

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Untersuchung interferometrischer Messtechniken zur
mehrdimensionalen Geschwindigkeitsmessung
kleinskaliger konvektiver Transportprozesse
in der Elektrochemie

Jörg König

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Wolter

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Czarske Tag der Einreichung: 29.01.2014

Prof. Dr. rer. nat. C. J. Kähler Tag der Verteidigung: 15.07.2014

Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Band 9

Jörg König

**Untersuchung interferometrischer Messtechniken
zur mehrdimensionalen Geschwindigkeitsmessung
kleinskaliger konvektiver Transportprozesse in der
Elektrochemie**

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3141-6

ISSN 1866-5519

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Mess- und Prüftechnik der Technischen Universität Dresden entstanden. Während dieser Zeit haben mich viele Personen in unterschiedlichster Weise unterstützt, ohne die meine Arbeit in dieser Form sicherlich nicht entstanden wäre. Ich möchte daher die Gelegenheit nutzen mich für die zahlreiche Unterstützung zu bedanken.

Zuallererst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. J. Czarske für das entgegengebrachte Vertrauen, die Initiierung und die stete Förderung meiner Arbeit bedanken. Die ausgezeichneten Bedingungen am Lehrstuhl sowie die Möglichkeit mich wissenschaftlich frei entfalten zu dürfen haben meine Arbeit in dieser Form erst überhaupt ermöglicht. Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. C. J. Kähler von der Universität der Bundeswehr in München bedanke ich mich sehr herzlich für die Übernahme des Koreferats.

Ein Großteil der Arbeit ist im Rahmen des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanzierten Sonderforschungsbereichs 609 "Elektromagnetische Strömungsbeeinflussung in Metallurgie, Kristallzüchtung und Elektrochemie" entstanden. Für die intensive und sehr interessante Zusammenarbeit innerhalb des Sonderforschungsbereichs möchte ich mich besonders bei Frau Dr. rer. nat. habil. K. Eckert, Herrn Dr.-Ing. S. Mühlhoff, Frau Dr. rer. nat. K. Tschulik und Frau Dr. rer. nat. M. Uhlemann bedanken.

Nicht vergessen möchte ich meine Kollegen Dr. rer. nat. L. Büttner, Dr.-Ing. T. Pfister, Dr.-Ing. K. Shirai, Dr.-Ing. C. Skupsch und Dr.-Ing. A. Voigt, die mir gerade zu Beginn meiner Tätigkeit bei einer Vielzahl von Diskussionen mit wertvollen Tipps zur Seite gestanden haben. Vielen Dank! Ein großes Dankeschön möchte ich Herrn Dr.-Ing. habil. A. Fischer aussprechen. Er hatte immer ein offenes Ohr für meine kleinen oder etwas größeren Problemchen und unterstützte mich von Anfang an.

Auch möchte ich meinen vielen Studien- und Diplomarbeitern danken. Besonderer Dank geht hier an die Herren Dipl.-Ing. C. Linde, Dipl.-Ing. A. Renz und Dipl.-Ing. F. Schwarzer für die tolle Unterstützung im Labor.

Darüber hinaus danke ich allen nicht namentlich genannten Mitarbeitern der Professur für Mess- und Prüftechnik für die stets angenehme und kollegiale Arbeitsatmosphäre, Herrn M. Loeper und seinen Mitarbeitern von der Abteilung Präzisionsmechanik der Fakultätswerkstatt für deren hervorragende technische Unterstützung und Herrn Dipl.-Ing. C. Bayer für die Vermessung der Mikrokanäle. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei ausdrücklich für die finanzielle Unterstützung meiner Arbeiten gedankt.

Abschließend möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie für die erhaltene Unterstützung abseits des Arbeitsplatzes bedanken. Ohne euer Verständnis für meine Begeisterung an der Forschungsarbeit, welche oft viel Zeit in Anspruch genommen hat, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Bei der elektrochemischen Kupferabscheidung wird durch ein inhomogenes Magnetfeld eine Konvektion innerhalb der Konzentrationsgrenzschicht induziert, die die Struktur der Abscheidung auf der Elektrodenoberfläche berührungslos manipuliert. Der Einfluss der am Prozess beteiligten Lorentz- und Magnetfeldgradientenkraft wird jedoch kontrovers diskutiert und bedarf einer experimentellen Bestätigung durch eine Strömungsmessung. Die messtechnische Herausforderung dabei ist, neben einer geringen Orts- ($< 10\ \mu\text{m}$) und Geschwindigkeitsunsicherheit ($< 1\%$), einen großen Arbeitsabstand von mehreren 10 mm zu ermöglichen. Der Laser-Doppler-Profilsensor (LDV-PS) bietet prinzipiell diese Eigenschaft. Im Unterschied zu einem konventionellen Laser-Doppler-Velozimeter verwendet dieser Sensor nicht ein sondern zwei Interferenzstreifensysteme mit charakteristischen Streifenabstandsverläufen entlang der optischen Achse. Neben der Geschwindigkeit eines Partikels kann so auch dessen axiale Position z im Messvolumen bestimmt werden. Damit bietet der LDV-PS eine einkomponentige Geschwindigkeitsprofilmessung mit sehr hoher Tiefenauflösung trotz eines langen Arbeitsabstands. Basierend auf diesem Prinzip ist das Ziel dieser Arbeit, die Entwicklung und Anwendung einer Messtechnik, mit der mehrkomponentig und mehrdimensional die kleinskaligen Strömungsphänomene in unmittelbarer Elektrodennähe zuverlässig gemessen werden können.

Zunächst wird mit einer Messunsicherheitsbetrachtung gezeigt, dass die zufälligen Messabweichungen durch die Brown'sche Molekularbewegung sowie durch Aberrationen der Laserstrahlen die Messunsicherheit des LDV-PS limitieren. Darauf aufbauend wird ein an die Anforderungen in der Elektrochemie angepasster und aberrationsminimierter LDV-PS realisiert, der eine zweikomponentige Geschwindigkeitsprofilmessung bei einem Arbeitsabstand von $\geq 60\ \text{mm}$ bietet. Erstmals wird am Beispiel einer Mikrokanalströmung eine Standardabweichung der axialen Position z von $< 1\ \mu\text{m}$ bei einer gleichzeitigen relativen Geschwindigkeitsunsicherheit im Bereich von $0,1\%$ experimentell demonstriert.

Bei der elektrochemischen Kupferabscheidung unter Magnetfeldeinfluss ermöglicht dieser Sensor, zum ersten Mal die Elektrolytkonvektion innerhalb der ersten $500\ \mu\text{m}$ zur Kathode mit einer Ortsauflösung von $50 \times 50 \times 15\ \mu\text{m}^3$ detailliert zu analysieren. Geschwindigkeitsprofilmessungen bis auf $10\ \mu\text{m}$ zur Kathodenoberfläche weisen dabei auf eine komplexe Wechselwirkung zwischen den am Prozess beteiligten Kräften hin. Die These, dass in inhomogenen Magnetfeldern die Magnetfeldgradientenkraft die strukturierte Kupferabscheidung maßgeblich beeinflusst, kann experimentell eindeutig bestätigt werden.

Erstmals wird auch eine in-situ Eigenkalibrierung des LDV-PS präsentiert. Diese basiert auf einer Dreistrahlinterferenz und wird an einer Mikrokanalströmung experimentell erprobt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Kalibrierunsicherheit von $< 0,7\%$ erreicht werden kann, aus der selbst in schwer zugänglichen Messregionen eine vernachlässigbare maximale systematische Messabweichung der axialen Position z von nur $200\ \text{nm}$ folgt.

Zudem wird ein neuartiger Sensor vorgestellt, der mit einem weiteren Interferenzstreifensystem und einer kombinierten Phasen-Frequenzauswertung der Burstsignale eine flächenhafte Strömungsmessung ermöglicht. Unter Beibehaltung der Eigenschaften des LDV-PS, wird mit einer minimalen Standardabweichung der lateralen y -Position von $200\ \text{nm}$ eine um zwei Größenordnungen höhere laterale Ortsauflösung mit diesem Sensor erreicht. Seine Funktionstüchtigkeit wird an einer Mikrokanalströmung demonstriert, wobei im Vergleich zu Simulationsergebnissen eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden kann. Bei nur einem einzigen optischen Zugang bietet dieser Sensor die Perspektive, die kleinskaligen Transportprozesse in der Elektrochemie auch ohne Änderung der experimentellen Randbedingungen örtlich hochaufgelöst, zweidimensional zu messen.

Abstract

In order to produce structured copper layers on the electrode surface, inhomogeneous magnetic fields are applied during the electrodeposition process to induce electrolyte convection near the electrode via the magnetohydrodynamic effect. Either the Lorentz or the magnetic field gradient force dominates. Their contribution, however, is discussed controversially and needs to be investigated by measuring the electrolyte convection inside the concentration boundary layer. This challenging measurement task requires high spatial resolution ($< 10\ \mu\text{m}$), low velocity uncertainty ($< 1\%$) and a long working distance of several 10 mm. The laser Doppler velocity profile sensor (LDV-PS) features all of these properties. This sensor is an extended laser Doppler velocimeter. Instead of using one interference fringe system with nearly constant fringe spacing, the LDV-PS utilizes two fringe systems with characteristic fringe spacing functions along the optical axis. In this way, the LDV-PS determines not only the velocity, but also the axial position z of particles inside its measurement volume and, therefore, offers high spatial resolution despite a long working distance. Based on this sensor principle, the present work aims to develop a multi-component, multi-dimensional measurement technique that is able to reliably quantify the small scale flow phenomena near electrodes.

First, detailed analysis of the measurement uncertainty reveals that random errors due to Brownian motion and optical aberrations of the laser beams limit the minimum achievable measurement uncertainty. Based on these findings, a sensor setup with minimum aberrations has been developed to adapt the LDV-PS to the challenging measurement task inside an electrochemical cell. The realized sensor offers two-component velocity profile measurements with a working distance of $\geq 60\ \text{mm}$. Its high axial spatial resolution of $< 1\ \mu\text{m}$ with simultaneous low velocity uncertainty of 0.1% is evidenced under real flow conditions by a microchannel flow measurement.

Second, to provide information about the influence of acting forces during magnetoelectrolysis of copper, the electrolyte convection within $500\ \mu\text{m}$ of the front of the electrode was measured by using the optimized two-component LDV-PS. A spatial resolution of $50 \times 50 \times 15\ \mu\text{m}^3$ allows for a detailed analysis of the electrolyte convection inside the concentration boundary layer. Thereby, velocity profile measurements down to $10\ \mu\text{m}$ in front of the cathode reveal a complex interaction of the forces involved in the electrochemical process. In case of inhomogeneous magnetic fields, the predicted influence of the magnetic field gradient force on the structuring effect observed, is clearly confirmed.

Third, a self-calibration technique for an LDV-PS is presented. Based on three interfering beams, this technique allows for reliable flow measurements at relatively inaccessible geometries due to an in-situ calibration at the same time. A microchannel flow measurement shows that a low in-situ self-calibration uncertainty of less than 0.7% entails a maximum systematic error of the axial position z of about $200\ \text{nm}$.

Finally, a novel sensor is presented that enables two-dimensional flow measurements with only one optical access. By using an additional interference fringe system and a combined phase-frequency evaluation of the burst signals, a minimum standard deviation of the lateral y -position of approximately $200\ \text{nm}$ is achieved. Therefore, the novel sensor offers up to two orders of magnitude higher spatial resolution in the lateral direction, while maintaining all other properties of the LDV-PS. Its ability to image flow phenomena at the micro scale without using a camera is demonstrated at a microchannel flow. With its unique feature of high spatial resolution in two dimensions despite a long working distance and the requirement of only one optical access, the sensor promises deeper insights into the near-electrode convection without the need of changing the experimental constraints.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis wichtiger Formelzeichen	XIII
Akronyme	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Ziel und Struktur der Arbeit	5
2 Grundlagen der Laser-Doppler-Technik	7
2.1 Die Laser-Doppler-Velozimetrie	7
2.1.1 Der optische Doppler-Effekt mit Überlagerungsempfang	7
2.1.2 Das Interferenzstreifenmodell	10
2.2 Eigenschaften und Limitierungen konventioneller Laser-Doppler-Velozimeter	12
2.2.1 Eigenschaften des Gauß'schen Laserstrahls	12
2.2.2 Abmessungen des Messvolumens - örtliche Auflösung -	13
2.2.3 Geschwindigkeitsunsicherheit	15
2.2.4 Unschärfe zwischen Ortsauflösung und Geschwindigkeitsunsicherheit	17
2.3 Prinzip des Laser-Doppler-Profilsensors	17
3 Betrachtungen zur Messunsicherheit des Laser-Doppler-Profilsensors	21
3.1 Sensor- und Signalmodell	21
3.2 Betrachtung zufälliger Messabweichungen	23
3.2.1 Detektionsrauschen	25
3.2.2 Laterale Streifenabstandsvariation	27
3.2.3 Brown'sche Molekularbewegung	29
3.2.4 Bilanz der zufälligen Messabweichungen	34
3.3 Betrachtung systematischer Messabweichungen	36
3.3.1 Kalibrierung	36
3.3.2 Drifteffekte der Lasermittenfrequenz, der Temperatur und der Konzentration des Fluids	39
3.3.3 Versatz der Strahltaillenpositionen	41
3.3.4 Bilanz der systematischen Messabweichungen	43
3.4 Schlussfolgerungen	45

4	Der Laser-Doppler-Profilesensor zur wandnahen Messung kleinskaliger Strömungen	47
4.1	Optikanalyse: Minimierung aberrationsbedingter Unsicherheiten	48
4.1.1	Aufbau und Durchführung der Simulation	48
4.1.2	Ergebnisse der Simulation und Vergleich mit der Praxis	50
4.1.3	Fazit	53
4.2	Sensoraufbau mit Zeitmultiplex	54
4.2.1	Modulation und optischer Aufbau mittels Freistrahloptik	55
4.2.2	Modulations- und Übersprechverhalten	57
4.3	Signalverarbeitung	62
4.4	Verifikation der hohen Orts- und Geschwindigkeitsauflösung anhand einer Mikrokanalströmung	64
4.5	Einsatz fluoreszierender Partikel	67
4.6	Der zwei-komponentige LDV-PS mit Richtungssinnerkennung	72
4.6.1	Der optische Aufbau	72
4.6.2	Richtungssinnerkennung	74
4.7	Zusammenfassung	75
5	Anwendung: Messung kleinskaliger Elektrolytkonvektionen in Elektrodennähe	77
5.1	Kalibrierung und Justage des Sensors im Experiment	77
5.1.1	Kalibrierung in einer Elektrolysezelle	77
5.1.2	Bestimmung der Elektrodenposition	79
5.2	Bei homogenem Magnetfeld mit vertikaler Elektrodenanordnung	80
5.2.1	Experimenteller Aufbau und Messprozedur	82
5.2.2	Ergebnisse und Diskussion	83
5.2.3	Zusammenfassung	88
5.3	Bei inhomogenem Magnetfeld - Magnetfeldgradienten	89
5.3.1	Experimentelles Setup und Messprozedur	92
5.3.2	Ergebnisse und Diskussion	95
5.3.3	Zusammenfassung	101
5.4	Resümee	101
6	In-situ Eigenkalibrierung	103
6.1	Problemstellung	104
6.2	Ansatz der Eigenkalibrierung	105
6.3	Prinzip der Eigenkalibrierung	109
6.4	Betrachtungen zu systematischen Abweichungen	111
6.4.1	Einfluss des Brechungsindex	111
6.4.2	Einfluss der Wellenfrontkrümmung Gauß'scher Laserstrahlen	112
6.5	Mikrokanalmessung	113
6.6	Zusammenfassung	115

7	Der neuartige Laser-Doppler-Feldsensor mit kombinierter Phasen-Frequenz-Auswertung	117
7.1	Prinzip des Laser-Doppler-Feldsensors	118
7.1.1	Signalverarbeitung - Phasenbestimmung	119
7.2	Sensoraufbau, Kalibrierung und Charakterisierung	120
7.2.1	Vorüberlegungen zur grundsätzlichen Realisierung	120
7.2.2	Sensoraufbau und Einjustage	122
7.2.3	Kalibrierung	124
7.2.4	Experimentelle Untersuchung zur Unsicherheit der Positionsmessung	127
7.3	Betrachtungen zum Messunsicherheitsbudget	130
7.3.1	Sensor- und Signalmodell	130
7.3.2	Berechnung der Cramér-Rao-Schranke und Ergebnisse	131
7.4	2D-Strömungsmessung im Mikrokanal	134
7.5	Diskussion und Zusammenfassung der Sensoreigenschaften	139
8	Zusammenfassung	141
8.1	Forschungsergebnisse	141
8.1.1	Forschungsergebnisse in der Messtechnik	142
8.1.2	Forschungsergebnisse in der Elektrochemie	146
8.2	Wissenschaftlicher Fortschritt	147
8.3	Ausblick auf weiterführende Aufgaben	148
A	Berechnungen zur Messunsicherheitsbetrachtung	149
A.1	Zufällige Messabweichungen	149
A.1.1	Position z	150
A.1.2	Geschwindigkeit v_x	150
A.2	Systematische Messabweichungen	151
A.2.1	Kalibrierung	151
A.2.2	Drifteffekte	152
B	Herleitung des Modulationsgrads eines Burstsignals bei fluoreszierenden Partikeln	155
C	Angaben zur CRLB bei Phasenmessung	159
D	Simulation der laminaren Mikrokanalströmung	161
	Publikationen	171
	Lebenslauf	175

Verzeichnis wichtiger Formelzeichen

Symbol	Bedeutung
A_0	Amplitude des Burstsignals
A_D	Amplitude der Doppler-Frequenz
A_{KKF}	Amplitude der Einhüllenden der Kreuzkorrelation
A_T	Amplitude der Talbot-Frequenz
\mathbf{B}	magnetische Flussdichte
c	Lichtgeschwindigkeit; Konzentration der Elektrolytlösung
D	Diffusionskoeffizient
d	Interferenzstreifenabstand
d_0	zentraler Interferenzstreifenabstand
d_T	Interferenzstreifenabstand des Talbot-Anteils
d_p	Partikeldurchmesser
\underline{e}	Einheitsvektor zur Kennzeichnung einer Richtung
\underline{E}	Vektor der elektrischen Feldstärke
E_0	Amplitude der elektrischen Feldstärke
f	Frequenzvariable
f_A	Abtastfrequenz
f_D	Doppler-Frequenz
$f_{D_{\text{Kal}}}$	Standardabweichung der Doppler-Frequenz bei der Kalibriermessung
\mathbf{f}_G	Auftriebskraft
f_L	Lasermittelfrequenz
\mathbf{f}_L	Lorentz-Kraft
$f_S, f_{S_{\text{max}}}$	Schaltfrequenz beim Zeitmultiplex, maximale Schaltfrequenz
f_{shift}	Trägerfrequenz
f_T	Talbot-Frequenz
$\mathbf{f}_{\nabla B}$	Magnetfeldgradientenkraft
h	Anstieg der Streifenabstandsfunktion; Tiefe des Mikrokanals
h_{zen}	zentrale Tiefe des Mikrokanals
I, I_0	Intensität
\mathbf{j}	Stromdichtevektor
j	imaginäre Einheit; Betrag der Stromdichte
k_B	Boltzmannkonstante

Symbol	Bedeutung
\underline{k}	Wellenvektor
k	Betrag des Wellenvektors; Abtastwert
l_x, l_y, l_z	Halbachsen des Messvolumenellipsoiden
m_p	Masse eines Partikels
M_{KB}	Anzahl der Messpositionen bei einer Kalibrierung
n	Brechungsindex; Rauschsignal
N	Anzahl unabhängiger Abtastwerte
N_{KB}	Anzahl der Messwerte an einer Position bei einer Kalibrierung
N_S	Anzahl Interferenzstreifen
\underline{p}	Wahrscheinlichkeitsverbundverteilung
p	Druck
\overline{P}_S	mittlere Streulichtleistung, mittlere Signalleistung
P_T	Periodizität der Talbot-Amplitude
q, q^*, q_0	Quotient der Doppler-Frequenzen, zentraler Quotient
R	Radius, Krümmungsradius; Amplitudenverhältnis
s_D, s_i	Detektorsignal, aufgenommenes Zeitsignal des Kanals i
s_{KB}	Schrittweite zwischen den Messpositionen bei einer Kalibrierung
t	Zeit
t_a	mittlere Burstankunftszeit
$t_{F,99}$	Fluoreszenzlebensdauer (99% Abfall der Intensität)
t_S	Startzeitpunkt der Strömungsmessung
T	Temperatur
T_M	Messdauer
\mathbf{v}	Geschwindigkeitsvektor der Strömung oder des Partikels
v_n	Geschwindigkeit der Komponente n
$v_{x_{\max}}$	maximal messbare Geschwindigkeit in x -Richtung
V	Modulationsgrad, Interferenzkontrast
V_{F_1}	Modulationsgrad des Burstsignals eines fluoreszierenden Partikels (vereinfachtes Modell)
V_{F_3}	Modulationsgrad des Burstsignals eines fluoreszierenden Partikels (Volumenberücksichtigung)
w	Strahlradius des Gauß'schen Laserstrahls
w_0	Strahltaillenradius des Gauß'schen Laserstrahls
\overline{z}^2	mittlere quadratische Verschiebung
z_R	Rayleigh-Länge der Laserstrahlen
z_w	Strahltaillenposition relativ zum Kreuzungspunkt der Laserstrahlen
$z_{w_{\text{opt}}}$	optimale Strahltaillenposition bzgl. maximaler Sensorempfindlichkeit
γ	Stoke'sche Reibungskoeffizient

Symbol	Bedeutung
δ_c	Dicke der Konzentrationsgrenzschicht
δ_{MHD}	Dicke der magnetohydrodynamischen Schicht
Δc	Konzentrationsdifferenz; Änderung der Konzentration
Δd	Änderung/Variation des Interferenzstreifenabstands
Δf_L	Änderung der Lasermittelfrequenz
Δz_{PT}	sys. Messabweichung der Position des Kalibrierobjekts
Δt	zeitlicher Versatz
ΔT	Temperaturänderung
Δz_w	Änderung der Strahltaillenposition relativ zum Kreuzungspunkt
$\Delta\varphi$	Phasendifferenz zwischen den Laserstrahlen der ± 1 . Beugungsordnung und der 0. Beugungsordnung
$\frac{dq}{dz}$	Anstieg der Kalibrierfunktion $q(z)$
$\frac{d\varphi}{dy}$	Anstieg der Kalibrierfunktion $\varphi(y)$
ϵ_0	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
ϵ_r	relative Dielektrizitätskonstante
η	dynamische Viskosität
θ	halber Kreuzungswinkel der LDV-Laserstrahlen
Θ	Divergenzwinkel
λ	Wellenlänge
λ_{em}	emittierte Wellenlänge eines fluoreszierenden Streuteilchens
μ_0	magnetische Permeabilität des Vakuums
ν	kinematische Viskosität
ρ	Dichte
σ_X	Standardabweichung, Standardunsicherheit der Größe X
σ_n	mittlere Rauschleistung
$\sigma_{\frac{dq}{dz}}$	Standardabweichung des Anstiegs $ \frac{dq}{dz} $ der Kalibrierfunktion $q(z)$
σ_{q_0}	Standardabweichung des zentralen Quotienten q_0 der Kalibrierfunktion $q(z)$
σ_{qDR}	Standardabweichung des Quotienten aufgrund von Detektorrauschen bei der Kalibriermessung
$\sigma_{v_x \text{BM}}$	Standardabweichung der Geschwindigkeit v_x aufgrund der Brown'schen Molekularbewegung
$\sigma_{v_x \text{DR}}$	Standardabweichung der Geschwindigkeit v_x aufgrund von Detektorrauschen bei der Messung
$\sigma_{v_x \text{Var}}$	Standardabweichung der Geschwindigkeit v_x aufgrund einer lateralen Streifenabstandsvariation
$\sigma_{z \text{BM}}$	Standardabweichung der Position z aufgrund der Brown'schen Molekularbewegung

Symbol	Bedeutung
$\sigma_{z_{\text{DR}}}$	Standardabweichung der Position z aufgrund von Detektionsrauschen bei der Messung
$\sigma_{z_{\text{KO}}}$	Standardabweichung der Position z des Kalibrierobjekts
$\sigma_{z_{\text{sys}}}$	systematische Standardunsicherheit der Position z
$\sigma_{z_{y\text{Var}}}$	Standardabweichung der Position z aufgrund einer lateralen Streifenabstandsvariation
τ_{B}	Zeitkonstante des Burstsignals
τ_{fL}	Abklingkonstante der Lorentz-Kraft
τ_{fVB}	Abklingkonstante der Magnetfeldgradientenkraft
τ_{p}	charakteristische Zeitkonstante eines Partikels
φ	Phase einer elektromagnetischen Welle oder Signals; Phasendifferenz beim LDV-FS
φ_{KKF}	Phase der Kreuzkorrelationsfunktion Ψ
χ_{el}	magnetische Suszeptibilität
χ_{m}	molare magnetische Suszeptibilität
ψ	Verdrehungswinkel zwischen dem zweiten und dritten Interferenzstreifen-system des LDV-FS
Ψ	Kreuzkorrelationsfunktion (KKF)
ω	Kreisfrequenz

Akronyme

Abk.	Bedeutung
AE	Arbeitselektrode
AOM	akusto-optischer Modulator
APD	Avalanche Photodiode (Lawinenphotodiode)
CCD	Charge Coupled Device
CRLB	Cramér-Rao Lower Bound (Cramér-Rao-Schranke)
DOC	Depth of Correlation (Korrelationstiefe)
FFT	Fast Fourier Transform
GE	Gegenelektrode
GUM	Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement
HP	Halbperiode
IS	Interferenzstreifensystem
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion, Kreuzkorrelation
LDV	Laser Doppler Velocimetry
LDV-PS	Laser Doppler Velocity Profile Sensor (Laser-Doppler-Profilsensor)
LDV-FS	Laser Doppler Velocity Field Sensor (Laser-Doppler-Feldsensor)
MHD	Magnetohydrodynamik
NA	numerische Apertur
PIV	Particle Image Velocimetry
SNR	signal-to-noise-ratio (Signal-Rausch-Verhältnis)
μ PIV	micro Particle Image Velocimetry
QDT	Quadratur-Demodulations-Technik