

Strömungscharakterisierung im Spalt beim magnetfeldüberlagerten elektrochemischen Abtragen

Flow Characterization within the Working Gap in Electrochemical Machining with Superimposed Magnetic Field

Fabian Luther¹, Ingo Schaarschmidt², Andreas Schubert² und Markus Richter¹

¹ Technische Thermodynamik, Technische Universität Chemnitz, D-09107 Chemnitz

² Mikrofertigungstechnik, Technische Universität Chemnitz, D-09107 Chemnitz

Magnetohydrodynamik, stereo PIV, Geschwindigkeitsfelder, Elektrochemisches Abtragen
Magnetohydrodynamic, stereo PIV, Velocity fields, Electrochemical machining

Kurzfassung

Elektrochemisches Abtragen weist ein großes Potential auf den steigenden Bauteilanforderungen hinsichtlich Komplexität und Effizienz und den damit verbundenen Herausforderungen an die genutzten Fertigungsverfahren gerecht zu werden. Aktuelle Forschungsarbeiten zeigen, dass die Überlagerung der Bearbeitungszone mit einem Magnetfeld einen positiven Einfluss auf den Abtragprozess haben kann und so bestehende Verfahrensgrenzen erweitert werden können. Um ein tieferes Verständnis über die zugrundeliegenden Wirkmechanismen hinter dieser bisher eher weniger betrachteten Einflussgröße zu erhalten, soll die Auswirkungen der Magnetfeldüberlagerung auf die vorherrschenden Prozesse beim elektrochemischen Abtragen auf verschiedenen Längenskalen untersucht werden. Dazu wurden in dieser Arbeit optische Untersuchungen mittels stereo Particle Image Velocimetry in einer auf die Millimeter-Größenordnung hochskalierten Analysezelle durchgeführt, um die resultierende Elektrolytströmung zu charakterisieren. Diese Zelle erlaubt in situ Messungen direkt im Arbeitsspalt zwischen Kathode (Werkzeug) und Anode (Werkstück) bei laufender Bearbeitung. Es konnte ein signifikanter Einfluss der elektromagnetischen Felder auf die auftretenden mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und die zugrundeliegenden Geschwindigkeitsfelder nachgewiesen werden. Hierbei ist vor allem die Ausbildung einer starken Wirbelströmung innerhalb des Arbeitsspalt hervorzuhoben. Diese kann im Wesentlichen auf die wirkende Lorentzkraft zurückgeführt werden. Die experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit sollen zur Validierung zukünftige magnetohydrodynamischer Simulationsmodelle dienen, welche perspektivisch als Schnittstelle zwischen der Mikro- und Millimeter-Größenordnung fungieren sollen. Weiterhin sind verschiedene Folgemessungen mit Parametervariationen auf dieser und anderen Längenskalen geplant, um den Einfluss der einzelnen Prozessgrößen auf das elektrochemische Abtragen bestmöglich zu untersuchen.

Einleitung

Steigende Anforderungen bezüglich Bauraumbedarf, Effizienz und Funktionalität von Bauteilen führen zu steigenden Ansprüchen an die entsprechenden Fertigungsverfahren. Das elektrochemische Abtragen (eng. electrochemical machining - ECM) und dessen Variationen, wie dem gepulste elektrochemische Abtragen, weisen dabei ein hohes Potential auf diesen Herausforderungen gerecht zu werden. Dabei kann z.B. die Werkzeuggeometrie (Kathodengeo-

metrie), die Bearbeitungsspannung, Pulsfrequenz und dauer oder auch der verwendete Elektrolyt gezielt an die Anforderungen des zu bearbeitenden Werkstücks hinsichtlich Präzision und resultierenden Oberflächeneigenschaften angepasst werden. Einen unkonventionelleren Ansatz stellt die Überlagerung der Prozesszone mit einem stationären externen Magnetfeld dar. In der Literatur wurde bereits gezeigt, dass ein solches Magnetfeld positive Auswirkungen auf den ECM-Prozess haben kann. Beispielsweise nimmt die Abtragrate bei sonst gleichen Bearbeitungsparametern zu und die resultierende Oberflächenrauigkeit wird reduziert (siehe Bradley 2018a, Bradley und Samuel. 2017 und 2018b). Außerdem kann die Bearbeitung selbst besser lokalisiert werden, da durch das Magnetfeld der Streustrom um die Kathode reduziert wird. Damit finden weniger Sekundärabträge außerhalb der Hauptbearbeitungszone statt, was zu einer besseren Geometrieabbildung des Werkzeugs führt (siehe Tang und Gan. 2014). Weiterhin hat das Magnetfeld einen signifikanten Einfluss auf das Strömungsverhalten des Elektrolyten. Besonders an der Werkstückoberfläche (Anodenoberfläche) bilden sich in Folge der durch die Magnetfeldüberlagerung induzierten Lorentzkraft Wirbelströmungen um lokale Oberflächenstrukturen wie Rauheitsspitzen aus (siehe Qian und Bau. 2005, Coey und Hinds. 2002). Dies ist exemplarisch in der Detailansicht des Prozessschemas links unten in Abb. 1 dargestellt. Als Folge kann es neben einem schnelleren Ablösen von entstehenden Reaktionsgasblasen und einer Reduktion der passivierenden Schichten an der Oberfläche auch zu einem verbesserten Abtransport von im Elektrolyt mitgeführten Abtragprodukten aus der Prozesszone und dem Arbeitsspalt kommen.

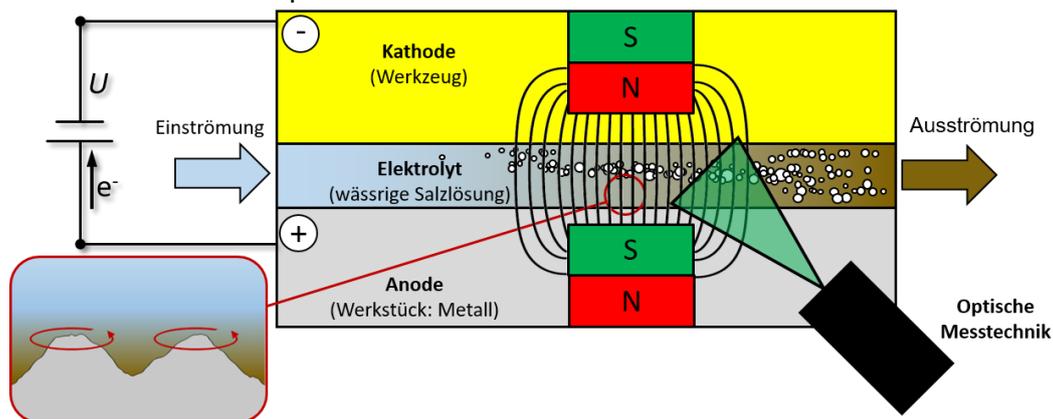


Abb. 1: Schematische Darstellung des elektrochemischen Abtragprozesses mit überlagertem Magnetfeld. Die Detailansicht zeigt durch das Magnetfeld resultierende Wirbelströmungen um Oberflächenstrukturen wie Rauheitsspitzen. Die Dunkelfärbung des Elektrolyten beschreibt qualitativ die Erhöhung der Konzentration mitgeführten Abtrag- und Reaktionsprodukte. Mittels optischer Messtechnik wird das Geschwindigkeitsfeld im Arbeitsspalt (zwischen Werkzeug und Werkstück) in situ bestimmt.

Ziel ist es daher die zugrundeliegenden Wirkmechanismen durch Experimente weiter zu untersuchen und mittels geeigneter Simulationsmethoden zu beschreiben. Dafür wurden von Frotscher et al. 2022 bereits Voruntersuchungen in einem oktaedrischen Elektrolytbehälter mit gegenüberliegenden Elektroden und einem senkrecht dazu ausgerichteten Magnetfeld durchgeführt. Dieser Versuch lieferte die Grundlage für erste Simulationen und zeigte, dass Particle Image Velocimetry (PIV) als optisches Messverfahren geeignet ist um den Einfluss des Magnetfelds anhand des veränderten Strömungsfeldes zu untersuchen. In der vorliegenden Arbeit sollen nun, aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen, Experimente unter dem ECM stärker angenäherten Prozessbedingungen durchgeführt werden. Dafür wurde eine optisch zugängliche Analysezelle mit hochskaliertem Arbeitsspalt (Bereich zwischen Anode und Kathode) konstruiert, die nachfolgend genauer vorgestellt wird. Mittels stereo PIV werden in situ 3D-Strömungsfelder im Arbeitsspalt aufgenommen (siehe Schema in Abb. 1), die zur Validierung von magnetohydrodynamischen Simulationen des MECM Prozesses genutzt werden.

Experimenteller Aufbau

Für die experimentellen Untersuchungen des veränderten Strömungsverhaltens des Elektrolyten mittels optischer Messmethoden, musste eine geeignete Analysezelle ausgelegt werden (siehe Abb. 2). Eine der wichtigsten Randbedingungen war dabei die optische Zugänglichkeit des Arbeitsspalts. Hierfür wurde ein Arbeitsabstand von 10 mm zwischen Kathode und Anode gewählt. Die Breite und Länge des Spalts wurde auf $b = 20$ mm und $l = 50$ mm festgelegt, womit sich eine effektive Bearbeitungsfläche von 10 cm^2 ergibt. Die Elektroden sind als wechselbare Platten, bestehend aus der paramagnetischen Aluminiumlegierung AW-5083, ausgeführt, die gleichzeitig als Abdeckungen der herausnehmbaren Magnettaschen (Werkstoff AW-5083) dienen. Letztere sind beidseitig vom Arbeitsspalt angeordnet und werden mit Permanentmagneten (NdFeB N45) zur Aufbringung eines möglichst homogenen Magnetfeldes über der Prozesszone bestückt. Die Analysezelle selbst besteht aus Polyoxymethylen (POM) mit Sichtfenstern aus Acrylglas. Über die kleineren Fenster an den Frontseiten wird dabei ein Laserschnitt in den Arbeitsspalt gelegt, so dass die beleuchtete Strömung mittels geeigneter Kamertechnik durch die Scheiben an den Längsseiten betrachtet werden kann. Dieser experimentelle Aufbau ist in Abb. 3 gezeigt. Es werden zwei CCD Kameras mit Scheimpflugadaptoren (VC-Imager CX-5, LaVision) und vorgeschalteten Objektiven (AF Nikkor 50 mm 1:1,8D, Nikon) auf beiden Seiten der Analysezelle platziert und die Beleuchtung mittels eines Nd: YAG Lasers (nano L PIV, Litron Lasers) realisiert. Durch diese Kameraanordnung sind die einfallenden Lichtintensitäten für beide Kameras annähernd identisch, was sich positiv auf die resultierenden Aufnahmen auswirkt. Alternativ können mit dem Messaufbau zukünftig auch Shadowgraphy Messungen durchgeführt werden. Dafür wird eine der beiden Kameras frontal vor dem Sichtfenster platziert (siehe alternative Kameraposition in Abb. 3) und die Beleuchtung erfolgt durch eine gegenüberliegende Blitzlichtlampe.

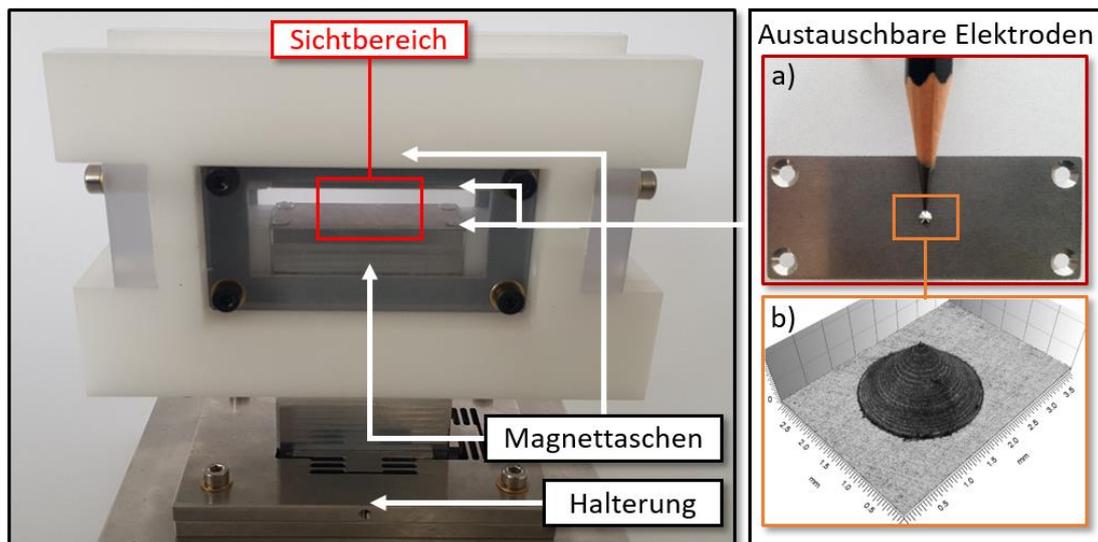


Abb. 2: Foto der verwendeten Analysezelle. Die wechselbaren Elektroden können wie in a) gezeigt definierte Strukturen aufweisen (beispielhaft im Größenvergleich mit einer Bleistiftspitze), an denen die Magnetfeldauswirkungen auf das Strömungsverhalten des Elektrolyten untersucht werden können. Ansicht b) zeigt die lichtbildmikroskopische Aufnahme einer solchen hochskalierten Rauheitsspitze.

Zur Realisierung der Durchströmung, besitzt die Analysezelle einen Fluid Ein- und Auslass vor bzw. hinter dem Arbeitsspalt, die in der Schnittdarstellung in Abb. 3 zu erkennen sind (graue Kreise innerhalb der Analysezelle). Diese sind als abgewinkelte Kanäle senkrecht zur Spaltströmungsrichtung ausgeführt. Weiterhin sind an diesen Stellen $100\ \Omega$ Platin Widerstandsthermometer (PR-23, Omega) eingebracht, mit denen die Temperatur des Elektrolyten

vor und nach der Prozesszone über einen Datenlogger (2638A Hydra Series III, Fluke) ermittelt wird. Der aufgebrauchte Elektrolytvolumenstrom kann variabel und weitestgehend pulsationsfrei mittels einer Schlauchpumpe (Perimax 16, Spetec) eingestellt werden. Diese fördert unverbrauchten Elektrolyten aus dem ersten Elektrolytbehälter (Tank 1) in die Analysezelle und nach Durchlaufen des Arbeitsspalts in den Auffangbehälter (Tank 2) für den verbrauchten Elektrolyten.

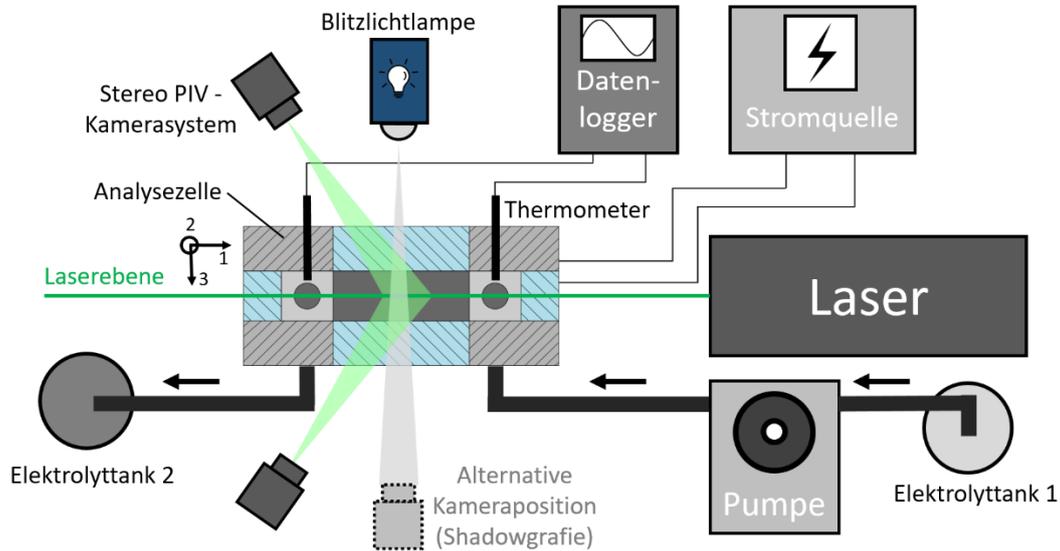


Abb. 3: Schematische Übersicht über den experimentellen Aufbau des Versuchsstandes mit der Analysezelle in Schnittdarstellung. Die Abbildung zeigt sowohl die Kameraanordnung für stereo PIV, als auch hellgrau gestrichelt die alternative Anordnung für Shadowgraphy Aufnahmen.

Ergebnisse

Für den Vergleich zwischen Experiment und Simulation mussten im ersten Schritt geeignete Prozessparameter festgelegt werden. Hierfür wurde eine Dimensionsanalyse der magnetohydrodynamischen Spaltströmung durchgeführt und charakteristische Kennzahlen ermittelt, die das Strömungsverhalten beschreiben. Dabei wurde eine Oberflächenstruktur auf der Elektrode in Form einer hochskalierten Rauheitsspitze als Strömungshindernis angenommen. Für die Parameterauswahl waren dann vor allem jene Kennzahlen relevant, die den Einfluss des Magnetfeldes bzw. der Lorentzkraft beschreiben. Diese sind wie folgt definiert:

$$\pi_1 = \frac{B \cdot J \cdot L}{u^2 \cdot \rho} \quad \pi_2 = \frac{B \cdot J \cdot L^2}{u \cdot \eta} = \pi_1 \cdot Re_{micro} \quad Re_{micro} = \frac{u \cdot \rho \cdot L}{\eta}$$

Dabei ist B die magnetische Flussdichte, J die elektrische Stromdichte, L die charakteristische Länge eines Strömungshindernisses (in unserem Falle die Höhe einer hochskalierten Rauheitsspitze), u die mittlere Hauptströmungsgeschwindigkeit sowie ρ und η jeweils die Dichte und die dynamische Viskosität des Elektrolyten. Die Reynoldszahl Re_{micro} ist dabei ein Maß für das Verhältnis zwischen Trägheits- und Zähigkeitskraft (bzw. Reibkraft), während π_1 das Verhältnis zwischen Lorentzkraft und Trägheitskraft und π_2 zwischen Lorentzkraft und Zähigkeitskraft beschreibt. Für die hier gezeigten Experimente wurde eine wässrige Lösung mit 9,5 m% NaNO_3 mit $\rho = 1052,5 \text{ kg/m}^3$ und $\eta = 10,42 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ als Elektrolyt verwendet. Diese Lösung wurde zur besseren Visualisierung der Strömung mit Glashohlkugel (Partikeldurchmesser: $(8 - 12) \mu\text{m}$, Partikeldichte: $(1050 - 1150) \text{ g/cm}^3$) als Partikel versetzt. Weiterhin wurde die Höhe der hochskalierten Rauheitsspitze für eine gute Sichtbarkeit durch die Kameras auf $L = 0,75 \text{ mm}$ festgelegt. Die verbleibenden Prozessparameter B , J und u wurden so eingestellt,

dass sie zum einen die technischen Spezifikationen der Schlauchpumpe und der Prozessstromquelle berücksichtigen und zum anderen die resultierenden dimensionslosen Kennzahlen π_1 und π_2 Werte größer 1 annehmen. Letztere Bedingung beschreibt eine Parameterkombination in der die Lorentzkraft einen dominanten Einfluss auf die resultierende Strömung hat, wodurch der Magnetfeldeinfluss leichter erfasst werden kann. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die identifizierten Prozessparameter auch für die hier gezeigten Messungen mit ebenen Elektroden ohne Strömungshindernis (skalierte Rauheitsspitze) genutzt. Nachfolgend sind die verwendeten Prozessparameter aufgelistet:

Tab. 1: Übersicht der für die gezeigten Experimente genutzten Prozessparameter.

$\eta / \text{Pa}\cdot\text{s}$	$\rho / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	I / A	$J / \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	B / T	$u / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\dot{V} / \text{ml}\cdot\text{s}^{-1}$
$10,42\cdot 10^{-4}$	1052,5	0,01	0,001	0,1	0,000165	0,027

Mit $\pi_1=129,25$ und $\pi_2=7,27$

Zur Aufbringung eines möglichst homogenen Magnetfeldes wurden zwei Permanentmagneten (NdFeB N45, mittlere mag. Flussdichte auf Oberfläche: 0,25 T) verwendet. Diese wurden mit Abstandshaltern so in den Magnettaschen platziert, dass durch die Überlagerung der beiden Einzelmagnetfelder ein über den Arbeitsspalt weitestgehend konstantes Gesamtmagnetfeld mit $B = 0,1 \text{ T}$ erzielt wurde. Dies wurde mittels des Magnetfeldmessgerätes (PCE-MFM 3000-ICA, PCE Instruments™) überprüft. Der für die Bearbeitung notwendige Strom wird durch eine variable Konstantstromquelle (EA-PSI 5080-20 A, EA-Elektro-Automatik GmbH) bereitgestellt. Diese ist über die Halterung der Analysezelle und die Magnettaschen an die Elektroden angeschlossen. Der während der Bearbeitung tatsächlich fließende Strom wird dabei mit einem Strommessgerät überwacht. Es ist zu erwähnen, dass unter den hier genannten Bearbeitungsparametern aufgrund der geringen elektrischen Stromdichte von ca. $0,001 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ keine signifikanten Materialabträge an der Anode zu erwarten sind. Somit können die Elektroden länger verwendet werden und zu untersuchende Oberflächenstrukturen werden nicht innerhalb des betrachteten Zeitraums abgetragen.

Für die Kalibrierung des stereo PIV Systems wurde eine transparente Mikrokalibrierplatte (LaVision) mit einem Punktdurchmesser von 0,15 mm und einem Punktabstand von 0,5 mm verwendet. Durch Entfernen der oberen Magnettasche, kann diese direkt in die Lichtschnittebene der mit Elektrolyt gefüllten Analysezelle platziert werden, was eine in situ Kalibrierung des Messsystems erlaubt. Für die Kalibrierung in Tiefenrichtung (Depth of Field, kurz DOF) werden zusätzliche Bilder mit einer definierten Verschiebung der Analysezelle aufgenommen. Die genaue Positionierung wurde dabei durch eine einachsige Mikrotranslationsstage (LaVision) realisiert. Die Objektiv- und Blendeneinstellungen, Laserpulsdauern und Belichtungszeiten wurden nach den Empfehlungen des Herstellers (LaVision) eingestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nachfolgend vier relevante Parameterkombinationen (Fälle) untersucht. Betrachtet wurde das Strömungsverhalten für eine reine Elektrolytströmung ohne Bearbeitung (Fall A), eine Durchströmung der Analysezelle mit elektrischem Feld (Fall B, konventioneller ECM Prozess) und für elektromagnetische Felder (MECM) ohne und mit Durchströmung (Fall C und D). Für die Messungen wurden jeweils 900 Bilder innerhalb von 90 Sekunden Prozesszeit aufgenommen. Die nachfolgend gezeigten Ergebnisse wurden nach einer Messzeit von ungefähr 45 Sekunden ausgewertet. Zu diesem Zeitpunkt waren keine Einschwingerscheinungen mehr zu erkennen und die Strömung war noch nicht zu stark mit sich über der Zeit akkumulierenden Reaktionsgasblasen, die eine Auswertung erschweren würden, überlagert. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 gezeigt.

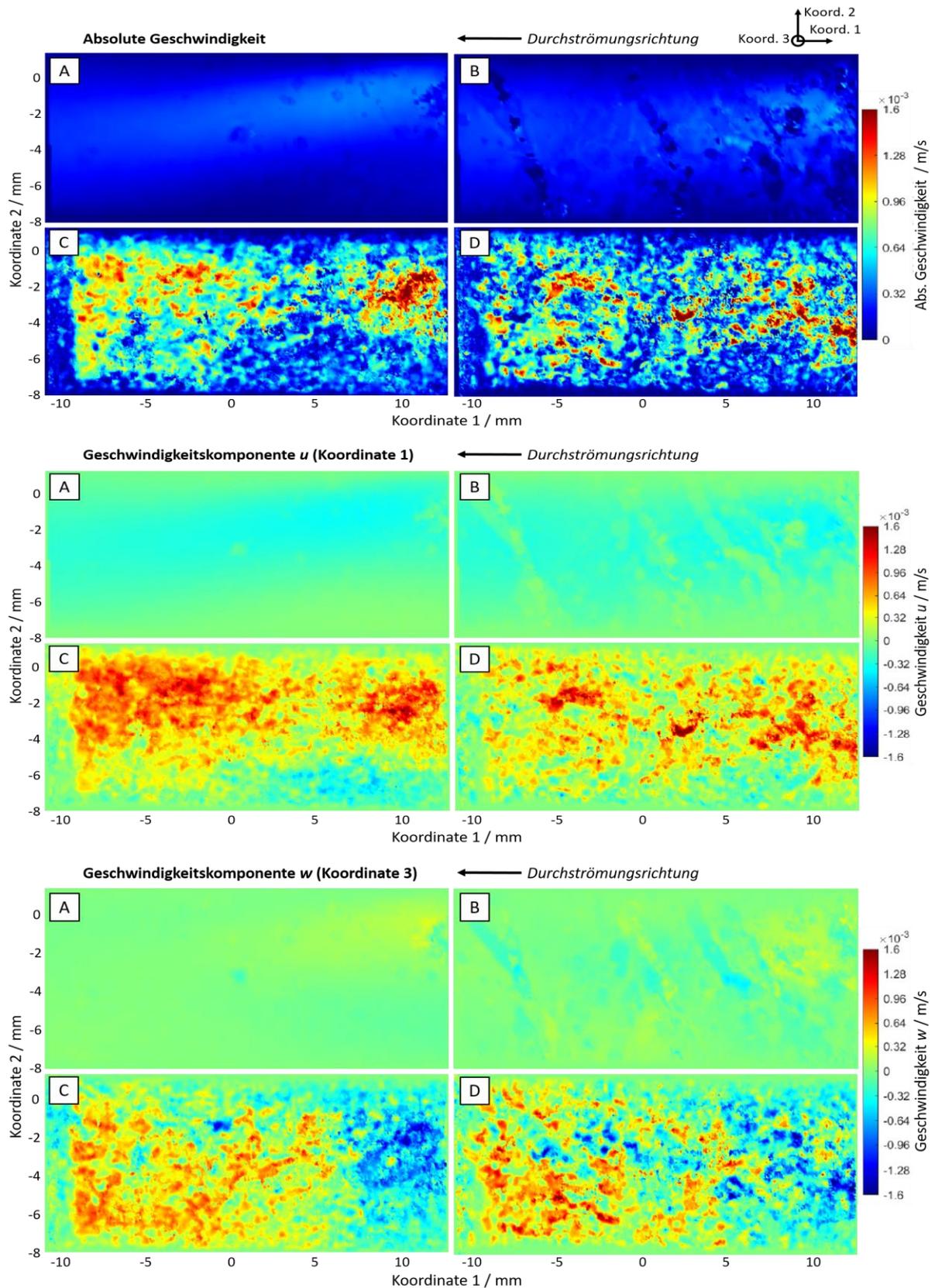


Abb. 4: Mittels stereo PIV gemessene Geschwindigkeitsfelder des Elektrolytstroms im Arbeitsspalt. Dargestellt sind die absoluten Geschwindigkeiten und die Geschwindigkeitskomponenten u (Koordinate 1) und w (Koordinate 3) für vier Parameterkombinationen: A (reine Durchströmung), B (elektrisches Feld mit überlagerter Durchströmung), C (elektromagnetisches Feld ohne Durchströmung), D (elektromagnetisches Feld mit Durchströmung).

In Abb. 4 sind dabei die absoluten Geschwindigkeiten und die Geschwindigkeitskomponenten u und w für die verschiedenen Parameterkombinationen (Fälle A – D) gezeigt. Die in Koordinatenrichtung 2 auftretenden Geschwindigkeiten v sind vernachlässigbar klein und daher nicht dargestellt. Der Elektrolyt strömt in negative Koordinatenrichtung 1 (siehe Pfeil für Durchströmungsrichtung in Abb. 4), was sich an den für die Fälle A und B negativen u Werten erkennen lässt (reine Durchströmung und Durchströmung mit elektrischem Feld). Für diese Fälle sind die beiden weiteren Geschwindigkeitskomponenten v und w weitestgehend Null, mit Relikten von aufsteigenden Reaktionsgasblasen in Fall B. Es ist deutlich zu erkennen, dass das in den Fällen C und D vorliegende elektromagnetische Feld in Folge der Magnetfeldüberlagerung einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Elektrolytströmung hat. Im Vergleich zu den Fällen A und B liegen hier deutlich höhere absolute Geschwindigkeiten vor und die Hauptströmung (u) wechselt, in Fall D sogar entgegen der aufgebrauchten Elektrolytspülung, ihre Richtung. Weiterhin ist, anhand der auf der einen Seite positiven und auf der anderen Seite negativen w -Geschwindigkeitskomponente, eine Wirbelbildung mit Rotationsachse in Koordinatenrichtung 2 zu erkennen auf die nachfolgend noch genauer eingegangen wird. Basierend auf der großen Ähnlichkeit der Geschwindigkeitsfelder für die Fälle C und D lässt sich ableiten, dass die aufgebrauchte Elektrolytspülung keinen dominanten Einfluss auf das resultierende Strömungsverhalten aufweist. Quantitativ kann die Auswirkung des Magnetfeldes auch anhand der mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Fälle bewerten werden. Diese wurden jeweils über mehrere Sekunden ausgewertet und die Ergebnisse sind in Abb. 5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich durch das elektromagnetische Feld für die Fälle C und D deutlich höhere mittlere Geschwindigkeiten als für die Fälle A und B einstellen. Letztere Fälle weisen dabei annähernd gleiche Geschwindigkeiten auf, da die Bearbeitung und die aufsteigenden Gasblasen nur einen geringen Einfluss auf die dominante Hauptströmungsgeschwindigkeit u durch die Elektrolytspülung haben. Die geringfügig niedrigeren Geschwindigkeiten in Fall D im Vergleich zu Fall C, resultieren aus der unterschiedlichen Strömungsrichtung der Durchspülung und der sich in Folge des Magnetfeldes ausprägenden Strömung (Fall C).

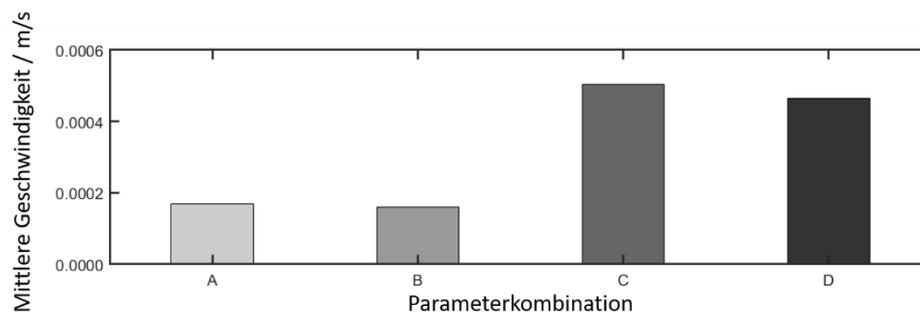


Abb. 5: Mittlere Geschwindigkeiten der Strömungsfelder für die vier verschiedenen Parameterkombinationen: A (reine Durchströmung), B (elektrisches Feld mit überlagerter Durchströmung), C (elektromagnetisches Feld ohne Durchströmung), D (elektromagnetisches Feld mit Durchströmung).

Zur weiterführenden Untersuchung des in Abb. 4 gezeigten Strömungsverhaltens und der sich ausprägenden Wirbelströmung, wurde nachfolgend eine Reihe von Messungen mit Messebenen an verschiedenen Positionen in Koordinatenrichtung 3 (Tiefenrichtung) durchgeführt. Realisiert wurde diese definierte Verschiebung der Analysezelle mittels Mikrotranslationsstage. In Abb. 6 sind die Einzelmessungen in der Draufsicht (Koordinate 1 – Koordinate 3 – Ebene) nebeneinander dargestellt. Die Vektoren beschreiben dabei mit ihrer Länge und Ausrichtung die Strömungsrichtung und Geschwindigkeit an den jeweiligen Punkten. Zusätzlich ist die Geschwindigkeitskomponente w als Falschfarbendarstellung der Vektoren gezeigt. Auch wenn die einzelnen Messungen nacheinander aufgenommen wurden und damit leicht unterschied-

liche Randbedingungen aufweisen, kann durch die Aneinanderreihung eine qualitative Aussage über das Strömungsfeld in Tiefenrichtung gemacht werden. Es sind deutlich die entstehende Wirbelströmung in der Koordinate 1 – Koordinate 3 - Ebene im Arbeitsspalt und die unterschiedlichen Hauptströmungsrichtungen (Geschwindigkeitskomponente u) zu erkennen. Die in Abb. 4 dargestellten Messungen können somit einer leicht in positive Koordinatenrichtung 3 verschobenen Messebene zugeordnet werden.

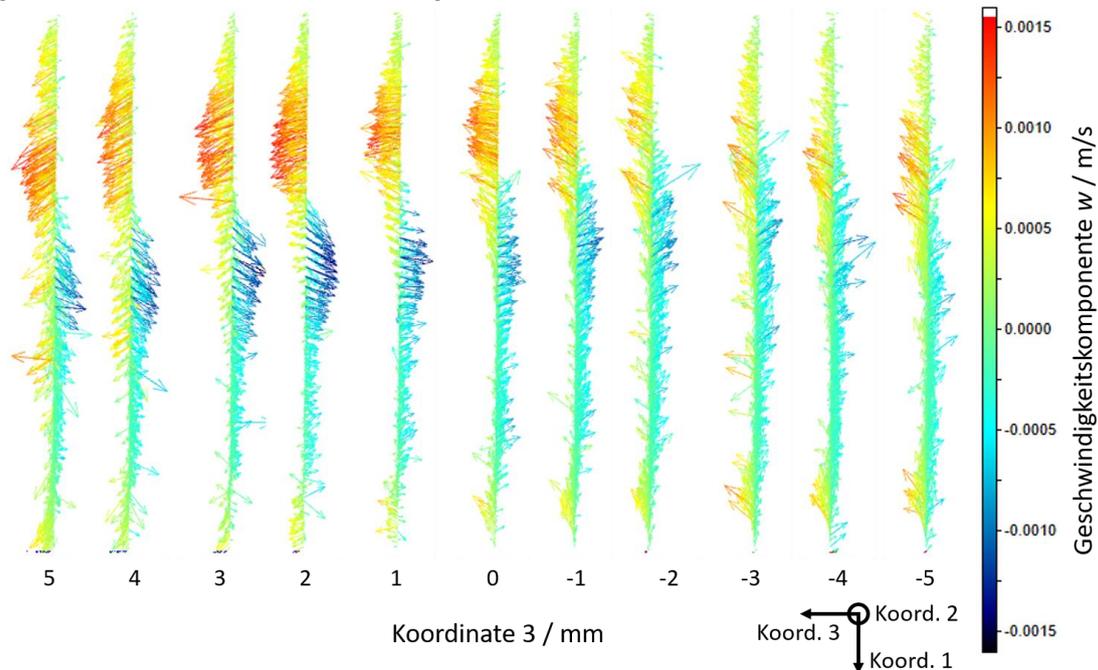


Abb. 6: Mittels stereo PIV gemessene Geschwindigkeitsfelder des Elektrolytstroms im Arbeitsspalt mit überlagerter Strömung und elektromagnetischem Feld (Fall D). Gezeigt sind 11 individuelle Messungen von Sichtebenen mit unterschiedlichen Tiefenpositionen in der Draufsicht (Koord. 1 – Koord. 3 – Ebene). Die Ausrichtung und Länge der Vektoren zeigt dabei die Richtung und absolute Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeitskomponente w (Koordinate 3) ist als Falschfarbendarstellung dargestellt.

Im Rahmen der geplanten Forschungsarbeiten sollen die hier gezeigten experimentellen Ergebnisse zur Validierung von magnetohydrodynamischen Simulationen des Strömungsverhalten im Arbeitsspalt dienen. Außerdem sollen die Untersuchungen auf verschiedene Elektrodenoberflächen, Stromstärken sowie Ausrichtungen und Stärken des Magnetfeldes erweitert werden, um so die zugrundeliegenden Wirkmechanismen besser charakterisieren zu können.

Literatur

- Frotscher, O., Schaarschmidt, I., Lauwers, D. et al., 2022:** Investigation of Lorentz force–induced flow of NaNO_3 -electrolyte for magnetic field–assisted electrochemical machining. *Int J Adv Manuf Technol*, 121, 937–947
- Tang, L., Gan, W.M, 2014:** Experiment and simulation study on concentrated magnetic field-assisted ECM S-03 special stainless steel complex cavity. *Int J Adv Manuf Technol*, 72, 685–692
- Bradley, C., Samuel, J, 2017:** MHD Electrolyte Flow within an Inter-electrode Gap Driven by a Sinusoidal Electric Field and Constant Magnetic Field. *Proceedings of the 2017 COMSOL Conference*. p. 7
- Bradley, C., 2018a:** Anodic Dissolution Model Parameterization for Magnetically-Assisted Pulsed Electrochemical Machining (PECM). In: *Proceedings of the 2018 COMSOL Conference*. p. 7
- Bradley, C., Samuel, J, 2018b:** Controlled Phase Interactions Between Pulsed Electric Fields, Ultrasonic Motion, and Magnetic Fields in an Anodic Dissolution Cell. *J. Manuf. Sci. Eng.* 140
- Coey, M., Hinds, G, 2002:** Magneto-electrolysis - the effect of magnetic fields in electrochemistry. In: *5th International Pamir Conference*. pp. 1–7
- Qian, S., Bau, H, 2005:** Magneto-hydrodynamic stirrer for stationary and moving fluids. *Sensors Actuators B Chem*, 106, 859–870