

Der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsfeldsensor - eine neue Technik für die Strömungsforschung

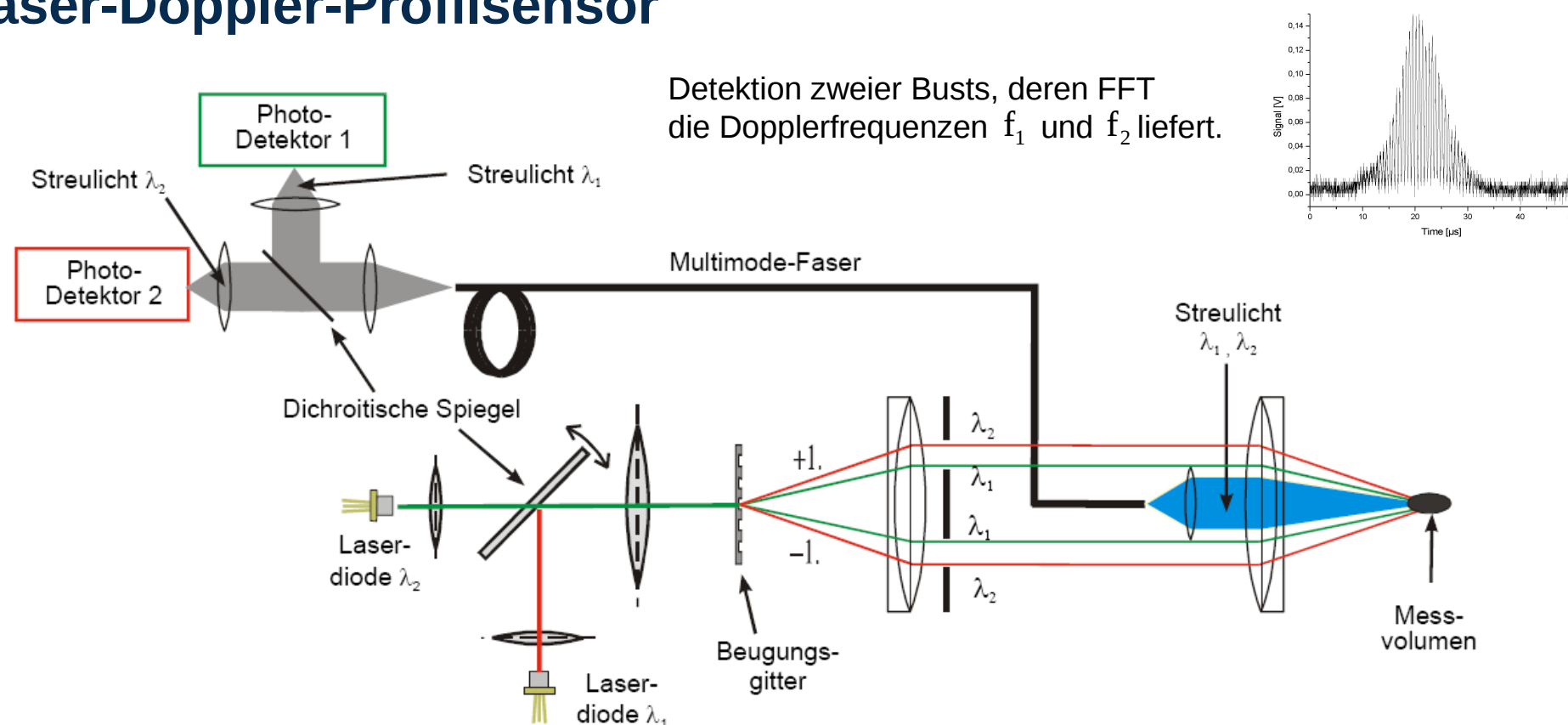
C. Skupsch, A. Voigt, L. Büttner, J. Czarske

E-mail: Ch.Skupsch@mailbox.tu-dresden.de
Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Prüftechnik
Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden

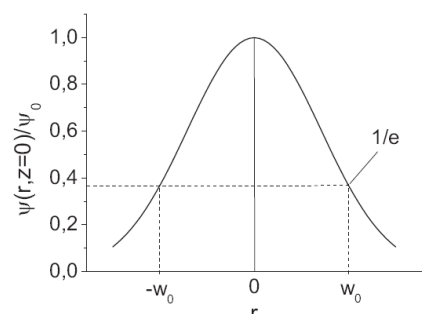
Einleitung

Es wird eine Weiterentwicklung des Laser-Doppler-Anemometers (LDA), ein Laser-Doppler-Geschwindigkeitsfeldsensor, vorgestellt, der zur flächenhaften Geschwindigkeitsmessung eingesetzt werden kann. Im Gegensatz zu kamerabasierten Messsystemen, wie μ -PIV, handelt es sich nicht um ein abbildendes Verfahren, womit die Ortsauflösung nicht durch Pixeldiskretisierung begrenzt ist. Im Vergleich zu μ -PIV liegt ein weiterer Vorteil im großen Arbeitsabstand von mehreren cm. Anwendungen finden sich in der Biomedizin, μ -TAS, Lab-on-a-chip oder im Feld der Mikromischer. Es können Ortsauflösungen kleiner als ein 1 μ m erreicht werden.

Laser-Doppler-Profilsensor



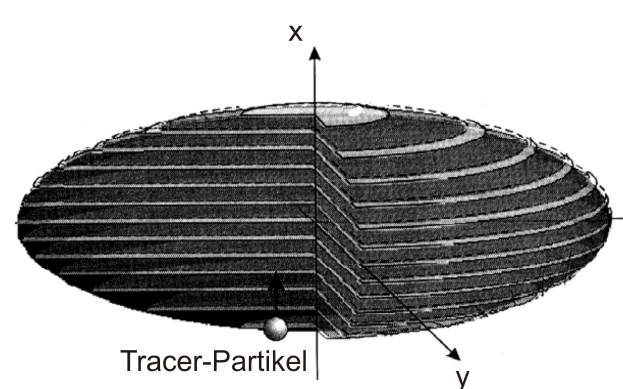
Achromatisches Laser-Doppler-Anemometer (LDA), Trennung der Signale durch Wellenlängenmultiplex (WDM)



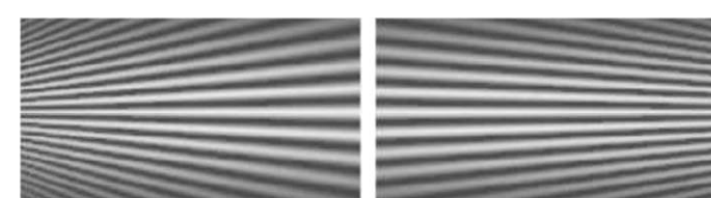
Feldamplitude des paraxialen, sphärischen Gaußschen Strahls:

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(i \cdot \arctan \frac{z}{z_R} - ikz - i \frac{k}{2} \frac{x^2 + y^2}{R(z)}\right)$$

Im Messvolumen bilden sich zwei Interferenzellipsoide aus.



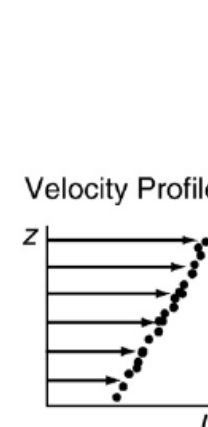
Die Streifenabstände $d(z)$ sind in einem der zwei Ellipsoiden konvergent, im anderen divergent und ermöglichen damit die Ortsbestimmung in z-Richtung.



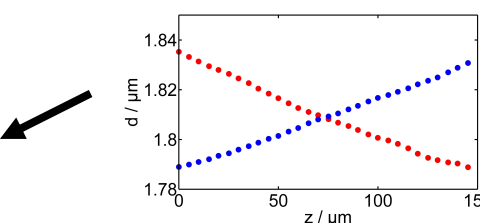
$$\sigma_z \sim \left(\frac{dq}{dz}\right)^{-1} \frac{1}{\sqrt{\text{SNR}}}$$

$$\left.\frac{dq}{dz}\right|_{\text{max}, z=0} = \frac{\lambda}{\pi w_0^2}$$

Stärkere Fokussierung verringert statistische Ortsunsicherheit σ_z



$$U(z) = f_1 \cdot d_1(z) ; i = 1, 2$$

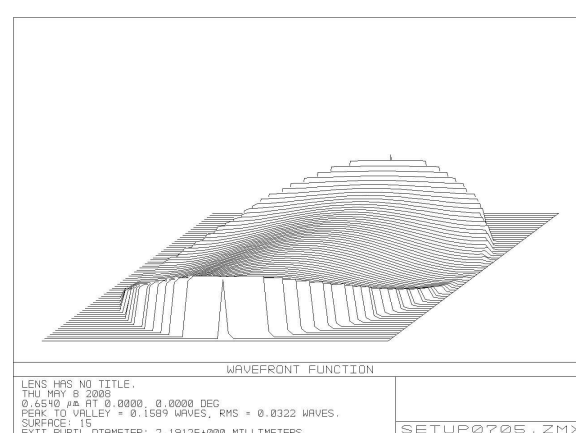


$$q(z) = \frac{d_1(z)}{d_2(z)} = \frac{f_2}{f_1}$$

Aberrationen durch Linsensystem und Fenster (Lab-on-a-chip / Mikrokanal)

Vorrangig sphärische Aberrationen und Astigmatismus ergeben Wellenfrontfehler für einen Einzelstrahl im Messbereich.

(Grafik, rechts: Wellenfrontaberration, ZEMAX)



Ziel: Anpassung der Wellenfront durch Zylinderlinsen oder DOE zur Reduktion zunehmender systematischer Messfehler bei zunehmender Fokussierung: $w_0 \leq 10 \mu\text{m}$

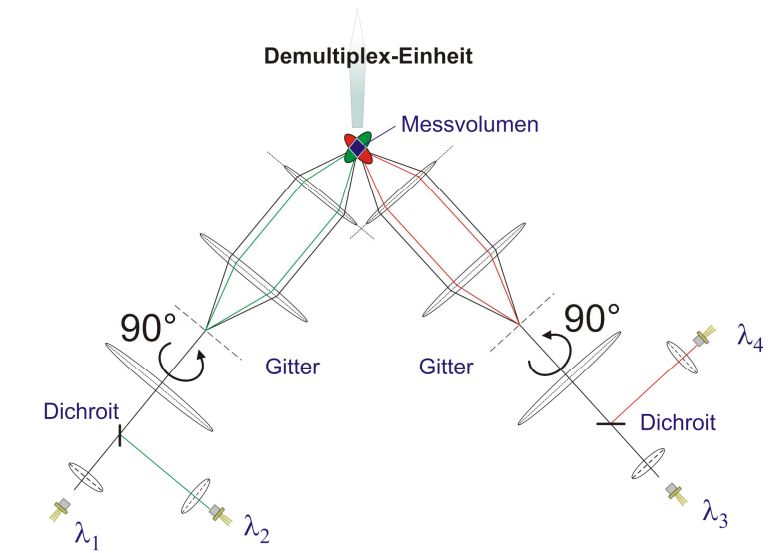
Laser-Doppler-Feldsensor

Zwei Profilsensoren mit vier verschiedenen Wellenlängen werden zu einem neuen Sensor kombiniert.

Drei Laserdioden und ein Festkörperlaser erzeugen vier Interferenzellipsoide, die im Messbereich überlagert werden. Damit steht ein Messvolumen von ca. $50 \times 50 \times 50 \mu\text{m}^3$ zur Verfügung.

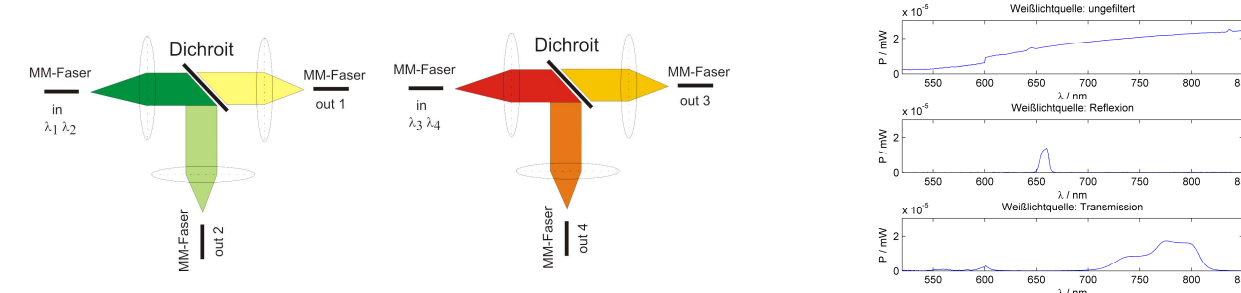
Die Drehung beider Sensorarme um 90° richtet die Streifensysteme aus. Sie liegen dann senkrecht zur Strömungsrichtung.

Das Streulicht wird in Vorwärtsrichtung detektiert um über MM-Fasern zur Demultiplex-Einheit geleitet.



Wellenlängen-Demultiplex

In Strahlteilern (linke Grafik) werden die Wellenlängen 532 nm und 830 nm sowie 654nm und 784nm (mittlere Grafik) mittels dichroitischer Spiegel getrennt.



Die Streulichtdetektion erfolgt mit Avalanche Fotodioden:

Empfindlichkeit: 2 MV/W
Bandbreite: 250 MHz

Anwendung 1

1D-Geschwindigkeitsfeld einer Mikrokanalströmung

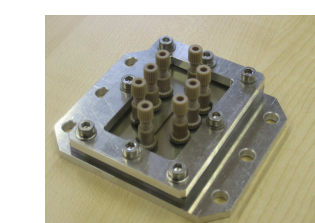
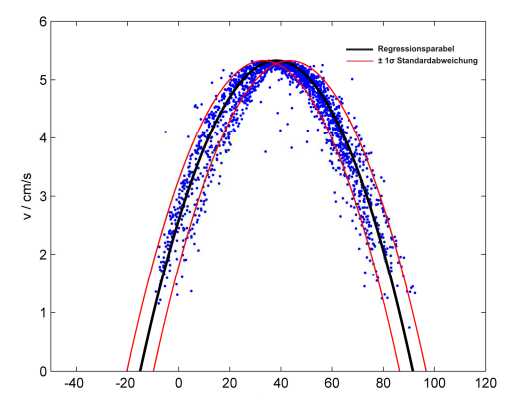
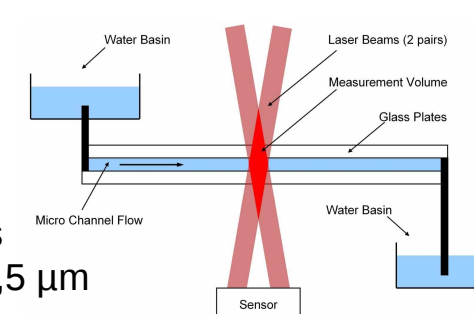


Abb.: Mikrokanal

Seeding: 1,3 μ m Polystyrolpartikel
Messbereichslänge: 150 μ m
Messpunkte (validiert): 920
Kleinste erfasste Geschwindigkeit: 1 cm/s
Kleinste erfasste Entfernung zur Wand: 1,5 μ m
Std. Abw. der Einzelwerte: 5 μ m
Ermittelte Kanalbreite: 106 μ m



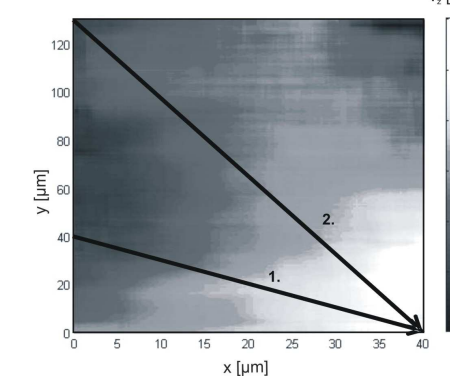
Anwendung 2

2D-Geschwindigkeitsfeld einer Düsenströmung

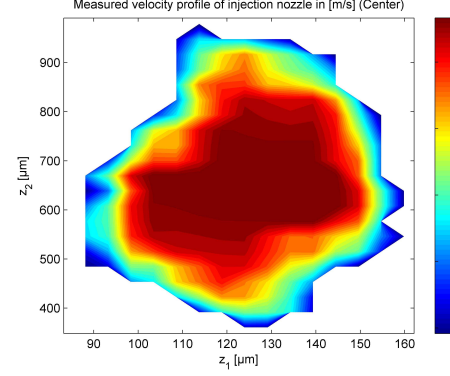
Luftströmung aus einer 260 μ m breiten Diesel-Einspritzdüse.



Strömungsaustritt der Düse



Die Spitze der Düse liegt in der unteren rechten Ecke.



Zentrale Strömung

Ausblick

- Einsatz neuer Hochleistungs-cw-Laser zur Messung bei hohen Signal zu Rausch Verhältnissen und Vergrößerung des Anstiegs der Kalibrierfunktion $q(z)$ zur weiteren Reduktion des statistischen Ortsunsicherheit σ_z
- Wandnahe Messung mit hoher Leistung durch Brechungsindexanpassung des Fluids an den Mikrokanal und den Einsatz kleinster Tracer-Partikel unter Berücksichtigung der Brownschen Molekularbewegung.

Zusammenfassung

Der Laser-Doppler-Feldsensor erreicht Ortsauflösungen im Mikrometer-Bereich und kann zur präzisen Strömungsvermessung in der Medizin und an Mikromischern eingesetzt werden.

Demonstriert wurden für die Ortsauflösung: $\sigma_z = 3,5 \mu\text{m}$, für den relativen Geschwindigkeitsfehler: $\frac{\Delta v}{v} = 8 \cdot 10^{-4}$

Literatur

J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller: "Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution", *Meas. Sci. Technol.* **13**(12): 1979–1989 (2002)