

Zeitaufgelöste 3D3C Geschwindigkeitsfeldmessungen mit der fernmikroskopischen Astigmatismus PTV zur Analyse der elektrochemischen Kupferabscheidung

3D3C velocityfield measurements during the electrochemical copper deposition by long-range microscopic astigmatism PTV

C. Cierpka¹, K. Tschulik², R. Segura¹, M. Uhlemann², C.J. Kähler¹

1) Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

2) Institut für Metallische Werkstoffe, IFW Dresden, Helmholtzstraße 20, 01069 Dresden

3D PTV, Astigmatismus, Elektrochemie, volumetrische Geschwindigkeitsmessung

3D PTV, astigmatism, electrochemistry, volumetric velocity measurement

Zusammenfassung

Durch die Überlagerung der Lorentzkraft und der Magnetfeldgradientenkraft kann es bei der elektrochemischen Kupferabscheidung unter dem Einfluss eines externen Magnetfeldes zu sehr komplexen dreidimensionalen Strömungen kommen. Da der messtechnische Zugang häufig beschränkt ist, wurde für die Untersuchung dieser Strömungen für ausgewählte Konfigurationen die fernmikroskopische 3D Astigmatismus PTV Methode erstmals zur Geschwindigkeitsmessung angewendet. Der große Vorteil dieser Messtechnik ist, dass die volumetrische Erfassung des Geschwindigkeitsfeldes mit einer einzigen Kamera erfolgt. Im Gegensatz zu anderen volumetrischen Messtechniken ist kein komplexes Kamerasystem notwendig und das Verfahren arbeitet sehr zuverlässig. Über einen Kalibrieransatz, der auf die gemessenen Daten selbst zurückgreift, konnte das komplette Geschwindigkeitsfeld mit einer Präzision rekonstruiert werden, wie sie sonst nur mit aufwendigen Mehrkamerasystemen realisiert werden kann. Durch die zeitlich äquidistante Abtastung gelang es, Partikelbahnen über einen längeren Zeitraum zu verfolgen und Beschleunigungen zu ermitteln, sowie das instationäre Anlaufverhalten der elektrochemischen Reaktion im Strömungsfeld nachzuweisen.

Einleitung

Bei der elektrochemischen Kupferabscheidung unter dem Einfluss eines externen Magnetfeldes, können durch die Überlagerung von elektrischem Feld und magnetischem Feld Lorentzkraften induziert werden, die eine Strömung antreiben [1]. Dadurch wird der Stofftransport zu den Elektroden intensiviert, was als magnetohydrodynamischer Effekt bezeichnet wird [2]. Je nach Ausrichtung der Felder und der Geometrie der Elektrolysezelle können sich sehr komplexe dreidimensionale Strömungen ausbilden [3]. Bei starken Gradienten im Magnetfeld kann zusätzlich eine andere Volumenkraft, die Magnetfeldgradientenkraft, eine ähnliche Größenordnung wie die Lorentzkraft erreichen. Erst kürzlich wurde beobachtet, dass bei der elektrochemischen Abscheidung von Kupfer in heterogenen Magnetfeldern strukturierte Schichten abgeschieden werden können. Die resultierenden Strukturen entsprechen den der Arbeitselektrode überlagerten Magnetfeldgradienten und können nicht mit der Lorentzkraft erklärt werden [4]. Es wird vermutet, dass diese Strukturierungen aus einer durch die Magnetfeldgradientenkraft hervorgerufener Strömung resultieren. Eine experimentelle Prüfung dieser Annahme gibt es bisher jedoch nicht.

Um die Einflüsse der unterschiedlichen Volumenkräfte analysieren zu können, ist die zeitaufgelöste Messung der elektrodennahen Strömung mit hoher örtlicher Auflösung notwendig. Zweidimensionale Geschwindigkeitsmessungen hoher örtlicher Auflösung bei gleichzeitig

großem Arbeitsabstand können beispielsweise mit einem Fernmikroskop durchgeführt werden [5]. Die Beobachtung mit einem Fernmikroskop bietet sich auch hier an, da die optische Zugänglichkeit der Elektrolysezelle eingeschränkt ist. Um mit nur einem optischen Zugang die dreidimensionale Strömung zu erfassen, wurde das sogenannte Astigmatismus PTV Verfahren genutzt. Bei dieser Technik werden durch das Einbringen einer Zylinderlinse in den Strahlengang der Abbildungsoptik die Partikelbilder entsprechend ihrer Tiefenposition im Messvolumen optisch verzerrt. Mittels einer Kalibrierfunktion kann anschließend aus den zweidimensionalen Partikelbildern die dreidimensionale Verteilung im Volumen berechnet werden. Über einen Tracking Ansatz kann damit die Geschwindigkeit und Partikeltrajektorie ermittelt werden. Diese Messtechnik wurde bereits in der Mikrofluidik erfolgreich qualifiziert [6] und für stark dreidimensionale Strömungen eingesetzt [7,8]. Für die aktuellen Untersuchungen wurde das Verfahren hier erstmals mit einem Fernmikroskop gekoppelt.

Messprinzip und Kalibrierung

Wie bei anderen PTV Verfahren wird die Geschwindigkeit über die Ortsverschiebung von Partikeln in der Strömung im Zeitintervall Δt ermittelt. Um nun in den zweidimensionalen Kamerabildern die Tiefenposition, also den Abstand in Beobachtungsrichtung kodieren zu können, macht man sich die defokussierte Abbildung der Partikel zu nutze. Der Durchmesser des Partikelbildes d_I kann nach Gleichung (1) berechnet werden [9], wobei M für die optische Vergrößerung steht, λ für die Wellenlänge des Lichtes und d_p für den Partikeldurchmesser.

$$d_I = \sqrt{M^2 d_p^2 + 5.95(M+1)^2 \lambda^2 f^{\#2} + \frac{M^2 z^2 D^2}{(s_0 + z)^2}} \quad (1)$$

$f^{\#}$ bezeichnet die F-Zahl der Beobachtungsoptik, $s_0 \gg z$ den Abstand der Fokusebene zur ersten Hauptebene und D den Linsendurchmesser. Der Abstand zur Fokusebene ist z . Durch die Bestimmung des Partikelbilddurchmessers kann somit der Abstand von der Fokusebene ermittelt werden, jedoch nicht ob sich das Partikel davor oder dahinter befindet. Wird eine Zylinderlinse gemäß Abb. 1 (links) in die Beobachtungsoptik eingefügt, entstehen zwei voneinander getrennte Fokusebenen F_{xz} und F_{yz} . Je nach Position des Partikels im Messvolumen weist sein elliptisches Abbild typische Halbachsen a_x und a_y auf, deren Verlauf nach Gleichung (1) über dem Abstand z auf der linken Seite von Abb. 1 dargestellt ist.

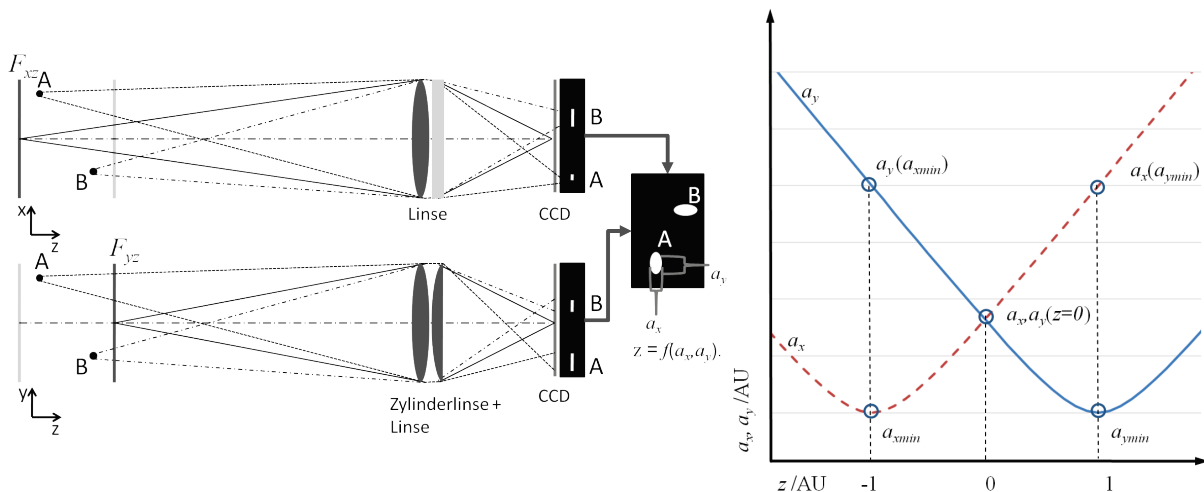


Abb. 1: Prinzipskizze der Tiefenkodierung (links). In der xz -Ebene (links oben) wirkt nur eine Linse, in der yz -Ebene (links unten) verkürzt sich der Abstand der Fokusebene zum Objektiv, da die Brechkraft der Zylinderlinse in dieser Richtung wirkt. Die Partikelbilder erscheinen je nach Tiefenposition unterschiedlich verzerrt. Dimensionslose Darstellung der Partikelbildbreite a_x und -höhe a_y über der Tiefenposition z nach Gleichung (2) (rechts).

Vereinfacht man Gleichung (1) und wendet sie auf Partikelbildbreite und -höhe an, so können a_x und a_y wie folgt dargestellt werden.

$$a_x = \sqrt{a_{\min x}^2 + C_x(z - z_{ax \min})^2} \quad a_y = \sqrt{a_{\min y}^2 + C_y(z - z_{ay \min})^2} \quad (2)$$

Mit diesen beiden Gleichungen ist eine eindeutige Zuordnung der Tiefenposition für ein Partikelbild möglich. Der Verlauf der Breite und Höhe über der dimensionslosen Tiefenposition ist in der rechten Grafik in Abb. 1 dargestellt und kann z.B. durch Scannen von an der Wand anhaftenden Partikeln in Tiefenrichtung gewonnen werden. Dies war hier nicht möglich, da für das untersuchte System kaum Partikel an der Wand anhafteten. Da eine Kalibrierung durch Scannen in der Tiefenposition also nicht möglich war, wurde die Kalibrierfunktion zunächst dimensionslos anhand der tatsächlich gemessenen Daten ermittelt. Dazu wurden $a_{\min x}$ und $a_{\min y}$ und die zugehörigen Werte $a_x(a_{\min y})$ und $a_y(a_{\min x})$ bestimmt, wobei $z_{ax \min}$ und $z_{ay \min}$ auf -1 bzw. $+1$ gesetzt wurde. Zusätzlich wurde a_x und a_y für $z = 0$ ermittelt. Damit ist es möglich die Konstanten C_x und C_y zu bestimmen. Für ein Wertepaar a_x und a_y können damit die vier oder zwei Lösungen aus Gleichung (2) berechnet werden. Die zwei sich am nächsten liegenden Werte für z wurden als tatsächliche dimensionslose z -Position gemittelt.

Mit der Linsenkonfiguration wie sie hier verwendet wurde, konnte sichergestellt werden, dass jeweils das gesamte Volumen in Tiefenrichtung vermessen wurde. Das Maximum und Minimum der dimensionslosen Werte für die Tiefenposition können also mit der Tiefe der Küvette (10 mm) skaliert werden. Mit dieser Vorgehensweise war es möglich trotz kleiner Änderungen in der Position der Küvette, ohne aufwendige Kalibrierprozeduren die Tiefenposition der Partikel zu bestimmen. Über einen „Nächsten Nachbar“-Algorithmus wurden schließlich zusammengehörende Partikelbilder für unterschiedliche Zeitpunkte zu Trajektorien zusammengefügt und die dreidimensionalen Partikelbahnen rekonstruiert.

Experimenteller Aufbau

Für die hier vorgestellten Ergebnisse wurde Kupfer aus einer wässrigen 0.01 molaren Kupfersulfatlösung auf der Arbeitselektrode abgeschieden. Der Elektrolyt enthielt weiterhin 0,1 mol/l Natriumsulfat als Leitsalz und der pH-Wert wurde mit Schwefelsäure auf 3 eingestellt. Der experimentelle Aufbau ist in Abb. 2 (links) schematisch dargestellt. Um den optischen Zugang von einer Seite zu ermöglichen, wurden die Messungen in einer Küvette aus optischem Glas in einem Volumen von $10 \times 10 \times 8 \text{ mm}^3$ durchgeführt. Dazu wurde der Boden der Küvette abgesägt und die Arbeitselektrode aus Gold wurde auf einen dünnen Glasträger aufgedampft und als Bodenplatte eingeklebt, wie in Abb. 2 auf der rechten Seite zu erkennen ist.

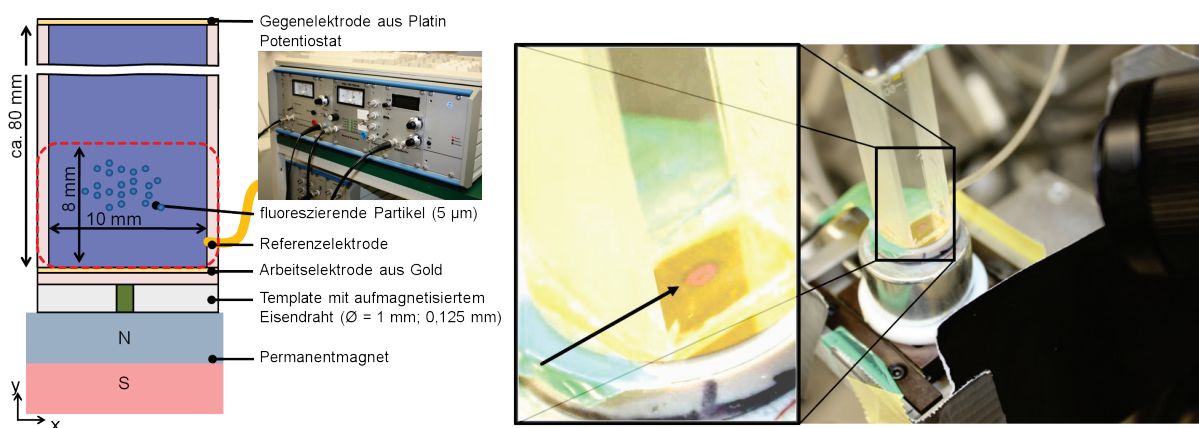


Abb. 2: Skizze des experimentellen Aufbaus in der optischen Küvette mit Arbeitselektrode, Magnet und Templat mit Eisendraht (links). Örtlich stärkere Kupferabscheidung an der Arbeitselektrode über dem Eisendraht aufgrund der Magnetfeldgradientenkraft (rechts).

Als Gegenelektrode diente eine Deckplatte aus Platin. Durch diese Elektrodenanordnung wurde gewährleistet, dass die primären Feldlinien des elektrischen Feldes parallel zueinander sind und nur in y -Richtung verlaufen. Zur Erzeugung des Magnetfeldgradienten wurden zwei verschiedene Template genutzt, die jeweils aus einem in Epoxidharz fixierten Eisendraht ($d =$

1 mm bzw. 0,125 mm, $l = 2$ mm) bestanden. Die Aufmagnetisierung während der Experimente erfolgte mit Hilfe eines direkt dahinter platzierten NdFeB Permanentmagneten ($d = 25$ mm, $l = 20$ mm).

Von der Seite wurde nahe der Arbeitselektrode ein Loch in die Küvette gebohrt um eine Referenzelektrode (gesättigte Quecksilber/Quecksilbersulfatelektrode, MSE, $E^\circ = 650$ mV gg. Standardwasserstoffelektrode) anzubringen und gleichzeitig zum Geschwindigkeitsfeld den Strom bei konstantem Potential messen zu können. Das Potential zwischen Arbeits- und Gegenelektrode wurde über einen Potentiostaten (Firma Jaissle) gesteuert. Für die Strömungsuntersuchungen wurden zwei verschiedene Potentiale gewählt: -800 mV und -500 mV gg. MSE. Bei -800 mV erfolgt die Kupferabscheidung massenkontrolliert, d.h. ein vermehrter Stofftransport zur Elektrode erzeugt eine erhöhte Abscheidung. Bei -500 mV findet die Kupferabscheidung nur in geringem Umfang und ladungskontrolliert statt. Ein erhöhter Stofftransport zur Elektrode hat daher kaum Einfluss auf die abgeschiedene Kupfermenge.

Als Lichtquelle wurde ein cw-Laser mit einer Leistung von 1W verwendet, dessen Ausgangsstrahlung über eine Faseroptik in das Messvolumen eingekoppelt wurde. Voruntersuchungen mit Polyamidpartikeln ($d_p = 5$ -100 μm) haben gezeigt, dass aus Partikelverklumpungen und Abweichungen der Partikelform von einer Kugel, Unsicherheiten für die Tiefenbestimmung resultieren. Silberbeschichtete Glasholkugeln lieferten deutlich bessere Ergebnisse, jedoch ist der Hintergrund durch Reflexionen sehr stark. Um Reflexionen am Glaskörper und an der Elektrode vollständig zu vermeiden, wurde mit fluoreszierenden Partikeln mit einer Größe von 5 μm gearbeitet. Kleinere Partikel lieferten ein zu geringes Signal zu Rauschverhältnis und größere sanken in der Kupfersulfatlösung ab. Bei Absetzversuchen zeigten sich die verwendeten Partikel als nahezu auftriebsneutral. Um die Einflüsse der Lorentzkraft und der Magnetfeldgradientenkraft beurteilen zu können, wurde die Arbeitselektroden Dicke, der Durchmesser des Eisendrahtes, und das angelegte Potential variiert. Zusätzlich wurde die Anordnung mehrere Eisendrähte untersucht. Die Beobachtung erfolgte mit einem Infinity K2 Fernmikroskop mit einem Abbildungsmaßstab von 1,35. Die Brennweite der verwendeten Zylinderlinse betrug 150 mm. Die Partikelbilder wurde zeitlich äquidistant mit 4 Hz über 11 Minuten mit einer Sensicam QE, der Firma PCO abgetastet. Die anschließende Bildvorverarbeitung erfolgte mit DaVis 7.2 der Firma LaVision. Die Partikelbildbreite und -höhe wurde über Autokorrelation, die Position in der xy -Ebene über einen Wavelet-Algorithmus ermittelt [6]. Die anschließende Rekonstruktion der Partikelbahnen gibt die komplette Topologie und die zeitliche Entwicklung der Strömung wider. Zur besseren Darstellung wurden die PTV Daten auf ein kartesisches Gitter interpoliert. Die Gitterweite beträgt hier $\Delta x \approx \Delta z \approx \Delta y \approx 500 \mu\text{m}$.

Ergebnisse

In der Mitte der Abb. 2 ist deutlich der Einfluss des unter der Elektrode platzierten Eisendrahtes zu sehen, dessen inhomogene Magnetfeldverteilung zu einem komplexen Strömungsverhalten und damit zu einer veränderten Abscheidung führt

Die zeitgemittelte dreidimensionale Topologie der Strömung bei einem Potential von -800 mV mit einer Gradientenelektrode ($d = 0,125$ mm) ist in Abb. 3 sehr deutlich zu erkennen. Hier sind auf der linken Seite die Trajektorien der Partikel dargestellt. Eingefärbt sind diese mit der Geschwindigkeitskomponente in y -Richtung. Auf der rechten Seite sind Isoflächen von v und eine Ebene in der Elektrolysezelle mit den Vektoren der Geschwindigkeit in der xz -Ebene dargestellt. Deutlich im Zentrum zu erkennen ist eine Staustahlströmung auf die Elektrode zu. Durch diesen Strahl wird ständig frische Kupfersulfatlösung an die Elektrode geführt. Aus Gründen der Kontinuität kommt es in den Ecken zu einer Aufwärtsströmung der nun leichteren abgereicherten Kupfersulfatlösung.

Durch die Abscheidung des Kupfers an der Arbeitselektrode, verarmt die Lösung lokal an Kupferionen, die Dichte sinkt. Durch den Auftrieb entsteht so eine natürliche Konvektionsströmung. Diese wird von einer Rotationsströmung durch die Lorentzkraft überlagert. Die Überlagerung dieser beiden Phänomene würde einer Rotationsströmung über festem Grund nach Bödewadt [10] entsprechen (Teetassenströmung). Mit zunehmendem Radius reicht die Zentrifugalbeschleunigung nicht mehr aus, den durch Reibung verursachten Drehimpulsverlust auszugleichen und es kommt zu einer Strömung auf das Zentrum zu (Ansammeln der

Teeblätter in der Mitte der Tasse). Durch die Wirkung der Magnetfeldgradientenkraft in Richtung Arbeitselektrode im Zentrum, kann sich die Teetassenströmung nicht einstellen. Es etabliert sich eine komplexe dreidimensionale Strömung die sich durch eine Strahlströmung auf das Zentrum der Elektrode bei gleichzeitig überlagerter Rotation auszeichnet. Dadurch wird im Bereich des Eisendrahtes immer frische Lösung an die Arbeitselektrode geführt. Die gesteigerte Kupferabscheidung ist auf der Goldschicht deutlich zu erkennen (Abb. 2 zeigt dies für einen Draht mit 1 mm Durchmesser).

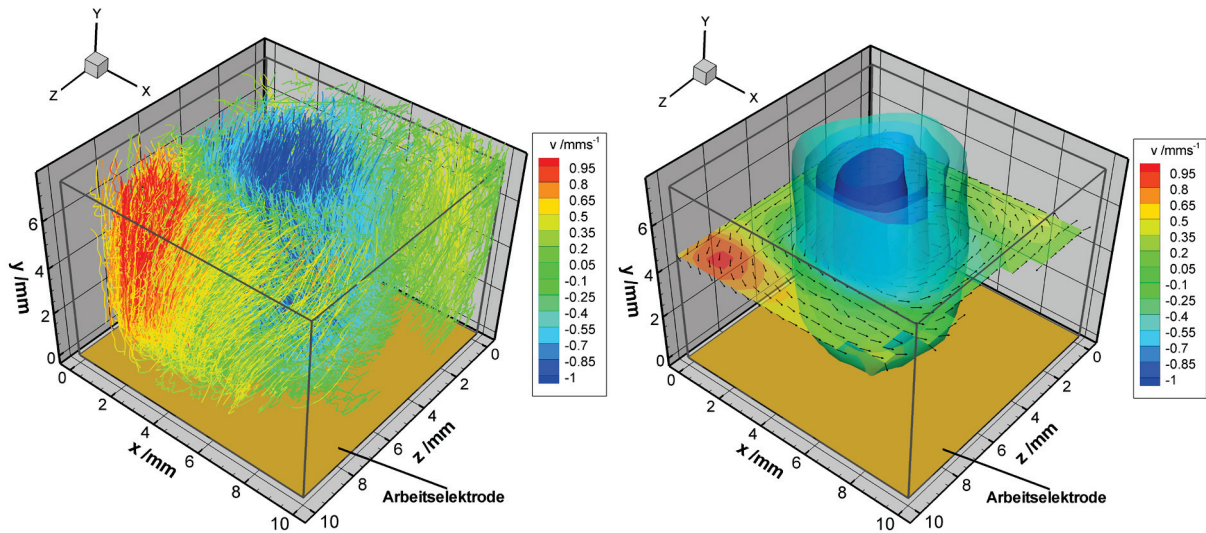


Abb. 3: Partikelbahnen und gemittelte Isoflächen der v -Komponente der Geschwindigkeit in Elektrodennähe

Um den Einfluss der unterschiedlichen Konfigurationen besser erkennen zu können, wurden zeitlich und räumlich gemittelte Geschwindigkeitsprofile für unterschiedliche Konfigurationen in Abb. 4 dargestellt.

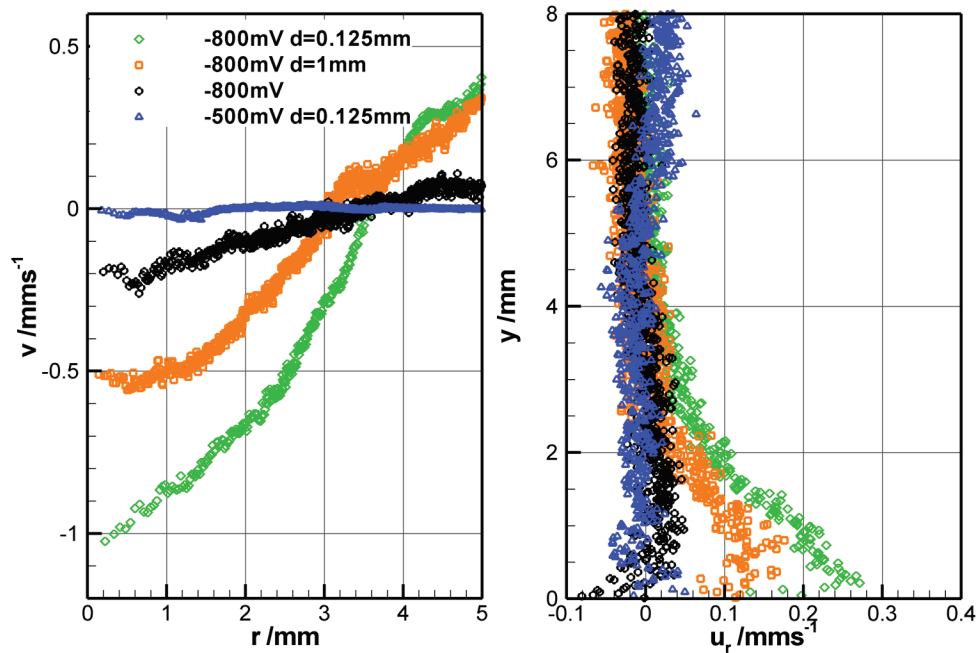


Abb. 4: Zeitlich und über der Höhe (y) gemitteltes Geschwindigkeitsprofil der vertikalen Geschwindigkeitskomponente (links) und zeitlich und über dem Radius gemitteltes Geschwindigkeitsprofil der radialen Komponente (rechts)

Der Einfluss der Gradientenelektrode (hier die Dicke des Eisendrahtes) auf die Staustrahlströmung wird am radialen Geschwindigkeitsprofil sehr deutlich. In der Mitte der Elektrode ($r = 0$ mm) weist die vertikale Geschwindigkeit jeweils den kleinsten Wert auf und steigt mit zunehmender Entfernung vom Zentrum an. Die betragsmäßig größten Werte werden mit $v = -1$ mm/s für den kleinsten Durchmesser des Eisendrahtes im Templat ($d = 0,125$ mm) erreicht. Für einen Durchmesser von 1 mm halbiert sich der minimale Wert von $v = -0,5$ mm/s und auch für ein Templat ohne Eisendraht bewegt sich das Fluid im Zentrum im zeitlichen und räumlichen Mittel auf die Elektrode zu. Das Profil für ein Potential von -500 mV ist zum Vergleich mit eingetragen. Hier findet kaum eine Reaktion statt, demzufolge ist das Fluid nahezu in Ruhe. Der Nulldurchgang ist für alle Profile etwa im Bereich von $r = 3$ mm.

Auf der rechten Seite von Abb. 4 ist die Geschwindigkeit in radialer Richtung über der Höhe aufgetragen. Die Amplitude der radialen Geschwindigkeit beträgt etwa 30 % des Betrages der vertikalen Komponente. Signifikante Werte von u_r lassen sich bis $y = 4$ mm erkennen, womit deutlich wird, dass die elektrodennahe Strömung bis weit in die Zelle wirkt. Da für einen Eisendraht mit $d = 0,125$ mm wesentlich mehr Fluid an die Elektrode befördert wird, zeigen sich auch hier die größten Werte für die Geschwindigkeitskomponente in radialer Richtung, wobei positive Werte eine Bewegung vom Zentrum weg darstellen. Für den dickeren Eisendraht sind die Werte wieder geringer und für das kleinere Potential von -500 mV ist das Fluid nahezu in Ruhe. Wird keine Magnetfeldgradientenelektrode verwendet, sollte sich die dargestellte Teetassenströmung einstellen. Tatsächlich lassen sich für das Profil ohne Eisendraht kurz oberhalb der Elektrode ($y < 0,5$ mm) negative Werte für u_r finden. Da diese Werte sehr klein sind und stark streuen, sollten hier aber noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um das Ergebnis zu verifizieren.

Durch die zeitlich äquidistante Abtastung ist es möglich das Anfahrverhalten und andere instationäre Vorgänge in der Strömung zu beobachten. Beim Anlegen des konstanten Potentials fließen am Anfang der Reaktion sehr hohe elektrische Ströme. Durch diese hohen Ströme wird eine sehr starke Lorentzkraft generiert, die in dem hier beschriebenen Fall eine Drehströmung verursacht. Dieses transiente Verhalten ist sehr deutlich in Abb. 5 an der zeitlichen Entwicklung der Umfangskomponente u_ϕ zu erkennen.

Für das höhere Potential von -800 mV ist unmittelbar nach dem Anlegen bei $t \approx 1$ s ein starker Anstieg bis auf $u_\phi \approx 1$ mm/s bei $t \approx 6$ s deutlich zu erkennen. Danach fällt die Geschwindigkeit wieder ab und pegelt sich je nach Konfiguration ein. Der Anfahrvorgang ist nach etwa 20 s abgeschlossen. Für das geringere Potential von -500 mV startet die Reaktion wesentlich langsamer. Die Umfangsgeschwindigkeit erreicht hier auch nur Werte von $u_\phi \approx 0,6$ mm/s bei $t \approx 18$ s. Die Werte für den dünnen Eisendraht, bzw. die Konfiguration ohne Eisendraht erreichen im Reaktionsverlauf einen Bereich von $0,25 \dots 0,5$ mm/s und sind damit deutlich kleiner als die für den dicken Eisendraht. Eine Ursache könnte sein, dass das Maximum der durch die Gradienten im Magnetfeld entstehenden Lorentzkraft durch den dickeren Eisendraht weiter vom Zentrum entfernt ist und somit das Fluid stärker beschleunigen werden kann.

Im unteren Teil von Abb. 5 ist der elektrodennahe zeitliche Verlauf vertikalen Geschwindigkeitskomponente dargestellt. Die Unterschiede für die unterschiedlichen Konfigurationen sind auch hier deutlich zu erkennen. Für den dünneren Eisendraht ist der Anteil der Magnetfeldgradientenkraft größer als für den dicken Draht. Demensprechend ist die Geschwindigkeit des Staustrahls für die Verwendung des dünnen Drahtes mit $-0,5$ mm/s gegenüber $-0,3$ mm/s vom Betrag größer. Ohne Eisendraht gibt es keine auf die Elektrode gerichtete Magnetfeldgradientenkraft und die Werte für v pendeln sich um 0 ein. Sehr deutlich wird auch der instationäre Charakter der Strömung. Durch das Ansammeln von leichter abgereicherter Lösung kommt es von Zeit zu Zeit zum Aufsteigen sogenannter Fahnen oder Plumes, die deutliche Ausschläge im Geschwindigkeitssignal verursachen. Für das kleinere Potential von -500 mV kommt es zu deutlich weniger Kupferablagerung, d.h. diese auftriebsgetriebenen Effekte stellen sich nicht ein und die vertikale Geschwindigkeit weicht nur marginal von 0 ab.

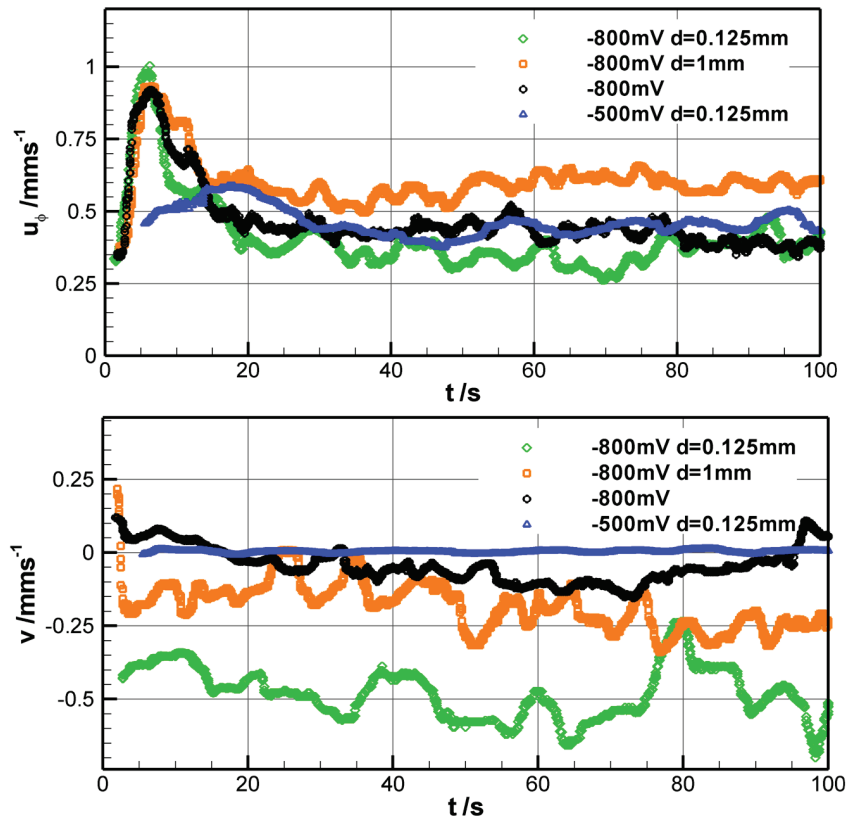


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung der in Elektrodennähe ($y < 3 \text{ mm}$, $r < 3 \text{ mm}$) räumlich gemittelten Umfangsgeschwindigkeit (oben) und vertikalen Geschwindigkeitskomponente (unten)

Ausblick

Das Geschwindigkeitsfeld der Strömung bei der elektrochemischen Kupferabscheidung unter dem Einfluss eines externen Magnetfeldes konnte mittels fernmikroskopischer 3D Astigmatismus PTV erstmals räumlich und zeitlich gemessen werden. Es zeigt sich, dass die Strömung durch die Überlagerung der Einflüsse der Lorentzkraft und der Magnetfeldgradientenkraft äußerst komplex und instationär ist. Durch die Veränderung der Randbedingung (Orientierung im Erdschwerefeld, Elektrodengeometrie, Kupferkonzentration) kann der Einfluss beider gegeneinander abgegrenzt werden. Die ersten Untersuchungen liefern hier das globale Strömungsfeld und erlauben die Identifikation strömungsmechanisch interessanter Bereiche und des Anlaufverhalten. Ein Effekt der Magnetfeldgradientenkraft auf das Strömungsfeld konnte nachgewiesen werden. Zum weiteren Verständnis muss der Zusammenhang zu den gemessenen elektrischen Strömen hergestellt werden. Die Anwendung der 3D3C PTV Messtechnik im elektrodennahen Bereich, sowie die gleichzeitige Bestimmung der örtlichen Stoffkonzentration und der Vergleich mit numerischen Ergebnissen versprechen langfristig einen wertvollen Beitrag zur weiteren Aufklärung der elektrochemischen und strömungsphysikalischen Phänomene.

Dankesworte

Die Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1147 "Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse" und des Sonderforschungsbereiches 609 „Elektromagnetische Strömungsbeeinflussung in Metallurgie, Kristallzüchtung und Elektrochemie“ gefördert.

Literatur

1. T. Weier, K. Eckert, S. Mühlhoff, C. Cierpka, A. Bund, M. Uhlemann: Confinement of paramagnetic ions under magnetic field influence: Lorentz- versus concentration gradient force based explanations. *Electrochemistry Communications* 9, 2007, 2479-2483
2. A. Bund, A. Ispas, G. Mutschke: Magnetic field effects on electrochemical metal depositions. *Science and Technology of Advanced Materials* 9, 2008, 024208
3. C. Cierpka, T. Weier, G. Gerbeth, M. Uhlemann, K. Eckert: Copper deposition and dissolution in seemingly parallel electric and magnetic fields: Lorentzforce distributions and flow configurations. *Journal of Solid State Electrochemistry* 11, 2007, 687-701
4. K. Tschulik, J.A. Koza, M. Uhlemann, A. Gebert, L. Schultz: Effects of well-defined magnetic field gradients on the electrodeposition of copper and bismuth, *Electrochemistry Communications* 11, 2009, 2241-2244
5. C.J. Kähler, U. Scholz, J. Ortmanns: Wall-shear-stress and near-wall turbulence measurements up to single pixel resolution by means of long-distance micro-PIV. *Experiments in Fluids* 41, 2006, 327–341
6. C. Cierpka, R. Segura, R. Hain, C.J. Kähler: A simple single camera 3C3D velocity measurement technique without errors due to depth of correlation and spatial averaging for microfluidics, *Measurements, Science and Technology* 21, 2010, 045401
7. A. Kumar, C. Cierpka, S.J. Williams, C.J. Kähler, S.T. Wereley: 3D3C velocimetry measurements of an electrothermal microvortex using wavefront deformation PTV and a single camera. *15th Int. Symp. on Applications of Lasers Techniques to Fluid Mechanics*, 5-8 July 2010, Lisbon, Portugal
8. C. Cierpka, M. Rossi, R. Segura, C.J. Kähler: Comparative study of the uncertainty of stereoscopic micro-PIV, wavefront-deformation micro-PTV, and standard micro-PIV. *15th Int. Symp. on Applications of Lasers Techniques to Fluid Mechanics*, 5-8 July 2010, Lisbon, Portugal
9. M.G. Olsen, R.J. Adrian. Out-of-focus effects on particle image visibility and correlation in microscopic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 29, 2000, 166-174
10. U.T. Bödewadt. Die Drehströmung über festem Grund. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik* 20, 1940. 241–253