

# Strömungsmessung und –visualisierung mit optischen und elektrochemischen Methoden

## 1 Wirkprinzipien

### 1.1 Laser-Doppler-Anemometer (LDA)

Die berührungslose optische Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe von LDA beruht auf der Auswertung von Streulicht, das von Tracerpartikeln im strömenden Fluid ausgesendet wird, wenn die Partikel ein Messvolumen passieren, das von zwei sich kreuzenden Laserstrahlen gebildet wird (Bild 1) [1].

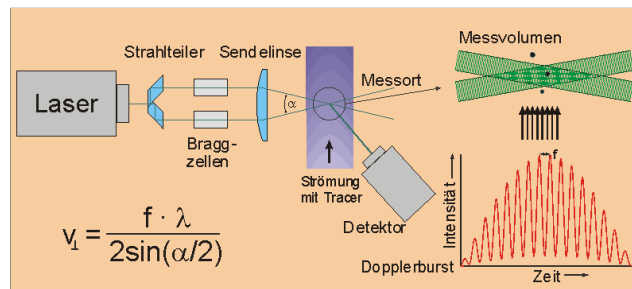


Bild 1: Laser-Doppler-Anemometer (LDA), Versuchsaufbau und Signalauswertung

Die kohärenten monochromatischen Lichtwellen bilden im Messvolumen ein Interferenzstreifenmuster aus, das zu einer Intensitätsmodulation im Streulichtsignal passierender Tracerpartikel führt. Die Frequenz dieser Modulation hängt gemäß folgender Gleichung von der Wellenlänge des Lichtes  $\lambda$ , dem von den Strahlen eingeschlossenen Winkel  $\alpha$  und der Geschwindigkeitskomponente  $v$  ab, die senkrecht zur Winkelhalbierenden der Strahlen orientiert ist und in der durch die Strahlen aufgespannten Ebene liegt.

$$f = \frac{2v \cdot \sin(\alpha/2)}{\lambda}$$

Durch Messung der im Streulichtsignal enthaltenen Frequenz mit Hilfe optischer Detektoren (Photomultiplier, Photodioden) und nachgeschalteter Frequenzauswerteverfahren kann die Geschwindigkeit  $v$  der Tracer berechnet werden.

### 1.2 Laser-Lichtschnitt-Technik (Particle-Image-Velocimeter, PIV)

Die PIV-Technik ist ebenso wie die LDA ein berührungsloses optisches Verfahren zur Strömungsmessung und –visualisierung [2]. Sie beruht auf der Photographie zweier pulsformiger Laserlichtschnitte mit definiertem Zeitabstand  $\Delta t$ , mit denen das Fluid für die Dauer von wenigen ns pro Puls beleuchtet wird (Bild 2).

Die Auswertung dieser Doppelbilder mit Hilfe verschiedener Korrelationsverfahren führt zum Weg  $\Delta x$ , den die beleuchteten Tracerpartikel vom ersten zum zweiten zurückgelegt haben. Die Geschwindigkeit ergibt sich dann zu  $v = \Delta x / \Delta t$ .

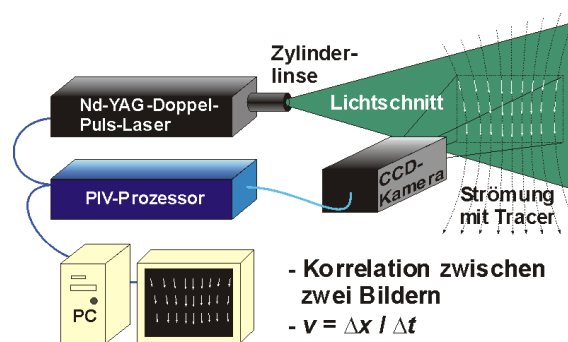


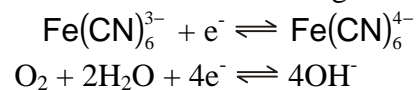
Bild 2: Laserlichtschnitt-Anemometer (PIV), Versuchsaufbau und Signalauswertung

### 1.3 Strömungsmessung durch Messung des elektrochemischen Stofftransports (Electrodifusion method, EDM)

Die Geschwindigkeit des elektrochemischen Stoffumsatzes an einer polarisierten Elektrode wird von folgenden Transportvorgängen kontrolliert:

- Diffusion von Ausgangsstoffen zur Elektrodenoberfläche durch ein Konzentrationsgefälle
- Migration von Ladungsträgern im elektrischen Feld
- Konvektion des Elektrolyts

Sind die Anteile der ersten beiden Transportmechanismen am gesamten Stofftransport einer elektrochemischen Redoxreaktion bekannt oder wie im Fall der Migration vernachlässigbar klein, kann aus dem Stoffumsatz an der Elektrodenoberfläche auf die Konvektion in der Nähe der Elektrode geschlossen werden [3]. Für die Untersuchung von Konvektionsvorgängen in Elektrodennähe können u.a. folgende Redoxreaktionen eingesetzt werden:



Nach einer Kalibrierung der Konfiguration aus Elektrode(n) und Strömungskanal kann die Größe der Strömungsgeschwindigkeit aus dem Elektrodenstrom ermittelt werden. Bei Einsatz mehrerer Elektroden ist eine Richtungserkennung möglich.

## 2 Leistungsfähigkeit und Anwendung der Methoden

### 2.1 LDA

Mit Hilfe der LDA können berührungslos Strömungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung punktweise dreidimensional vermessen werden, wenn genügend Tracerpartikel mit gutem Folgevermögen im Fluid enthalten sind und die Strömung optisch zugänglich ist. Folgende Leistungsparameter kennzeichnen moderne LDA-Gerätesysteme:

- kompakter kalibrierarmer Aufbau
- 3-D Geschwindigkeitsmessungen mit Richtungserkennung z. T. bis 1000 m/s
- räumliche Auflösung bis in den  $\mu\text{m}$ -Bereich
- zeitliche Auflösung bis in den MHz-Bereich

### 2.2 PIV

Der Einsatz der PIV ist vor allem dann von Vorteil, wenn größere Strömungsfelder zu einem Zeitpunkt charakterisiert werden sollen oder wenn es um die optische Visualisierung von Mikroströmungen geht. Moderne PIV-Systeme sind durch folgende Parameter gekennzeichnet:

- Puls laser mit Leistungen bis 500 mJ
- Hochauflösende CCD-Kameras, auch mit Belichtungszeiten bis in den ns-Bereich
- Bildwiederhol frequenzen bis 4 kHz

- räumliche Auflösung bis in den nm-Bereich (mit Fluoreszenzmikroskop)

### 2.3 EDM

Nichtoptische Methoden, zu denen die EDM zählt, können vor allem dann vorteilhaft für Konvektionsmessungen eingesetzt werden, wenn die optische Zugänglichkeit der Strömung nicht gewährleistet ist, die Störung der Strömung keine Nachteile für die Messung beinhaltet oder die Auflösung der Strömung im Bereich der Lichtwellenlänge liegt (Mikro- und Nanoströmungen). Der für nichtoptische Methoden notwendige messtechnische Aufwand ist in vielen Fällen geringer als für der für LDA bzw. PIV. Im Folgenden sind einige Beispiele für den Einsatz der EDM als eine unter vielen nichtoptischen Methoden aufgeführt:

## 3 Messbeispiele im KSI

### 3.1 LDA

- Korrosionsmonitoring bei strömungsinduzierter und strömungsabhängiger Korrosion [4]
- Umströmung von elektrochemischen Sensoren, Optimierung des Ansprechverhaltens und der Sensitivität [5]
- Konvektion in galvanischen Bädern zur Metallabscheidung und Korrelation mit der lokalen Schichtdickenverteilung [6]
- Zylinderinnenströmung ungefeuerter Gegenkolbenmotoren
- Untersuchungen der Schutzgasströmung an Schweißbrennern [7] und Bild 3

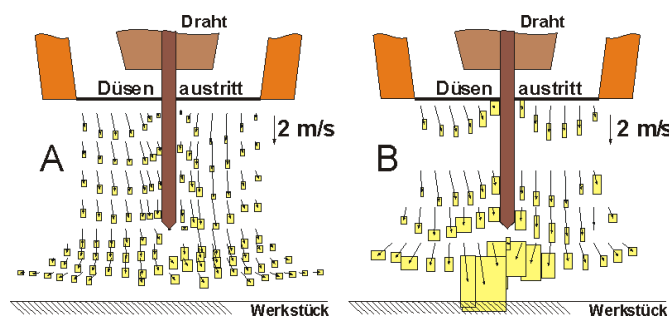


Bild 3: Geschwindigkeitsprofile der Schutzgasströmung an einem MAG-Brenner, gemessen mit LDA, A ohne Lichtbogen, B mit 200 A Sprühlichtbogen, Rechtecke symbolisieren die mittlere Standardabweichung der gemessenen Geschwindigkeiten

### 3.2 PIV

- Strömungsuntersuchungen in frei angeströmten Mikrostrukturen [8]
- Konvektion in galvanischen Bädern zur Beschichtung von Drucksieben [9] und Bild 4
- Visualisierung der Schutzgasströmung von Schweiß- und Plasmabrennern [10]

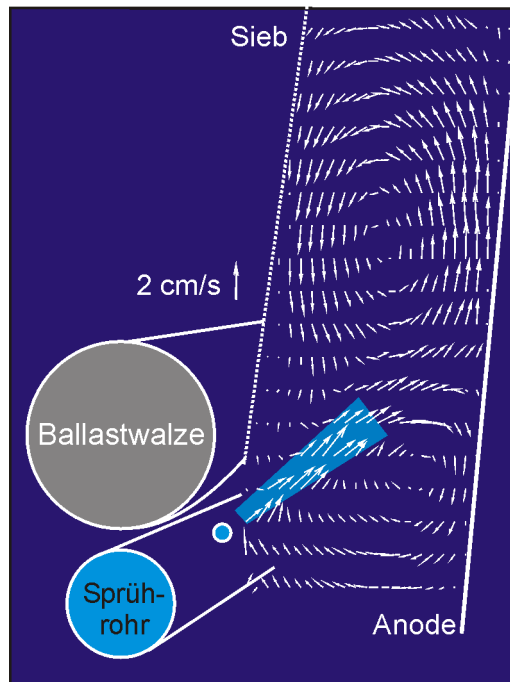


Bild 4: Geschwindigkeitsprofil in einem galvanischen Bad zur Beschichtung von Drucksieben, gemessen mit PIV, Mittelwert aus 40 Bildern

### 3.3 EDM

Im KSI verfolgte Anwendungsbeispiele sind:

- Anströmung von Sensoroberflächen [11]
- Konvektion in Mikrobohrungen bei freier Anströmung [8] und Bild 5

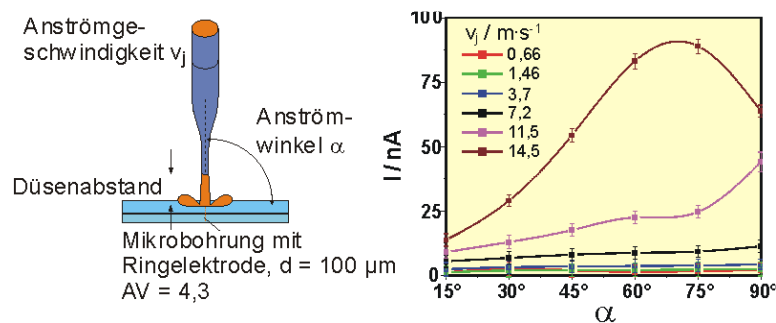


Bild 5: Konvektionsuntersuchungen in Mikrobohrungen, links Versuchsanordnung, rechts Diffusionsgrenzstrom an einer 50  $\mu\text{m}$  dicken Pt-Ringelektrode in Abhängigkeit von den Parametern der äußeren Anströmung, Strömungsmedium: Elektrolyt mit  $3 \cdot 10^{-3}$  mol/l  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ,  $2 \cdot 10^{-2}$  mol/l  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  und 0,5 mol NaOH

## 4 Technische Ausführung der Strömungsmessmethoden im KSI

### 4.1 LDA

Im KSI ist ein LDA vorhanden, das mit einem 100 mW –Argon-Ionen-Laser arbeitet und in Vorwärtsstreuung zweidimensionale Geschwindigkeitsmessungen zwischen ( $10^{-3}$  ...  $10^2$ ) m/s ermöglicht. Durch die Auswertung der Phasenlage des Streulichtes mit Hilfe mehrerer Detektoren (Phasen-Doppler-Anemometer, PDA) kann simultan zur Geschwindigkeit auch die Größe von Tracerpartikeln bestimmt werden, z. B. in Sprays. In Rückstreurichtung sind eindimensionale Geschwindigkeitsmessungen möglich. Bild 6 zeigt einen Messaufbau, mit dem Untersuchungen an Schweißbrennern durchgeführt wurden.

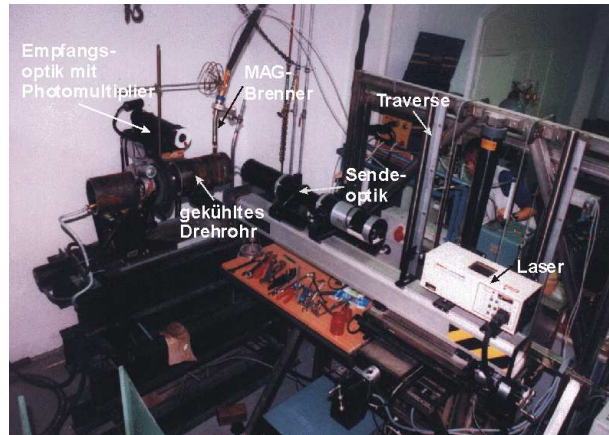


Bild 6: Versuchsanordnung für LDA-Messungen in Schutzgasströmungen von Schweißbrennern

#### 4.2 PIV

Die im KSI für PIV-Untersuchungen eingesetzten Gerätesysteme wurden in der jeweils benötigten technischen Ausführung für einige Wochen von einem kommerziellen Anbieter ausgeliehen. In Bild 7 ist ein Versuchsaufbau zur Untersuchung der Verteilung von eingespritztem Kraftstoff dargestellt.

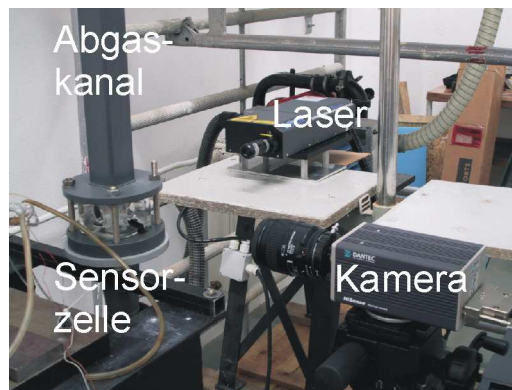


Bild 7: Versuchsaufbau für PIV-Untersuchungen der Sensorinnenströmung von gekapselten Abgassensoren

#### 4.3 EDM

Im KSI sind Strömungskreisläufe mit Volumina zwischen  $(10^{-3} \dots 4 \cdot 10^2)$  l und Volumenströme zwischen  $(10^{-4} \dots 10^2)$  l/min für verschiedene Flüssigkeiten vorhanden. Die Kreisläufe sind temperierbar, ermöglichen die gezielte Dosierung von Zusatzstoffen und enthalten optische Messzellen für Strömungsmessungen. Für die Durchführung von EDM-Messungen stehen Mehrkanalpotentiostaten zur Verfügung. Ein Strömungskreislauf mit transparenter Messzelle für Mikro-PIV-Messungen und EDM-Untersuchungen ist in Bild 8 gezeigt.

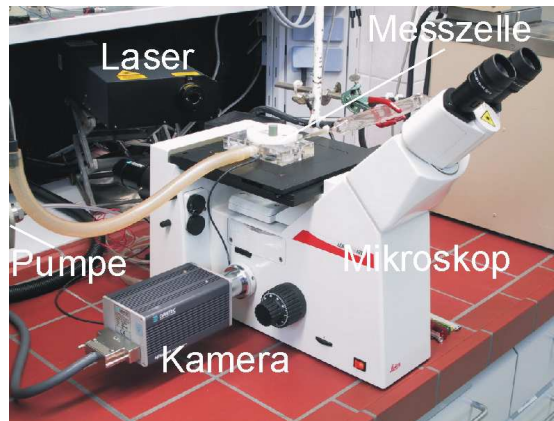


Bild 8: Strömungskreislauf und Messzelle für Untersuchungen der Strömung in frei angeströmten Mikrostrukturen mittels Mikro-PIV und EDM

## Literatur

- [1] F. Durst, A. Melling, J.H. Whitelaw: Theorie und Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie. Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1987
- [2] B. Ruck: Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. AT-Fachverlag, Stuttgart, 1990
- [3] V.G. Levich: Physikochemical hydrodynamics, Prentice-Hall International, London, 1962
- [4] J. Zosel, W. Fichtner, H. Kaden, B. Rau: Korrosionsmonitoring mit elektrochemischen Sensoren unter Einsatz von Evolutionsstrategien. *Materials and Corrosion* **47** (1996) 299-306
- [5] W. Oelßner, J. Zosel, F. Berthold, H. Kaden: Investigation of the dynamic response behaviour of ISFET pH sensors by means of laser doppler velocimetry (LDV). *Sensors and Actuators B* **27** (1995) 345-348
- [6] B. Reents, A. Thies, P. Langheinrich, J. Zosel: On line measurements of flow and mass transfer in micro holes with PIV and electrochemical sensor array. Proc. of the 53rd annual meeting of the International Society of Electrochemistry. 6th European Symposium on Electrochemical Engineering. Düsseldorf, 15.-20.09.2002, 245
- [7] J. Zschetzsche, U. Füssel, U. Guth, J. Zosel: Gasführung beim Schutzgasschweißen / Strömungsmessungen an Schweißbrennern. in: XIII. Wissenschaftliches Symposium TU Liberec – TU Dresden, Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2001, ISBN 80-7083-469-2, 17-21
- [8] J. Zosel, U. Guth, A. Thies, B. Reents: Flow measurements in micro holes with electrochemical and optical methods, *Electrochim. Acta*, **48** (2003) 3299-3305
- [9] J. Zosel,; F. Richter,; F. Müller: Optimierung der hydrodynamischen Bedingungen bei elektrochemischen Produktionsprozessen mittels Particle-Image-Velocimetry (PIV). *Scientific Reports, J. Univ. of Appl. Sci. Mittweida*, **10** (2002) 18-23
- [10] J. Zosel, U. Guth, K. Dörner, J. Zschetzsche, U. Füssel: Strömungsmessungen an Lichtbögen und Plasmen zur Materialbearbeitung mittels PIV und LDA. in D. Dopheide et al.: *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*. ISBN 3-00-011903-5, PTB, Braunschweig, 2003, 26.1-26.6
- [11] J. Zosel: Funktion und Anwendung elektrochemischer Sensoren in strömenden Medien unter Einbeziehung hydrodynamischer Messungen mittels Laser-Doppler-Anemometrie. Dissertation an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 1997