

Anwendung des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors zur Vermessung elektromagnetisch beeinflusster Elektrolytströmungen

Application of the laser Doppler velocity profile sensor for the investigation of electromagnetically controlled electrolyte flows

Lars Büttner¹, Katsuaki Shirai¹, Andreas Voigt¹, Mathias Neumann¹, Jürgen Czarske¹, Tom Weier², Christian Cierpka²

¹ Technische Universität Dresden
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Professur für Mess- und Prüftechnik
Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden
E-Mail: Lars.Buettner@tu-dresden.de, Internet: <http://eeemp1.et.tu-dresden.de>

² Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e.V.
Institut für Sicherheitsforschung, Abteilung Magnetohydrodynamik
Bautzner Landstraße 128, 01328 Dresden
Internet: www.fzd.de

Schlagworte: Laser-Doppler-Profilsensor, elektromagnetische Strömungsbeeinflussung
Key words: Laser Doppler Velocity Profile Sensor, electromagnetic flow control

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird erstmals über die Anwendung des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors zur Untersuchung von elektromagnetisch beeinflussten Grenzschichten in schwach leitfähigen Fluiden berichtet. Die elektromagnetische Strömungsbeeinflussung wird in Industrie und Forschung mit großem Interesse verfolgt, da damit Strömungsablösungen kontrolliert und Strömungswiderstände reduziert werden können. Da elektromagnetische Kräfte hauptsächlich in der Grenzschicht wirken, ist eine präzise Untersuchung der Grenzschicht für das Verständnis der auftretenden Effekte unerlässlich.

In der hier vorgestellten Arbeit kommt der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor zum Einsatz, der eine Erweiterung des konventionellen Laser-Doppler-Anemometers (LDA) darstellt, aber zwei überlagerte, entgegengesetzt fächerförmige Streifensysteme verwendet. Dadurch kann zusätzlich die axiale Position von Streuteilchen im Messvolumen aufgelöst und somit eine deutlich höhere Ortsauflösung bei gleichzeitig geringerer Messunsicherheit der Geschwindigkeit erzielt werden, was gerade für Grenzschichtuntersuchungen deutliche Vorteile gegenüber konventionellen LDA bietet.

In diesem Beitrag wird über die Untersuchung der ebenen Plattengrenzschicht einer Natronlaugen-Strömung berichtet, deren Geschwindigkeitsprofil durch Lorentzkräfte modifiziert wird. Es werden die generellen Anforderungen an die Messaufgabe und die Adaption des Profilsensors an den Aufbau dargestellt. Die Ergebnisse der Grenzschichtprofilmessungen werden diskutiert und mit PIV (Particle Image Velocimetry)-Daten verglichen.

1.) Einleitung

Die gezielte Kontrolle von Strömungsgrenzschichten wird in Industrie und Forschung mit großem Interesse verfolgt, da damit eine Reduzierung des Strömungswiderstandes erreicht werden kann. In elektrisch leitfähigen Fluiden, wie z.B. Meerwasser, besteht neben bekannten Methoden zusätzlich die Möglichkeit, eine Strömungsbeeinflussung mittels elektromagnetischer Kräfte, d.h. Lorentzkräfte, vorzunehmen. Die technologischen Ansätze verfolgen dabei z.B. die Beeinflussung von Wärmeübergängen, das elektromagnetische Bremsen von Flugobjekten beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre, die Reduzierung des Strömungswiderstandes oder die Kontrolle von Strömungsablösungen [1]. Da elektromagnetische Kräfte bei der hier betrachteten Konfiguration hauptsächlich im wandnahen Bereich wirken, ist eine experimentelle Kontrolle der Grenzschicht für das Verständnis der auftretenden Effekte unerlässlich [2]. Zur Grenzschichtuntersuchung werden Messtechniken mit einer hohen örtlichen Auflösung bis in den Mikrometerbereich benötigt. Konventionelle Laser-Doppler-Anemometer (LDA) bieten aufgrund des auftretenden örtlichen Mittelungseffekts wegen der endlichen Messvolumenausdehnung jedoch nur eine unzureichende Auflösung.

Der in dieser Arbeit verwendete Laser-Doppler-Profilsensor umgeht diese Beschränkung, da er eine Auflösung der Position eines Streuteilchens innerhalb des Messvolumens ermöglicht [3-6]. Im Gegensatz zum konventionellen LDA besteht beim Profilsensor das Messvolumen aus zwei fächerförmigen Streifensystemen, von denen eines konvergente und das andere divergente Streifen aufweist. Dadurch kann die axiale Ortskoordinate des Streuteilchens im Messvolumen aufgelöst und somit eine deutlich höhere Ortsauflösung erzielt werden. Elektromagnetisch induzierte Änderungen der Grenzschicht können damit besser untersucht werden als mit der herkömmlichen Laser-Doppler-Anemometrie.

In diesem Beitrag wird erstmals über die Anwendung des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors zur Untersuchung der Plattengrenzschicht unter dem Einfluss elektromagnetischer Kräfte in einer elektrisch schwach leitfähigen Flüssigkeit (schwache Natronlauge) berichtet. Es werden die generellen Anforderungen an die Messaufgabe dargestellt, Möglichkeiten zur LDA-Kalibrierung in Flüssigkeiten genannt, sowie Ergebnisse von Grenzschichtprofilmessungen unter dem Einfluss elektromagnetischer Kräfte vorgestellt.

2.) Der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor

Das Sensorprinzip basiert auf dem bekannten Verfahren der Laser-Doppler-Anemometrie, jedoch werden bei dem Profilsensor zwei überlagerte, fächerförmige, physikalisch unterscheidbare Interferenzstreifensysteme verwendet, siehe Abb. (1). Dadurch wird es möglich, nicht nur die laterale Geschwindigkeitskomponente, sondern zusätzlich auch die axiale Position eines Streuobjekts innerhalb des Interferenzstreifensystems mit Mikrometer-Genauigkeit zu bestimmen [3]. Der Sensor wurde im Rahmen dieser Tagung für Strömungsmessungen bereits mehrfach vorgestellt, siehe z.B. [4,5].

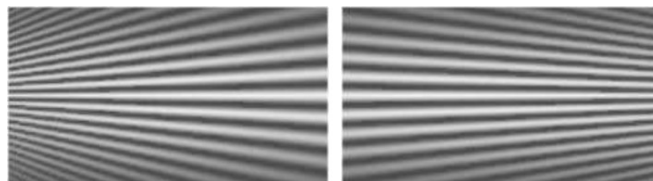


Abb. (1): Überlagerte fächerförmige Streifensysteme, die das Messvolumen des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors bilden.

Die Interferenzstreifensysteme werden über den axialen Verlauf ihrer Streifenabstände $d_{1,2}(z)$ beschrieben. Objekte, die sich durch die Streifensysteme bewegen streuen Licht mit den Dopplerfrequenzen $f_{1,2}(z)$. Die Funktion

$$q(z) = \frac{f_2(U, z)}{f_1(U, z)} = \frac{U/d_2(z)}{U/d_1(z)} = \frac{d_1(z)}{d_2(z)}$$

ist unabhängig von der Geschwindigkeit, jedoch abhängig von der axialen Position, so dass sich die axiale Position der Streuteilchen dadurch angeben lässt.

Die Partikelgeschwindigkeit ermittelt sich wie auch beim konventionellen LDA aus dem Produkt aus Dopplerfrequenz und Streifenabstand, wobei diesmal der lokale Streifenabstand an der Position z verwendet wird:

$$U(z) = f_1(U, z) d_1(z) = f_2(U, z) d_2(z) \quad (4)$$

Da die Messunsicherheit der Ortsbestimmung im Submikrometerbereich liegen kann, wird eine deutlich höhere Ortsauflösung als beim konventionellen LDA erreicht. Durch Auswerten einer großen Anzahl von Streuteilchen, die statistisch verteilt in der Strömung vorliegen, kann das im Messvolumen vorherrschende Geschwindigkeitsprofil reproduziert werden. Für die Erfassung von Strömungsgrenzschichten wie hier im Fall der elektromagnetisch beeinflussten Plattengrenzschicht, ist das Verfahren daher prädestiniert.

Die beiden Interferenzstreifensysteme müssen prinzipiell physikalisch unterscheidbar sein. Im vorliegenden Fall wurde Frequenzmultiplex (FDM: frequency division multiplexing) verwendet. Von den vier Teilstrahlen, die die beiden Interferenzstreifensysteme bilden, wird ein LDA-Teilstrahl direkt verwendet, während die anderen Teilstrahlen mittels akustooptischer Modulatoren (AOM) in ihrer Frequenz erhöht werden. Die Shiftfrequenzen sind so gewählt, dass jedem Streifensystem eine andere Trägerfrequenz zugeordnet ist. Durch Mischen der LDA-Burstsignale mit der jeweiligen Trägerfrequenz und anschließender Tiefpassfilterung erhält man die beiden Dopplerfrequenzen f_1 und f_2 im Basisband. Als Lichtquelle kommt ein diodengepumpter, frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser hoher Leistung zum Einsatz. Ausführliche Darstellungen des hier verwendeten Profilsensor-Messsystem und zum Frequenzmultiplex finden sich in [5,6].

3.) Das Experiment

Die im hier betrachteten Fall untersuchte elektromagnetische Grenzschichtbeeinflussung kann transitionsverzögernd wirken. Für die Versuche wurde der Umlauf-Elektrolytkanal des Forschungszentrums Dresden-Rossendorf genutzt. Der Kanal wird mit einer schwachen Natronlauge mit einer spezifischen Leitfähigkeit von ca. 5 S/m betrieben, was gegenüber Salzwasser den Vorteil einer geringeren Korrosivität hat. Zudem entsteht durch Elektrolyse kein aggressives Chlor. Die Messkammer hat eine Querschnittsfläche von $20 \times 20 \text{ cm}^2$ und eine Länge von 1,2 m.

In der Messkammer vertikal angeordnet befindet sich die Platte zur Strömungsbeeinflussung. Da im Gegensatz zu z.B. Flüssigmetallen in elektrisch nur schwach leitfähigen Fluiden wie Salzwasser die Leitfähigkeit um ca. sechs Größenordnungen geringer ist, fließen aufgrund der im Magnetfeld induzierten Spannungen nur sehr geringe Ströme. Um merkliche Lorentzkräfte zu generieren, muss deshalb zusätzlich ein elektrische Feld angelegt werden. Bei der hier verwendeten ebenen Platte sind streifenförmige Elektroden und Permanentmagnete gemäß Abb. (2) alternierend in Spannrichtung angeordnet, so dass eine rein stromabwärts gerichtete Lorentzkraft $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$ entsteht.

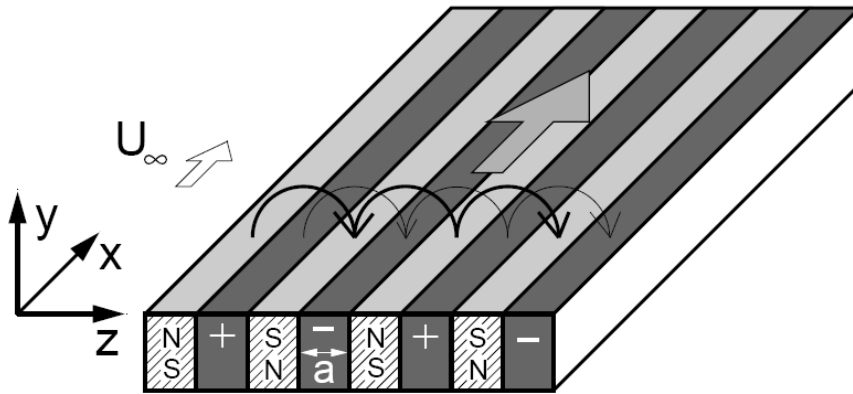


Abb. (2): Platte aus in Spannrichtung alternierend angeordneten streifenförmigen Elektroden und Permanentmagneten zur Grenzschichtbeeinflussung mittels einer stromab gerichteten Lorentzkraft.

Die Platte besitzt an der Vorderkante ein superelliptisches Profil und wird in Längsrichtung angeströmt. Als Streuteilchen wurden silberbeschichtete Glas-Hohlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$ verwendet, deren mittlere Dichte nur geringfügig größer als die des Fluids ist, so dass ein nennenswertes Absinken während der Messung nicht auftrat. Der Messkopf des Profilsensors wird nun senkrecht auf die Platte gerichtet, so dass sich das Messvolumen unmittelbar über der Oberfläche befindet. Um das komplette Profil zu vermessen, kann der Messkopf und damit das Messvolumen mit einem Lineartisch traversiert werden. Dabei wurde der durch Brechung in der Natronlauge auftretende Versatz des Messvolumens berücksichtigt. In Abb. (3) ist schematisch die Messanordnung dargestellt. Im Gegensatz zur ersten Anwendung dieses Messsystems [5,6] kann hier nur in Rückwärtsrichtung detektiert werden. Aus diesem Grund wurde der Messkopf um eine Empfangsoptik erweitert, deren optische Achse um 12° gegenüber der Ebene der Teilstrahlen geneigt war. Aufgrund der relativen großen Streuteilchen und einer nutzbaren numerischen Empfangsapertur von 0,11 war eine optische Leistung im Messvolumen von 120 mW ausreichend, um auswertbare Signale zu erhalten.

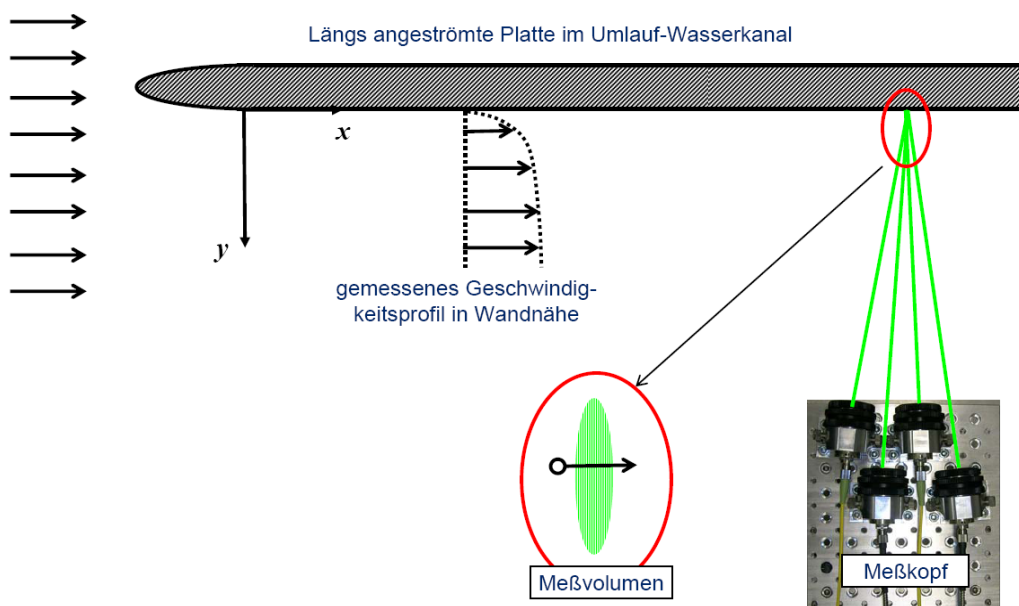


Abb. (3): Skizze der Messanordnung: längs angeströimte Platte zur elektromagnetischen Grenzschichtbeeinflussung und Messkopf des Profilsensors.

Abb. (4a) zeigt ein Foto des Gesamtaufbaus, Abb. (4b) eine Vergrößerung der Messstelle, auf der die einzelnen Elektroden der Platte sowie die vier Teilstrahlen des Profilsensors zu erkennen sind.

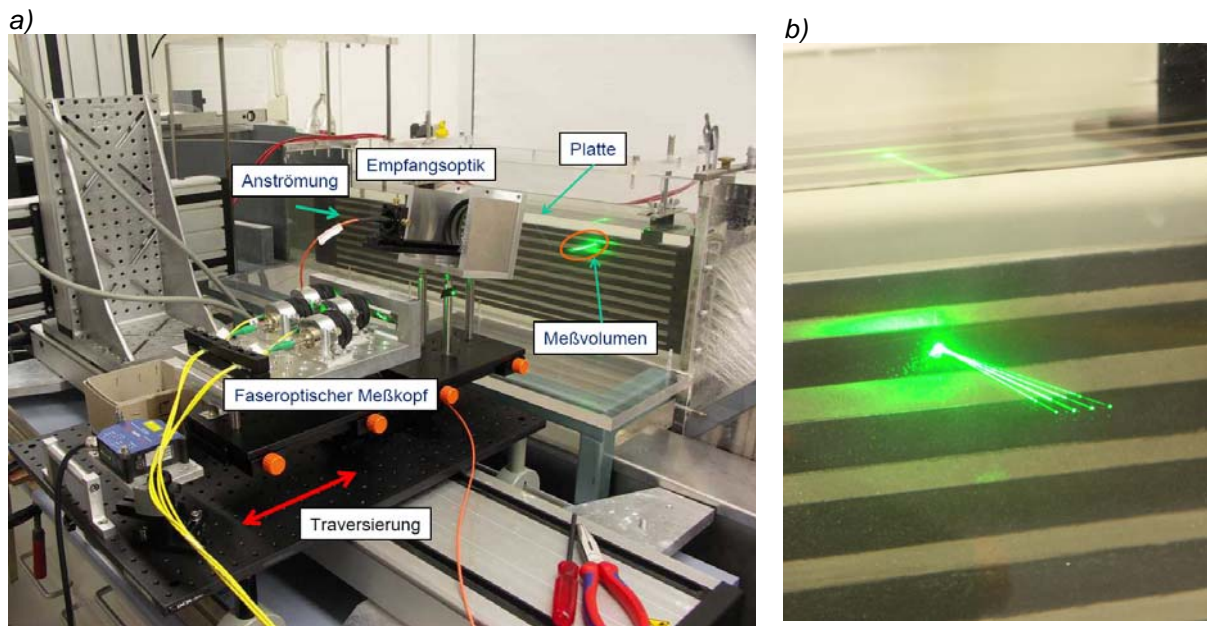


Abb. (4): Fotos des Versuchsaufbaus. a) Kompletter Aufbau mit Umlauf-Elektrolytkanal und Sende- und Empfangsoptik des Profilsensors, b) vergrößerte Ansicht der Platte mit alternierenden Elektroden und Magneten sowie der vier Teilstrahlen inklusive Messvolumen des Profilsensors über der Plattenoberfläche.

4. Die Ergebnisse

Messungen des Geschwindigkeitsprofils wurden bei $x = 785 \text{ mm}$ hinter der Vorderkante der Platte mit und ohne Lorentzkraft durchgeführt. Die Anströmgeschwindigkeit betrug $9,7 \text{ cm/s}$, was einer Reynoldszahl von $Re_x = 7.6 \cdot 10^4$ entspricht. In den Abb. (5) und (6) sind die Ergebnisse im Vergleich zu mit Particle-Image-Velocimetry (PIV) erhaltenen Messdaten dargestellt.

Im Profil der mittleren Geschwindigkeit (Abb. (5)) ohne Lorentzkraft stimmen die Messdaten sowohl untereinander als auch im Vergleich zur Theorie einer laminaren Plattengrenzschicht (Blasius-Profil) überein. Bei vorhandener Lorentzkraft zeigt sich bei der PIV-Messung eine deutliche systematische Abweichung vom erwarteten Profil in unmittelbarer Wandnähe, in Abb. (5) durch einen roten Kreis gekennzeichnet. Der Grund dafür liegt in auftretenden Reflexionen des Lichtschnitts an der Wand und an den durch die Elektrolyse entstehenden Gasblasen, welche offenbar eine korrekte Messung unmöglich machen. Der Profilsensor hingegen gibt das Geschwindigkeitsprofil korrekt wieder, da im Gegensatz zu PIV, wo eine Abbildung erforderlich ist und eine Intensitätsverteilung betrachtet wird, nur der zeitliche Verlauf des Streulichtsignals ausgewertet wird.

Allerdings verhindern auch beim Profilsensor die Reflexe eine wandnahe Messung, da durch diese der Photodetektor gesättigt werden kann. Im vorliegenden Fall konnte bis zu einem Abstand von ca. 1 mm zur Wand gemessen werden.

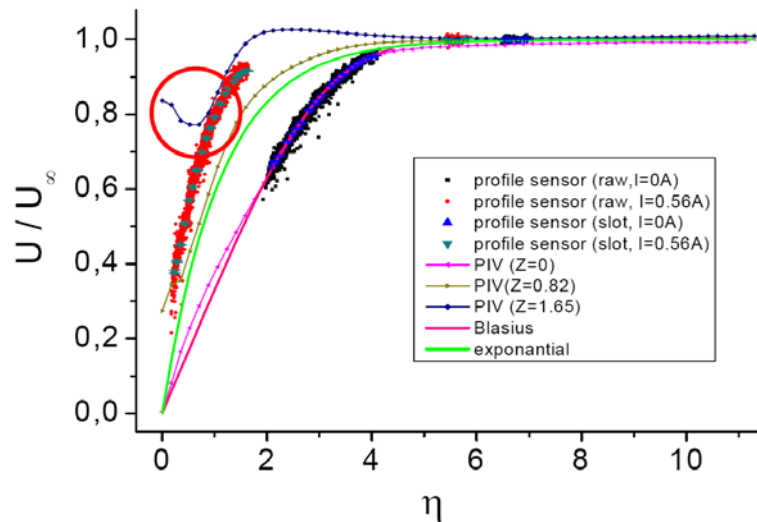


Abb. (5): Mit Profilsensor und PIV gemessene Grenzschichtprofile der mittleren Geschwindigkeit in normierten Koordinaten. Der Strom von $I=0,56\text{ A}$ entspricht dem Parameter $Z=0,82$.

Abb. (6) zeigt die mit Profilsensor und PIV gemessenen Profile der Turbulenzintensität. Bei beiden Messungen ist qualitativ festzustellen, dass die Turbulenzintensität durch Einschalten der Lorentzkraft etwas verringert wird. Weiterhin fällt auf, dass die mit dem Profilsensor gemessene Turbulenzintensität immer kleiner ausfällt als die mit PIV bestimmte. Der Grund liegt vermutlich darin, dass bei PIV aufgrund der begrenzten Geschwindigkeitsauflösung von typischerweise einigen Prozent auch nur eine obere Grenze für die tatsächlich in der Strömung auftretende Turbulenzintensität angegeben werden kann („virtuelle Turbulenz“). Da beim Profilsensor die virtuelle Turbulenz gegenüber dem konventionellen LDA und PIV deutlich reduziert wird, gibt dieser die tatsächliche Turbulenzintensität viel besser wieder. Dieser Effekt konnte bereits bei einer anderen Messaufgabe mittels einem Vergleich zwischen Profilsensor und konventionellem LDA nachgewiesen werden [5,6]. Der gleiche Grund wird auch hier vermutet, soll aber im Detail noch weiter untersucht werden.

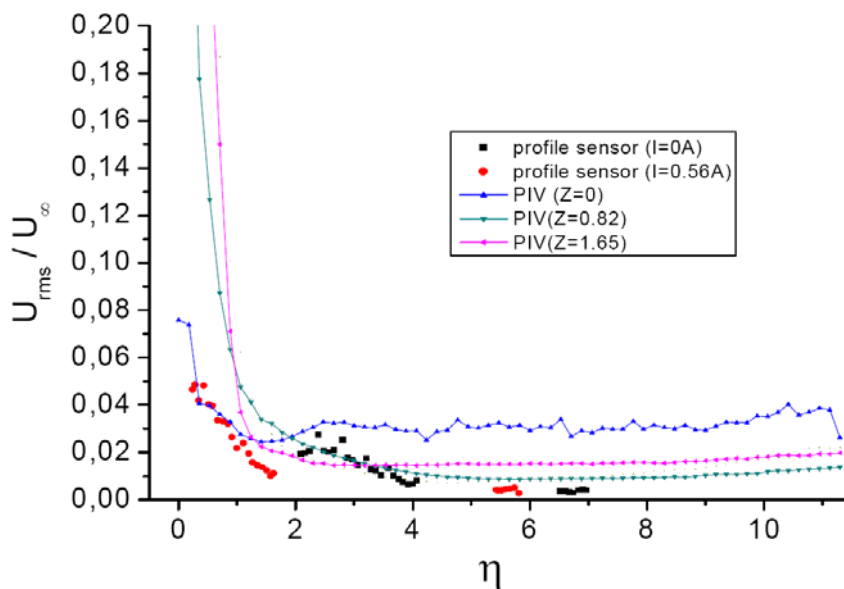


Abb. (6): Gemessene Turbulenzgradprofile im Vergleich.

Die im Diagramm angegebene modifizierte Hartmann-Zahl Z kennzeichnet das Verhältnis von elektromagnetisch induzierter Kraft zur Reibungskraft. Im Fall $Z=1$ sind beide Kräfte gleich groß und das Verhalten der Grenzschicht unterscheidet sich deutlich zum Fall ohne Lorentzkraft ($Z=0$). Im unbeeinflussten Zustand ergibt sich das bekannte Verhalten einer laminaren Grenzschicht mit Blasius-Profil und mit der Lauflänge x anwachsender Grenzschichtdicke. Bei $Z=1$ hingegen wird der reibungsbedingte Energieverlust der Strömung durch die induzierten Lorentzkräfte ausgeglichen. Es bildet sich ein exponentielles Grenzschichtprofil, heraus, welches nach einer bestimmten Einlauflänge kein Dickenwachstum mehr zeigt. Damit kann die Transition verhindert und eine deutliche Verringerung des Reibungswiderstands der umströmten Platte erreicht werden.

5.) Ausblick

Da insbesondere der wandnahe Bereich der Grenzschicht von Interesse ist, besteht eine Notwendigkeit in der Reduzierung des Einflusses der Wandreflexionen. Hier bietet sich der Einsatz von fluoreszierenden Streuteilchen an, die in Bezug zur Absorptionswellenlänge bei einer anderen Wellenlänge emittieren, wodurch Wandreflexe und Streulichtsignale spektral getrennt werden können. Diese von LDA und μ -PIV bekannte Standardtechnik lässt sich unmittelbar auf den hier verwendeten Profilsensor anwenden, da zur Kanaltrennung Frequenzmultiplex eingesetzt wird und somit für beide Streifensysteme die gleiche Wellenlänge verwendet wird. Die Messung soll mit dem Einsatz von Fluoreszenztechnik durchgeführt und die Grenzschichtänderungen detailliert vermessen werden.

6.) Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde erstmals der Einsatz des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors für die Untersuchung der elektromagnetischen Grenzschichtbeeinflussung in elektrisch schwach leitfähigen Fluiden vorgestellt. Der Profilsensor kann zusätzlich die axiale Position von Streuteilchen im Messvolumen auflösen und somit eine deutlich höhere Ortsauflösung bei gleichzeitig geringerer Messunsicherheit der Geschwindigkeit gegenüber konventionellem LDA erzielen, was gerade für Grenzschichtuntersuchungen deutliche Vorteile bietet.

Es wurde über die Adaption des Profilsensors an den Umlauf-Elektrolytkanal des FZD berichtet, der eine umströmte Platte enthält, welche in Spannweitenrichtung alternierend Elektroden und Magnete besitzt, so dass eine stromab gerichtete Lorentzkraft auf die Strömung wirkt. Es wurden Messungen des Grenzschichtprofils mit und ohne Lorentzkraft durchgeführt und mit PIV-Messdaten verglichen. In beiden Fällen stellten sich Laserstrahlreflexionen an der Wand und den Elektrolyseblasen als limitierender Faktor heraus. Während jedoch die mit PIV gemessenen Profile insbesondere in Wandnähe deutliche systematische Fehler aufweisen, gibt der Profilsensor das Geschwindigkeitsprofil korrekt wieder und es konnte insgesamt näher an der Wand gemessen werden. Darüber hinaus ergab sich mit dem Profilsensor ein geringerer gemessener Turbulenzgrad, was vermutlich auf die geringere Geschwindigkeitsauflösung bei PIV („virtuelle Turbulenz“) zurückzuführen ist.

In Zukunft ist der Einsatz fluoreszierender Streuteilchen geplant, um den negativen Einfluss von Wandreflexen zu unterdrücken. Damit sollen detaillierte Untersuchungen zur Turbulenzstatistik der Grenzschicht durchgeführt werden.

Danksagung

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft wird für die Förderung des Teilprojektes A8 innerhalb des Sonderforschungsbereiches 609 (Elektromagnetische Strömungsbeeinflussung in Metallurgie, Kristallzüchtung und Elektrochemie) gedankt.

Literatur

- [1] T. Weier, V. Shatrov, G. Gerbeth, "Flow control and propulsion in weak conductors", Sergei Molokov, Rene Moreau, H. Keith Moffatt, "Magnetohydrodynamics - Historical Evolution and Trends", Dordrecht: Springer, S. 295-312, 2007
- [2] T. Weier, U. Fey, G. Gerbeth, G. Mutschke, O. Lielausis, E. Platacis, "Boundary Layer Control by Means of Wall Parallel Lorentz Forces", Magnetohydrodynamics 37, S. 177-186, 2001
- [3] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller: "Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution", Meas. Sci. Techn. 13(12), S. 1979–1989, 2002
- [4] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller, D. Dopheide, S. Becker, H. Lienhart, F. Durst, "Ortsaufgelöste Vermessung turbulenter Scherströmungen mittels Laser-Doppler-Profilsensor", 11. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", S. 1.1-1.8, Braunschweig, 9.-11. Sept. 2003
- [5] L. Büttner, A. Voigt, C. Bayer, K. Shirai, J. Czarske, N. Pape, V. Strunck, H. Müller, „Optisches Durchflussnormal für HD-Erdgas: Präzise Durchflussmessung mit dem Laser-Doppler-Profilsensor“, 15. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", S. 43.1-43.9, Rostock, 4.-6. Sept. 2007
- [6] L. Büttner, C. Bayer, A. Voigt, J. Czarske, H. Müller, N. Pape, V. Strunck, „Precise flow rate measurement of natural gas under high pressure with a laser Doppler velocity profile sensor“, im Druck bei Exp. Fluids