiten!**

+49 89 20 80 26 975
www.precisionmicro.de

Mit Ätztechnik können Metallteile produziert werden, wie Sie es nicht für möglich gehalten hätten.

Zum Beispiel ultraleichte, komplexe und stressfreie Komponenten bis zu $20\text{ }\mu\text{m}$ Genauigkeit – von nahezu jedem verfügbaren Metall.

Vergessen Sie wochenlange Änderungsschleifen mit hohen Werkzeuganpassungskosten: Mittels unserer digitalen Werkzeuge sind Anpassungen im Design innerhalb von Tagen realisierbar.

Von der Entwicklung in die Großserienproduktion ist der Schritt nahtlos, denn wir verwenden ein und dasselbe Werkzeug.

Wir sind der einzige Anbieter in Europa, der Titan ätzen kann.

Precision Micro: Wir liefern was andere Technologien nicht schaffen.



Bild 7. Detailansicht der abgetragenen Kalotten auf dem rotationssymmetrischen Werkstück

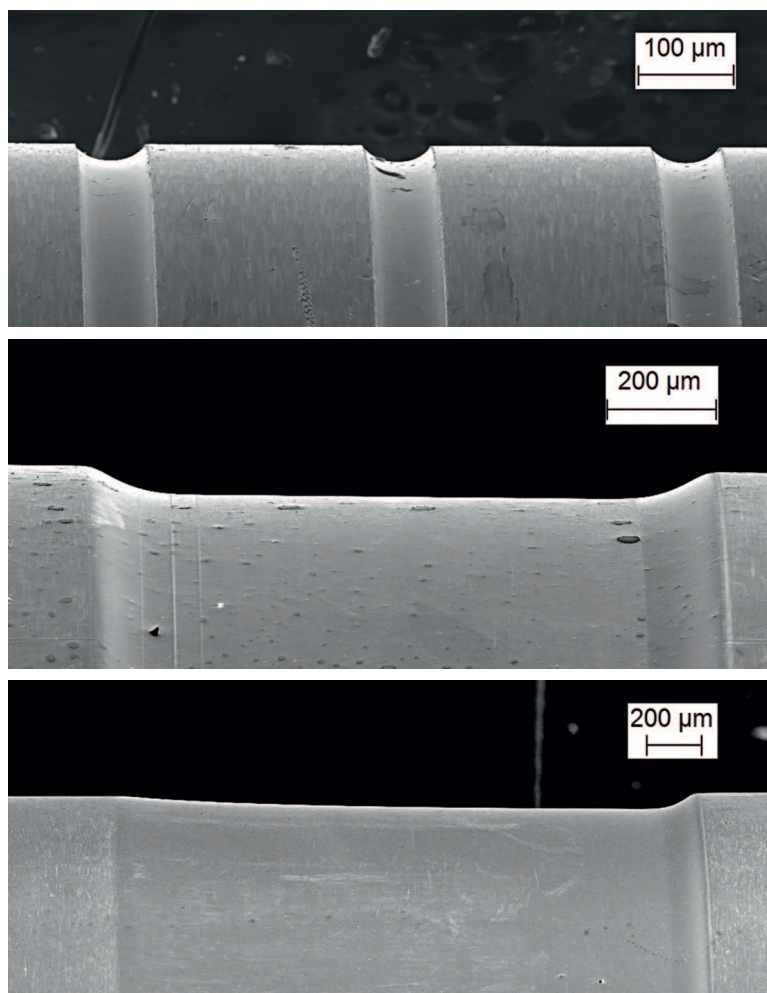
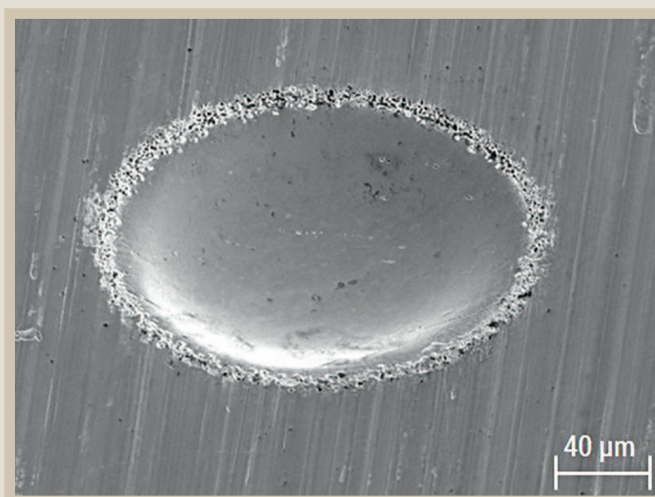


Bild 8. Bearbeitungsbeispiele für Jet-EC-Einstechdrehen (a), -Runddrehen (b) und -Profildrehen (c)

weiterentwickelt, sodass gezielte Abträge durch Jet-EC-Profildrehen realisiert werden können (**Bild 8c**). Durch lineare Reduzierung der Düsen-geschwindigkeit von 6 mm/min auf 0,15 mm/min über die Bearbeitungslänge von 2 mm wurde eine degressiv zunehmende Abtragtiefe von 0 mm auf 0,063 mm erzielt. Die Rauheit beträgt $R_a = 0,26 \mu\text{m}$ beziehungsweise $R_z = 0,59 \mu\text{m}$.

Materialspezifisches, selektives Jet-EC-Abtragen

Mithilfe des Verfahrens Jet-ECM können gezielt metallische Beschichtungen von elektrisch nichtleitfähigen Substraten entfernt werden (**Bild 9**). Dabei bleiben die elektrisch nicht leitfähigen Beschichtungen unbeeinflusst, da der Abtrag prozessbedingt automatisch beim Erreichen des elektrisch isolierenden Substrats endet. Es treten weder thermische noch mechanische Beeinflussungen des Substrats auf. Durch prozessintegrierte Messung des Stromflusses und die darauf basierende Regelung des Arbeitsabstands wurden Abweichungen aufgrund von Welligkeiten kompensiert. Somit konnte das vergleichsweise großflächige Substrat mit dem prozessspezifischen Arbeitsabstand im Bereich von einem zehntel Millimeter bearbeitet werden, ohne Beschädigungen an der Düse durch Funkentladungen zu verursachen.

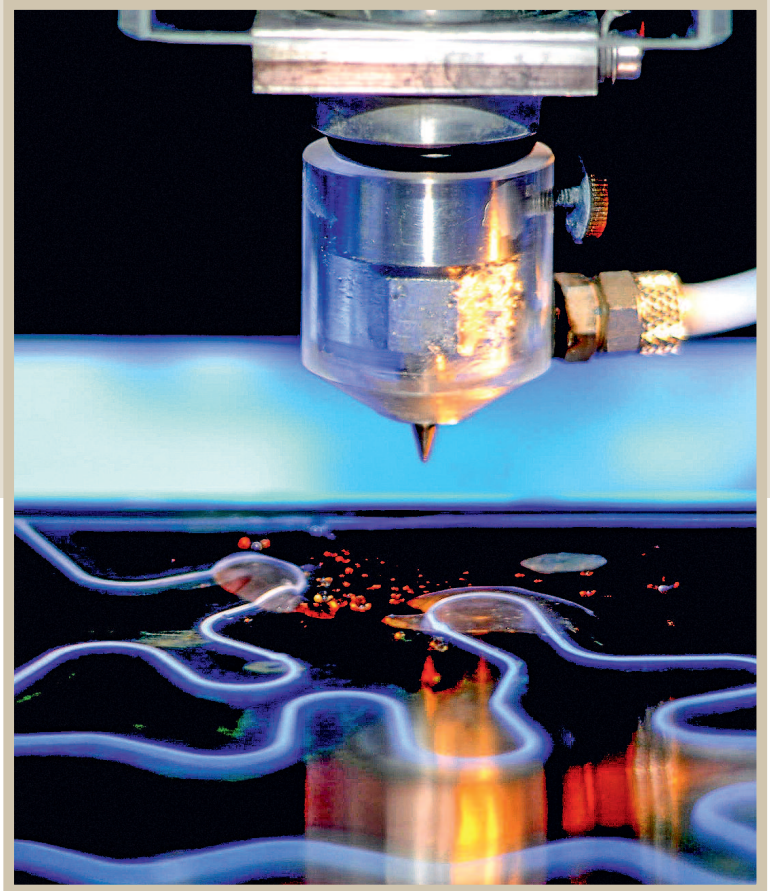
Die Zukunft von Jet-ECM

Aktuelle Forschungsschwerpunkte konzentrieren sich auf die Weiterentwicklung der Jet-ECM-Technologie zur Implementierung des Prozess-Fingerabdrucks und der darauf basierenden Prozessautomatisierung. Zur Ermittlung des Fingerabdrucks werden Multi-physiksimulation des Abtragprozesses und Messungen prozessspezifischer Parameter durchgeführt. Maschinenintegrierte Erfassungen des elektrochemischen Abtrags dienen zur Verifizierung des Fingerabdrucks. Das Ziel ist die μm -genaue Herstellung von Kavitäten, die beispielsweise in Mikrospritzgussformen zum Einsatz kommen. ■ MI110573

Danksagung

Die Arbeiten zum elektrochemischen Fräsen mit intelligenter Prozesssteuerung werden aktuell im Rahmen des innovativen Trainingsnetzwerks H2020-MSCA-ITN-2015 „MICROMAN“ erforscht, das unter der Bewilligungsnummer 674801 von der EU gefördert wird. Zahlreiche Arbeiten zum elektrochemischen Drehen mit Elektrolytstrahl wurden im Rahmen der DFG-Sachbeihilfe mit dem Geschäftszeichen SCHU 1484/11-2 realisiert.

Bild 9. Mit Jet-ECM selektiv abgetragene metallische Beschichtung auf einem transparenten Kunststoffsubstrat für die Solarindustrie



AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. ANDREAS SCHUBERT ist Leiter der Professur Mikrofertigungstechnik der Technischen Universität Chemnitz und Leiter des Kompetenzzentrums Mikrofertigungs- und Oberflächentechnologien – KoMOT; andreas.schubert@mb.tu-chemnitz.de

Dipl.-Ing. ANDRÉ MARTIN ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Leiter der Lehr- und Forschungsgruppe Abtragende Verfahren und Fertigungseinrichtungen der Professur Mikrofertigungstechnik der Technischen Universität Chemnitz; andre.martin@mb.tu-chemnitz.de

MATIN YAHYAVI ZANJANI, M.Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur Mikrofertigungstechnik der Technischen Universität Chemnitz; martin.yahyavi-zanjani@mb.tu-chemnitz.de
PD Dr.-Ing. habil. Dipl.-Phys. MATTHIAS HACKERT-OSCHÄTZCHEN ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Oberingenieur Forschung der Professur Mikrofertigungstechnik der Technischen Universität Chemnitz; matthias.hackert@mb.tu-chemnitz.de

LITERATUR

- 1 Hackert, M.: Entwicklung und Simulation eines Verfahrens zum elektrochemischen Abtragen von Mikrogeometrien mit geschlossenem elektrolytischen Freistrahle (Dissertation). In: Schubert, A. (Hrsg.): Scripts Precision and Microproduction Engineering, Band 2. Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2010, ISBN 978-3-937524-95-5. Link zum Onlineshop des Verlags: www.verlag-wiss-scripten.de
- 2 Hackert-Oschätzchen, M.; Meichsner, G.; Zinecker, M.; Martin, A.; Schubert, A.: Micro Machining with Continuous Electrolytic Free Jet. In: Precision Engineering, Volume 36, Issue 4, October 2012, S. 612-619, DOI: 10.1016/j.precisioneng.2012.05.003
- 3 Martin, A.; Eckart, C.; Lehnert, N.; Hackert-Oschätzchen, M.; Schubert, A.: Generation of Defined Surface Waviness on Tungsten Carbide by Jet Electrochemical Machining with Pulsed Current. In: Procedia CIRP, 3rd CIRP Conference on Surface Integrity, Volume 45, 2016, S. 231-234, DOI:10.1016/j.procir.2016.02.076

- 4 Martin, A.; Hackert-Oschätzchen, M.; Lehnert, N.; Schubert, A.: Analysis of the removal geometry in electrochemical straight turning with continuous electrolytic free jet. In: Proceedings of the 13th International Symposium on ElectroChemical Machining Technology, Publication Series Applied Electrochemistry in Material Science, Editors: Michaelis, A.; Schneider, M., Vol. 6, 2017, S. 81-87, ISBN 978-3-8396-1261-3
- 5 Martin, A.; Hackert-Oschätzchen, M.; Lehnert, N.; Schubert, A.: Analysis of the fundamental removal geometry in electrochemical profile turning with continuous electrolytic free jet. In: Procedia CIRP, Volume 68, 2018, S. 466-470, DOI:10.1016/j.procir.2017.12.085



Ihr Partner für Präzisionsoptik & optische Systeme.

SPECTROS AG 4107 Ettingen Schweiz Tel. +41 61 726 20 20

www.spectros.ch

SPECTROS
OPTICAL SYSTEMS