

Messung kleiner Volumenströme

(in Mikroleitungen, $\varnothing_{\text{hydraulisch}} 1 \dots 1000 \mu\text{m}$)

D. Petrak



Technische Universität Chemnitz
Institut für Mechanik und Thermodynamik
Professur Strömungsmechanik

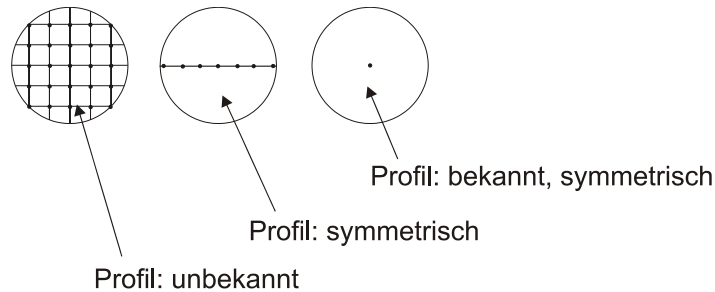
1

Inhalt

- Messung kleiner Volumenströme – ein Überblick
- Messung kleiner Volumenströme mittels LWL-Ortsfilter

Volumenstrommessung in Leitungen

- Netzmessung mittels Sonden, LDA, PIV, Ortsfilter



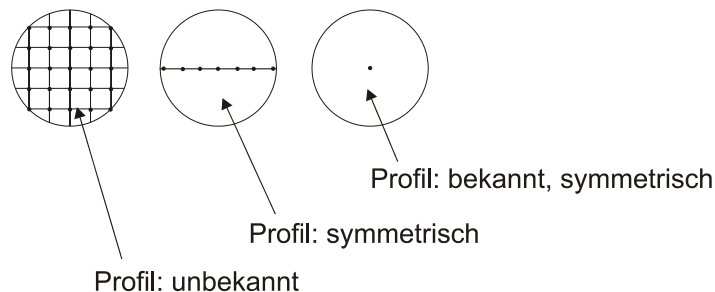
- Integrierende Messverfahren

mittels Wirkdruck, Wirbelerzeuger, Ultraschall, Corioliskraft(q_m), magnetische Induktion, Verdrängung, Turbine, Schwebekörper, Laufzeit, Gravimetrie, thermische Verfahren(q_m)

3

Volumenstrommessung in Mikroleitungen

- Netzmessung ~~mittels Sonden,~~ LDA, PIV, Ortsfilter, ...



- Integrierende Messverfahren

mittels Wirkdruck, ~~Wirbelerzeuger, Ultraschall, Corioliskraft(q_m), magnetische Induktion, Verdrängung, Turbine, Schwebekörper,~~ Laufzeit, Gravimetrie, thermische Verfahren(q_m)

4

Gravimetrische Methode: q_V für Flüssigkeiten



Indirekte Methode:

$$q_V = \frac{\Delta m_{fl}}{\Delta t \cdot \rho_{fl}}$$

Präzisionswaage, z.B.: E = 0,1 mg

G = 0,03 %

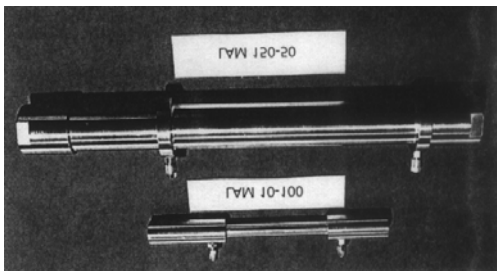
Reduzierung der Verdampfung

berührungsfreie Zuführung

gute Entlüftung

5

Druckabfall in Kapillaren: q_V



Laminare Rohrströmung
Newtonscher Flüssigkeiten:

$$v_{mean} = \frac{\Delta p}{8\eta l} r_0^2$$

$$q_V = \frac{\pi \Delta p}{8\eta l} r_0^4$$

Präzisionskapillaren, Kalibrierung

Präzisionsdruckgeber

Druckverluste im Ein- und Auslauf

6

Mikrodüsen, Mikroblenden, Venturirohre: q_V



Mikrodüsen: $q_{V, \text{gas}} = 0,2 \dots 200 \text{ l/h}$
 $U = 0,3 \%$

Kalibriermessplatz der PTB:

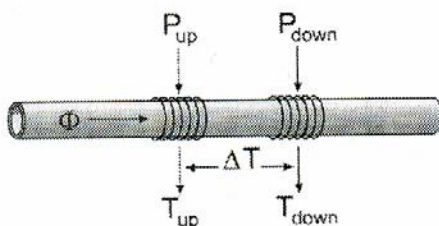
Präzisionsglaszylinder mit quecksilbergedichteten Kolben, interferometrische Messung des Kolbenweges

Mikroblenden: minimaler Blendendurchmesser 0,1 mm, 1 l/h Gas

Venturirohr: klassisch, min. Durchmesser 0,5 mm

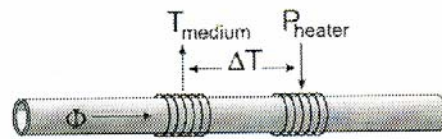
7

Thermische Sensoren: q_V



(a) Liquid flow sensor according to the constant power measurement principle

CP: $q_V < 6 \text{ ml/h}$



(b) Liquid flow sensor according to the constant temperature measurement principle

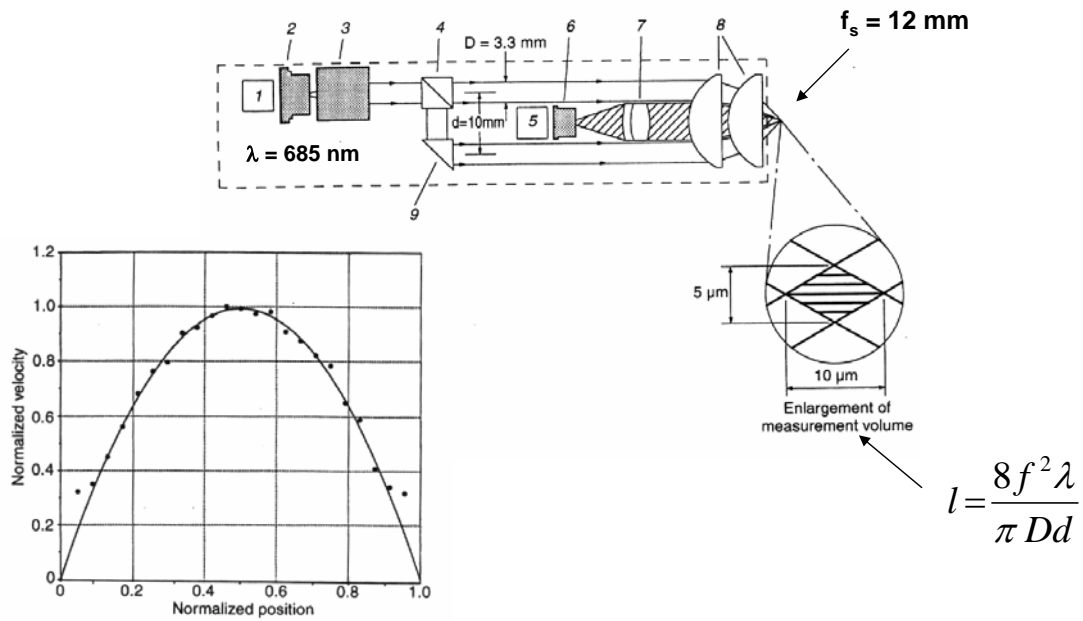
CT: $q_V > 6 \text{ ml/h}$

Messbereich:

Wasser: 0,002 ml/h – 120 ml/h

8

Laser-Doppler-Anemometrie: $v_{\text{lokal}}, (q_V)$

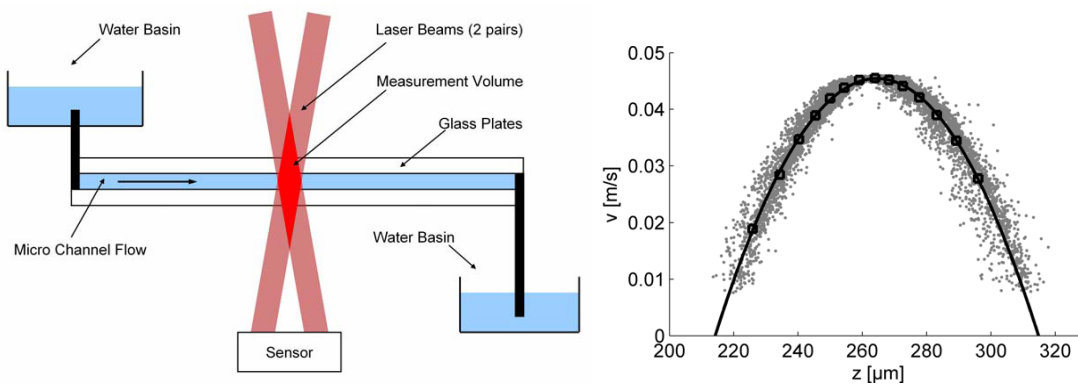


175 μm Glaskanal

A.K.Tieu et al., 1995

9

Laser-Doppler-Feldsensor: $v_{1D}, 2D, (q_V)$

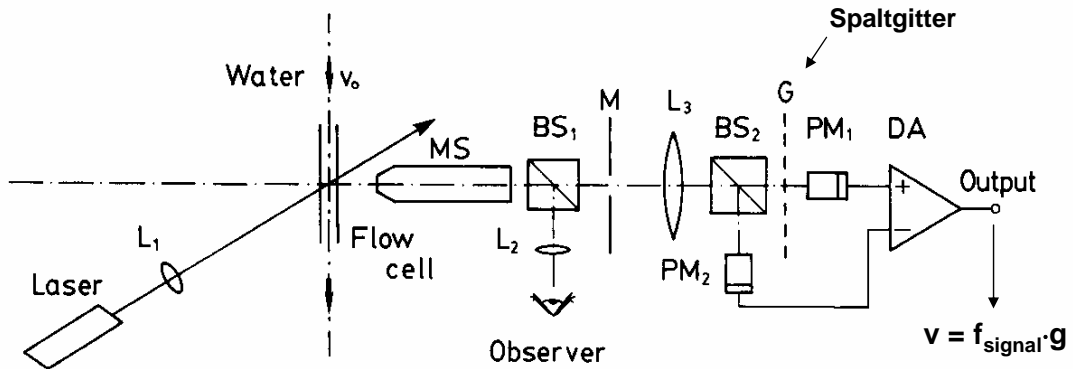


APPLICATION OF LASER-DOPPLER VELOCITY-FIELD AND VELOCITY-PROFILE SENSORS TO HIGHLY RESOLVED SHEAR FLOW MEASUREMENTS

K. Shirai, C. Bayer, A. Voigt, T. Pfister, L. Büttner, J. Czarske (TU Dresden)1,
H. Müller (PTB)2, D. Petrak (TU Chemnitz)3

Ortsfiltertechnik: $v_{\text{lokal}}, (q_v)$

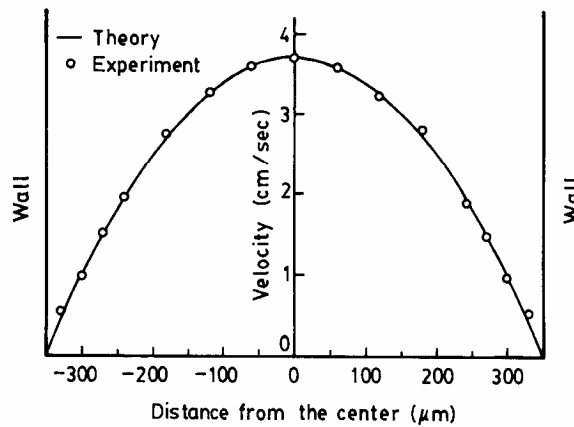
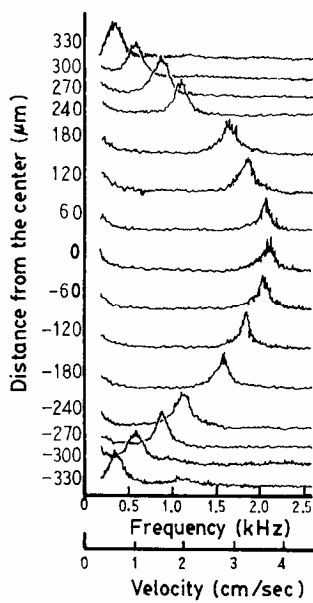
Prinzip: Abbildung des Objektes auf Ortsfilter (Spaltgitter) vor dem Photoempfänger



Y. Aizu et al., 1985

10

Ortsfiltertechnik: $v_{\text{lokal}}, (q_v)$



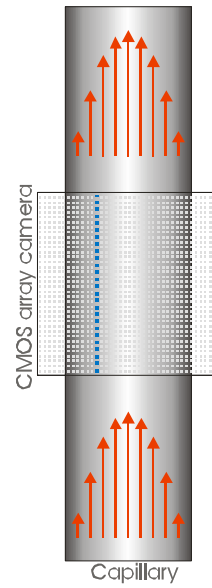
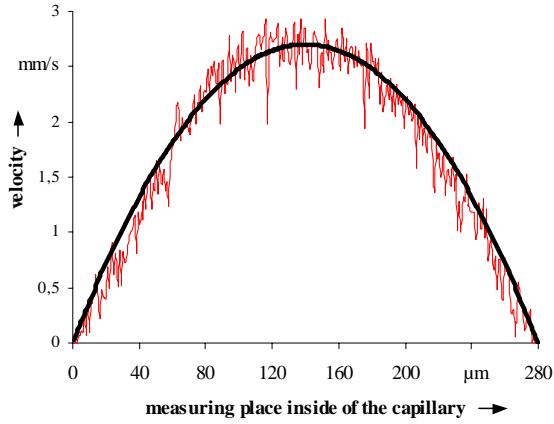
700- μm Glasrohr

Y. Aizu et al., 1985

11

Ortsfiltertechnik: $v_{\text{lokal}}, (q_V)$

CCD-Zeile mit Schieberegister als Ortsfilter mit virtueller Gitterbewegung

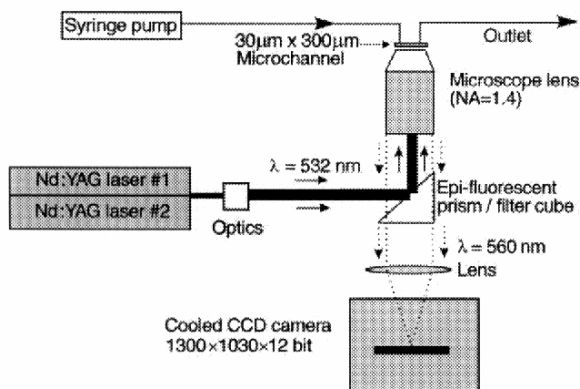


**280 μm -Glaskapillare,
Silikatpartikel 5 μm**

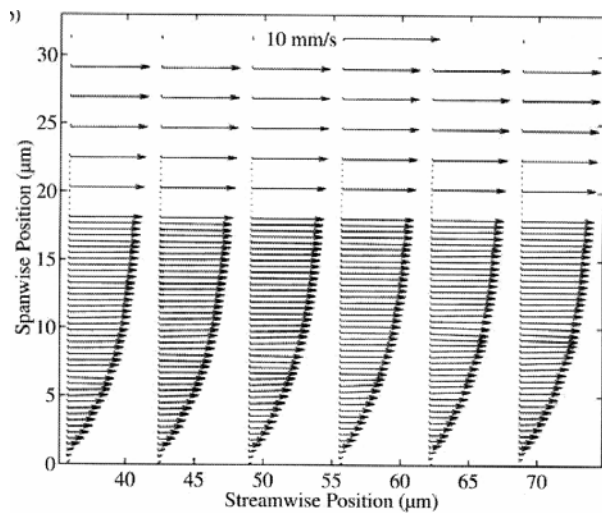
K. Michel, Diss. Uni. Rostock, 2000

12

PIV-Verfahren (particle image velocimetry) : $v_{\text{lokal}}, (q_V)$



$\delta t = 5 \text{ ns}, \Delta t = 500 \text{ ns}, -15^\circ\text{C}$

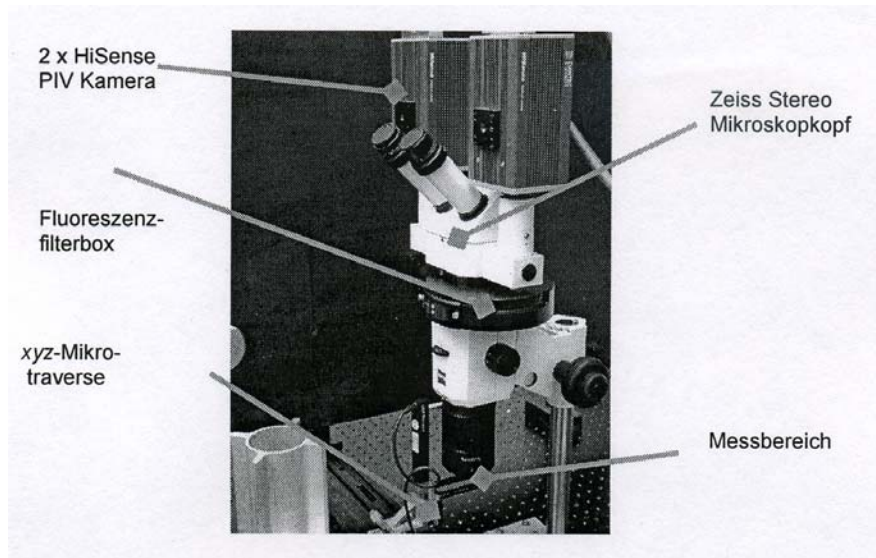


30 μm x 300 μm Glaskanal, $x = 200 \text{ nm}$

C. D. Meinhardt et al., 1999

13

Stereo μ PIV-System : v_{3D} , (q_V)

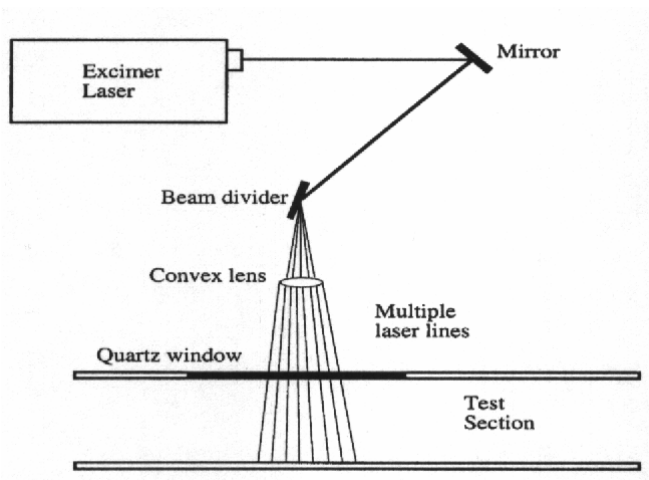


Minimales v-Feld: $400 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$, Abtastfleck: $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$

M. Brede et al., GALA 2007

14

MTV-Verfahren (molecular tagging velocimetry): v_{lokal}



Statt Tracerpartikel Nutzung eines wasserlöslichen phosphorizierenden Farbstoffs

Anregung mittels UV-Laserstrahl

Angeregte Farbstoffmoleküle senden unmittelbar grünes Licht aus (höhere Geschwindigkeiten)

Zusätzliche Temperaturempfindlichkeit

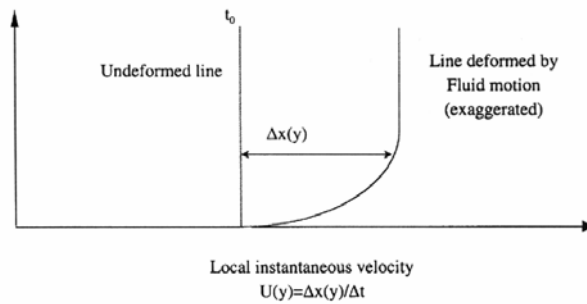
Optischer Zugang von zwei Seiten notwendig

Erfassung einer v -Komponente

D. Maynes and A.R. Webb, 2002

15

MTV-Verfahren (molecular tagging velocimetry): v_{lokal}



Gausscher UV-Strahl, fokussiert auf 20 μm auf 3,9 mm, 5 μm möglich für 20 μm Kapillare

$\lambda = 308 \text{ nm}$, 9 ns

11 μs CCD-Kamera-Aufnahme

20...250 μs Zeitverschiebung

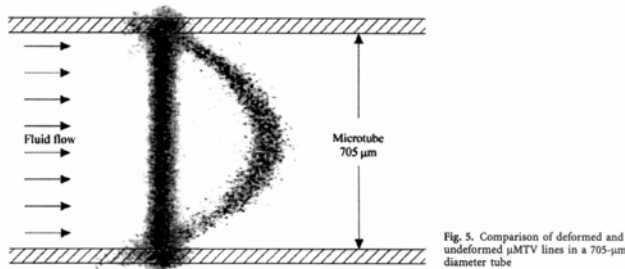


Fig. 5. Comparison of deformed and undeformed μMTV lines in a 705- μm diameter tube

Quarzglas Kapillare 705 μm

Brechzahlkorrektur

1 μs zwischen Puls und 1. Bild

nach 200 μs 2. Bild

$v \leq 3 \text{ m/s}$, $\pm 2,5 \%$

16

Verpackte Farbstoffe: v_{lokal}

Prinzip: Es werden „verpackte“ gelöste Fluoreszenzfarbstoffe eingesetzt, die durch einen UV-Laserstrahl entpackt werden und anschließend von einem CW-Laser angeregt werden.

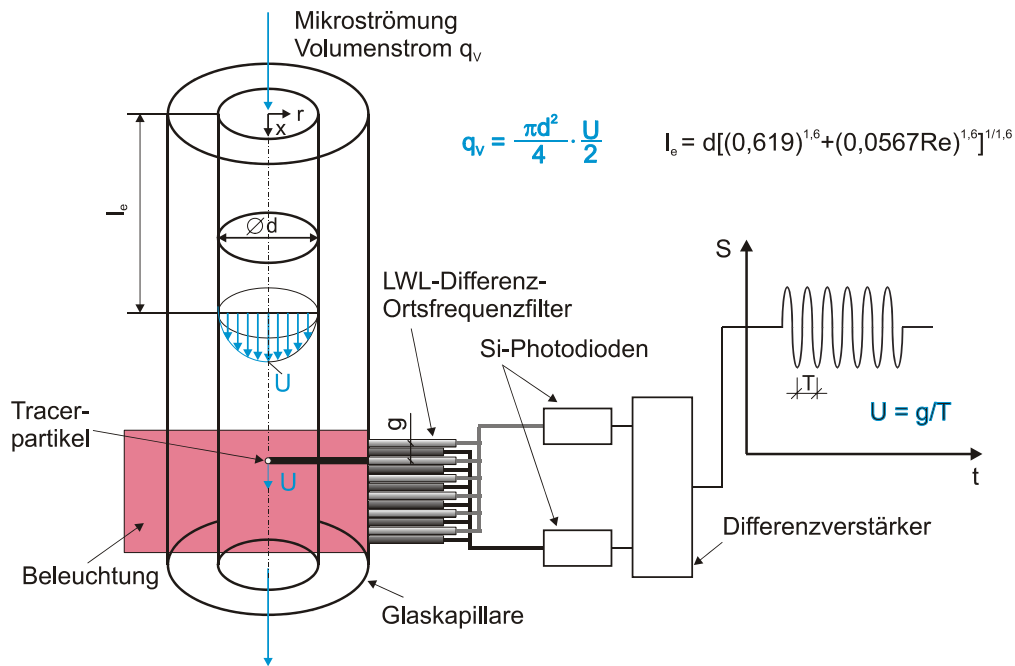
Zu zwei verschiedenen Zeiten wird dann die Bewegung der entpackten Region bildlich festgehalten.

Anwendung: 75 μm Kapillare mit druck- bzw. elektrokinetischem Antrieb, 355 nm, 5 ns, 3x Nd:YAG-Laser; 488 nm, Argon-Ionen-Laser; Strömungsprofile

P.H. Paul et al., 1998

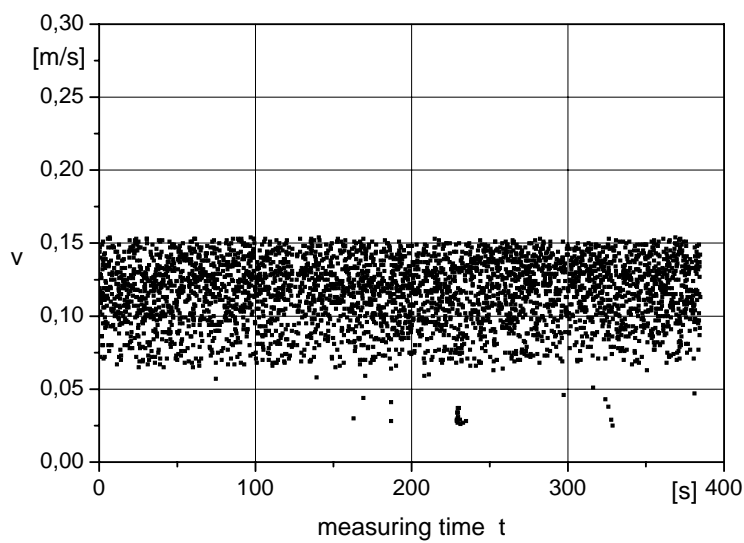
17

Prinzip LWL-Ortsfilter



18

Messbeispiel



$$q_v = \frac{\pi d^2}{4} \cdot u_m$$

$$u_m = U / 2$$

$$q_v = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{U}{2}$$

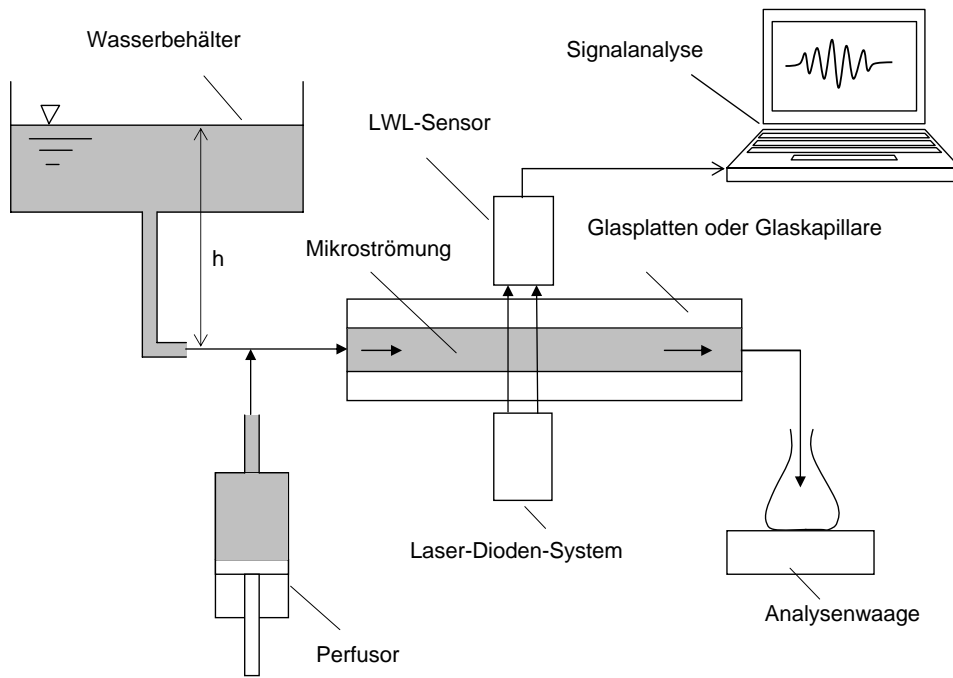
$$U = 0,159 \text{ m/s}$$

$$q_v = 5,065 \text{ ml/h}$$

5000 velocity values, $d_{\text{cap}} = 0,15 \text{ mm}$, $q_v = 5 \text{ ml/h}$,
water with microspheres $\varnothing 4 \mu\text{m}$, $Re = 11,79$

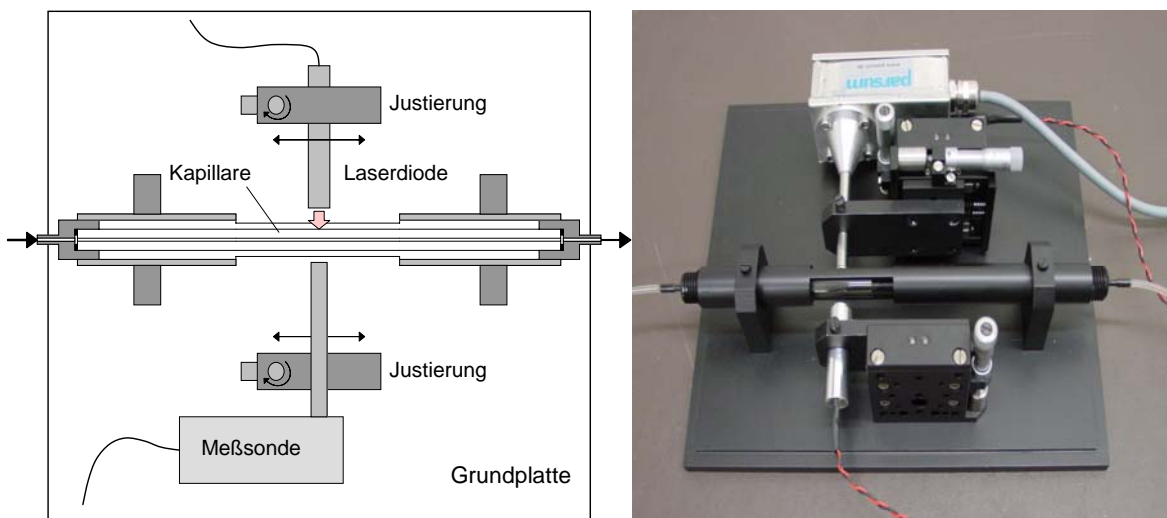
19

Messaufbau 1



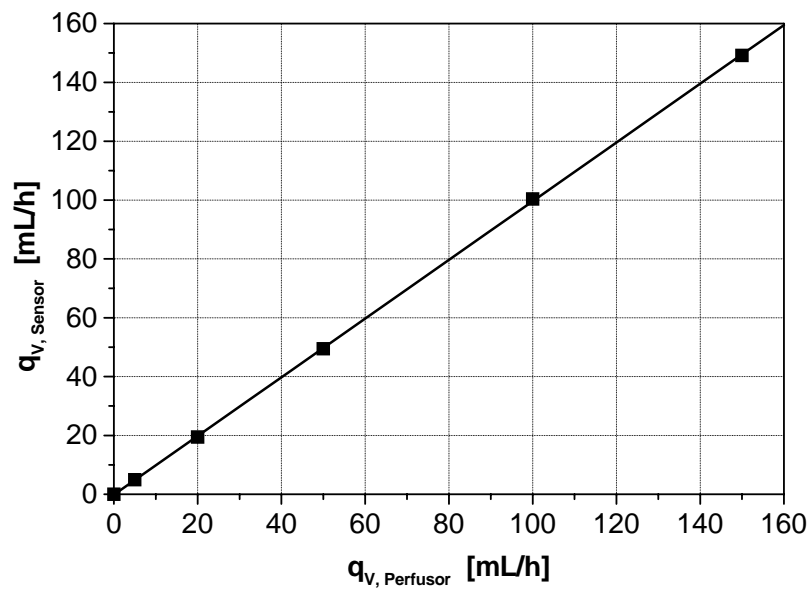
20

Messaufbau 1



21

Messaufbau 1

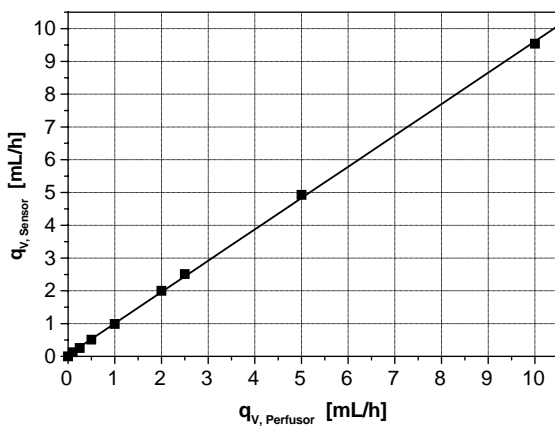


d = 0,5 mm, Polymer Microspheres: 4 μm , 1050 kg/m^3 , dest. Wasser, 1,5 %

Re = 3...106, $q_{V, \text{max}} = 3250 \text{ mL/h}$

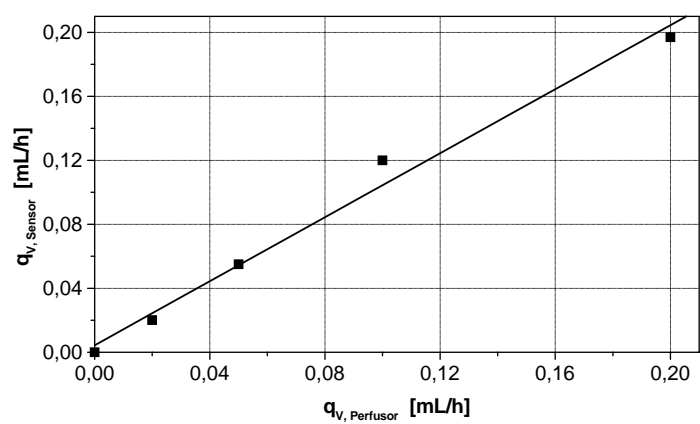
22

Messaufbau 1



d = 0,15 mm, Re = 0,2...24,

$q_{V, \text{max}} = 960 \text{ mL/h}$



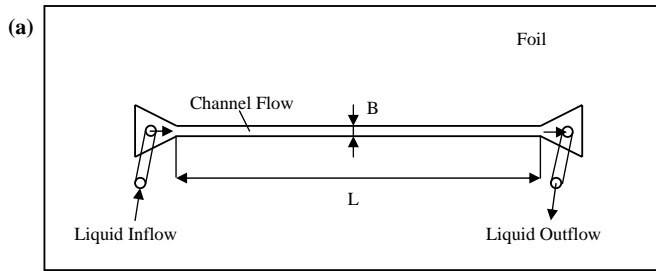
d = 0,05 mm, Re = 0,14...1,4

$q_{V, \text{max}} = 328 \text{ mL/h}$

Polymer Microspheres: 2 μm , 1050 kg/m^3 , dest. Wasser

23

Messaufbau 2

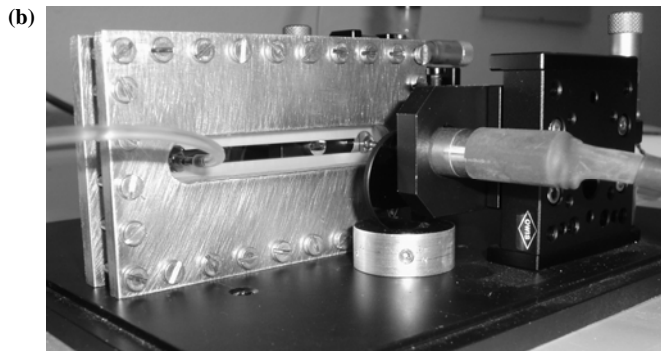


Metallfolie:

Dicke: 0,1 mm

Breite B = 2 mm

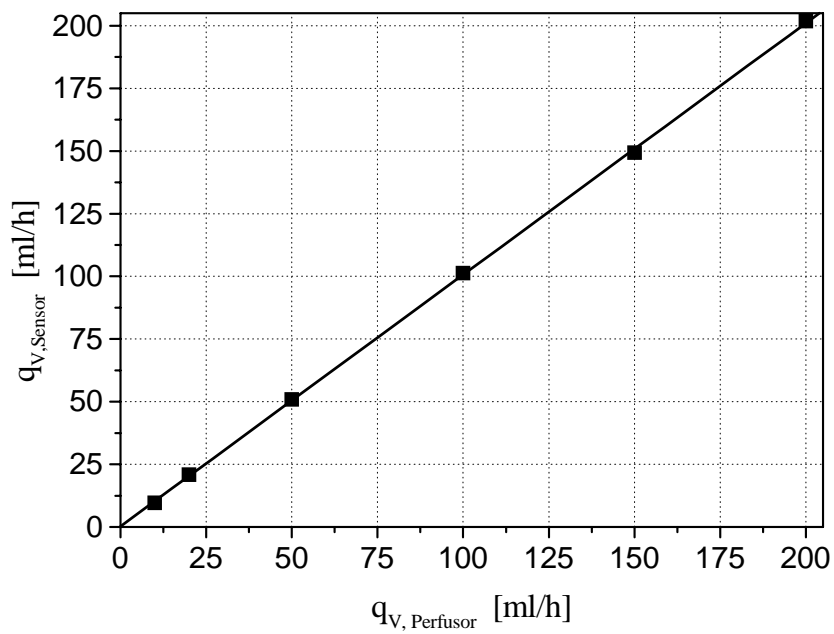
Länge L = 60 mm



$$q_V = A_{\text{Kanal}} \frac{2}{3} U$$

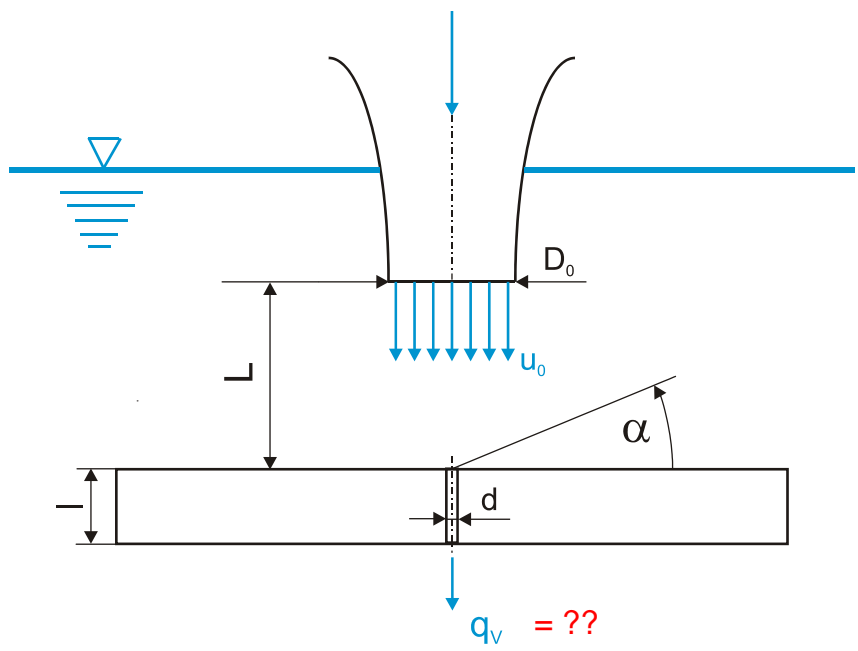
24

Messaufbau 2

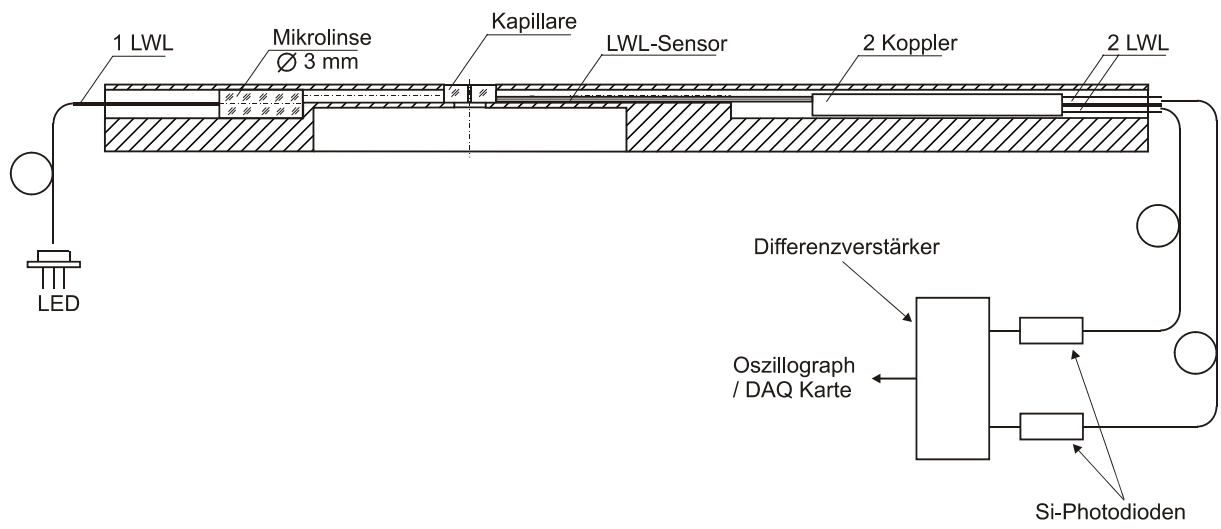


25

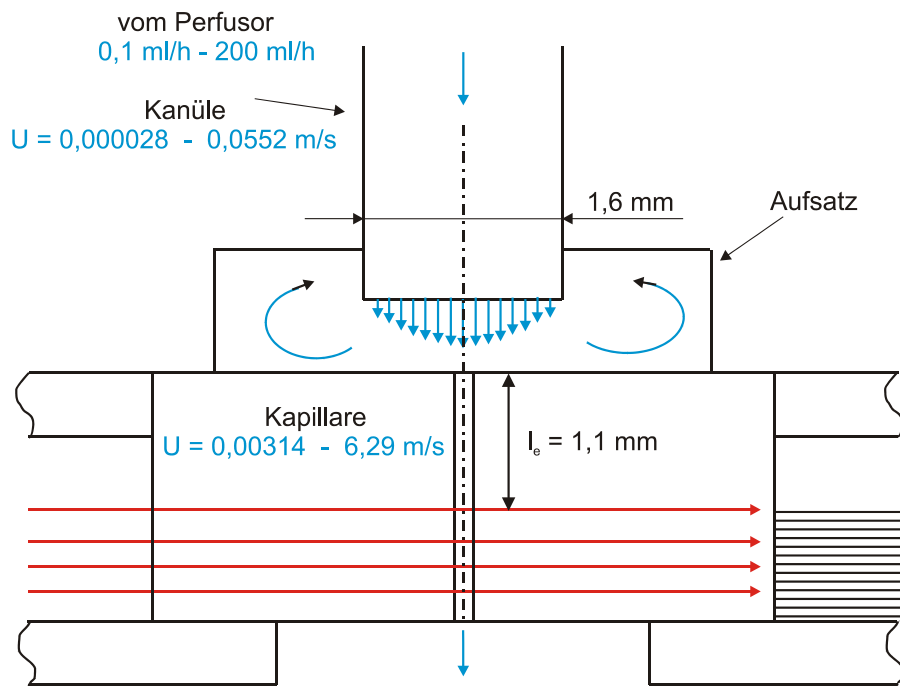
Messaufbau 3



Messaufbau 3

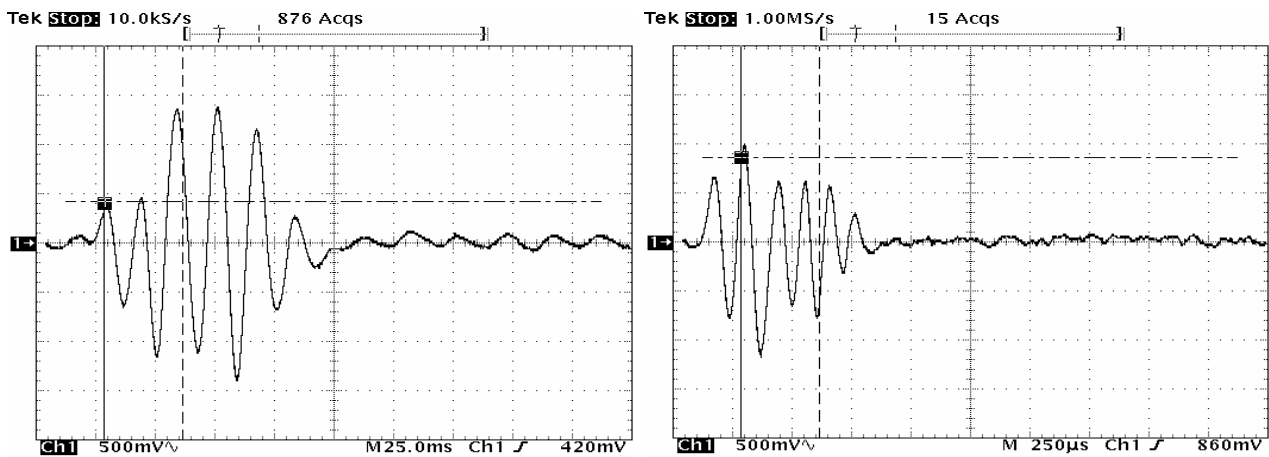


Messaufbau 3



28

Messaufbau 3



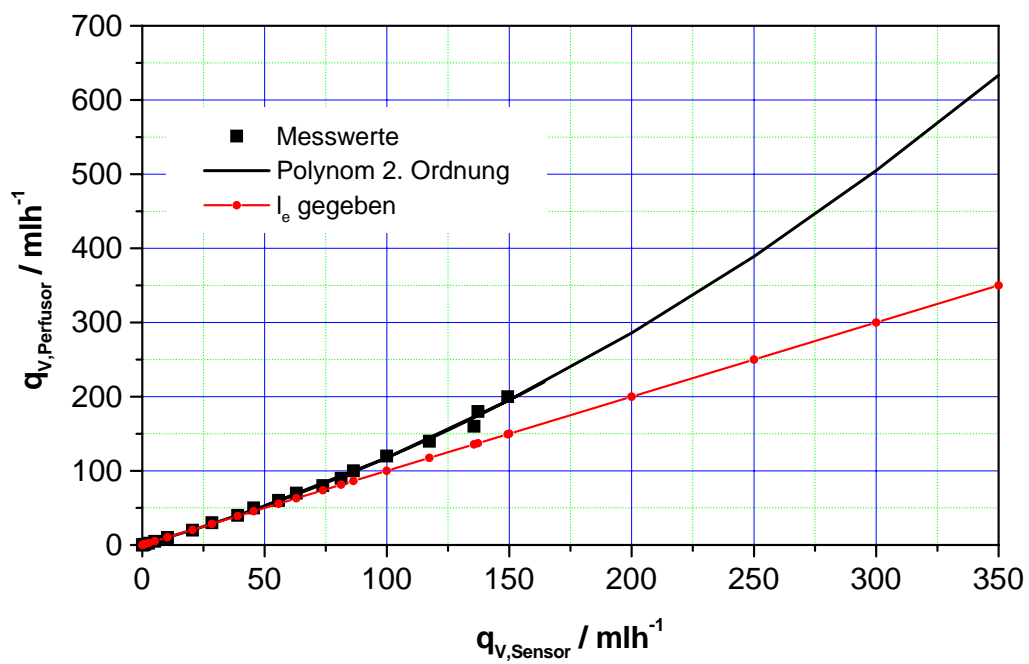
Messsignale von zwei Hohlglaskugeln

Durchfluss 0,5 ml/h

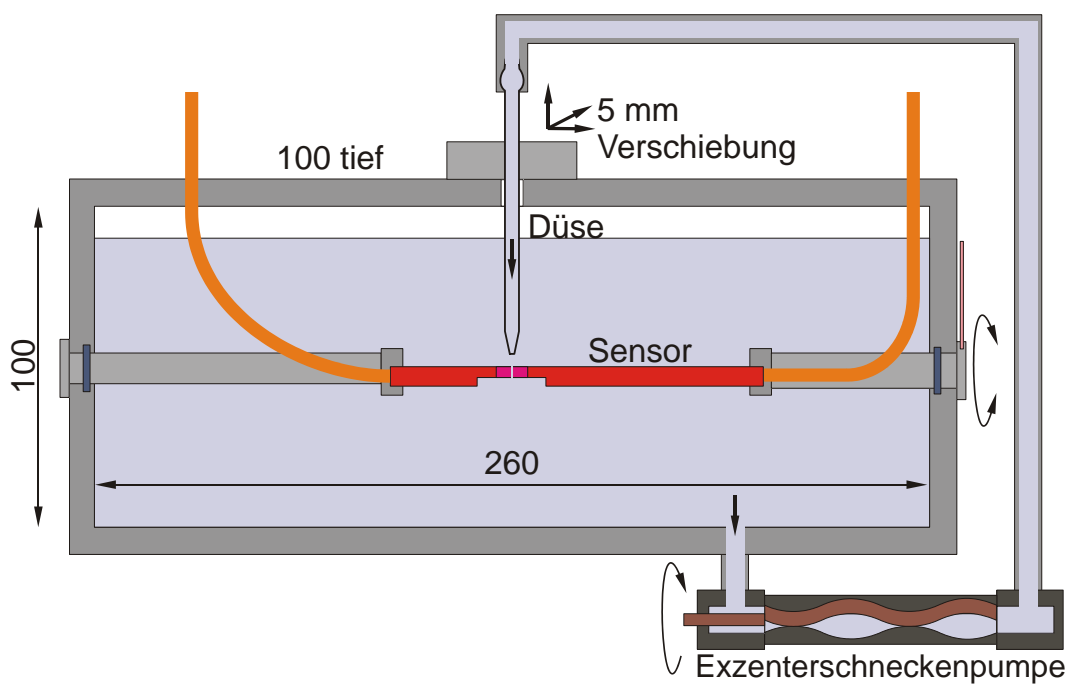
Durchfluss 80 ml/h

28a

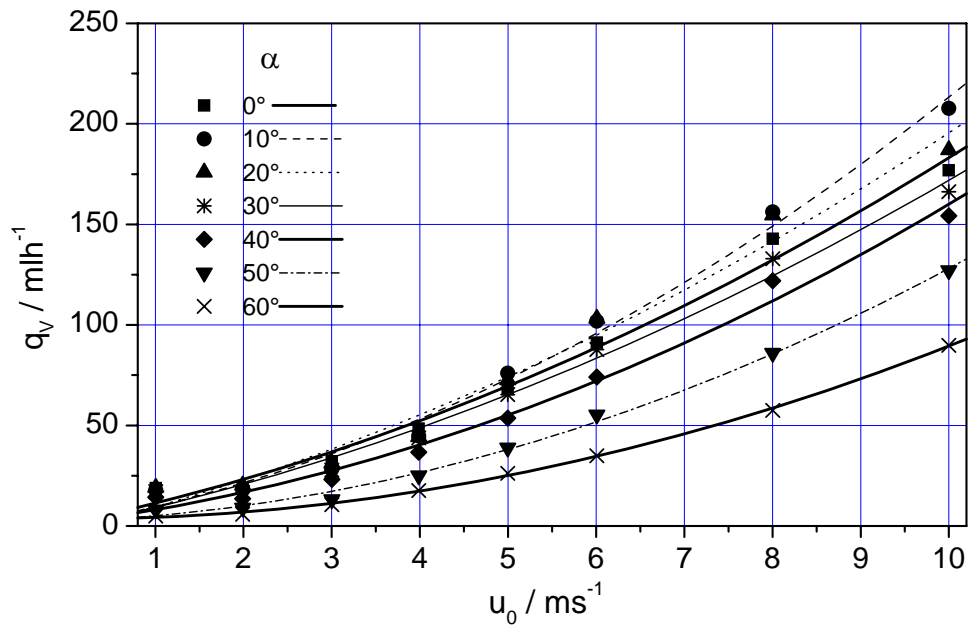
Messaufbau 3



Messaufbau 3



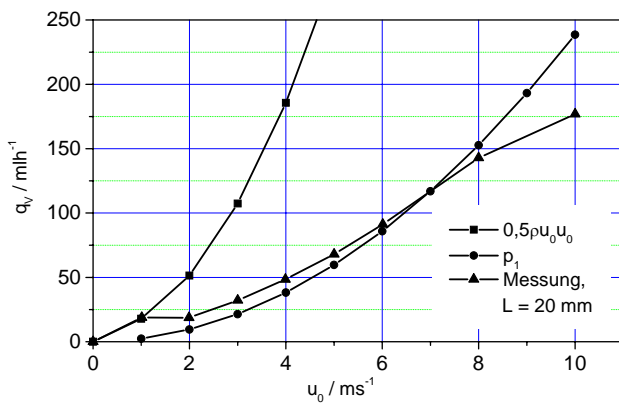
Messaufbau 3



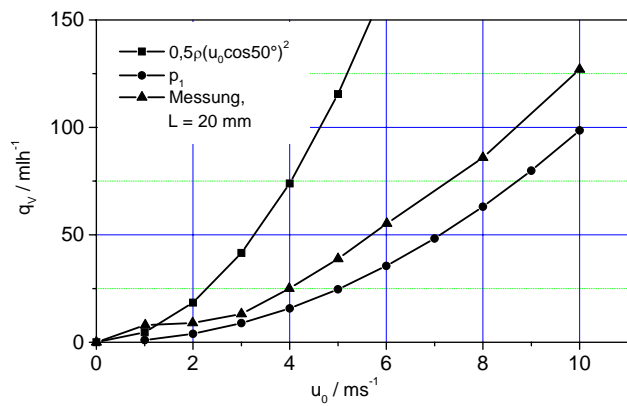
$L = 20 \text{ mm}, D_0 = 1,49 \text{ mm}$

31

Messaufbau 3









$L = 20 \text{ mm}, D_0 = 1,49 \text{ mm}, \alpha = 0^\circ$



$L = 20 \text{ mm}, D_0 = 1,49 \text{ mm}, \alpha = 50^\circ$

32

Zusammenfassung

-  LWL-Ortsfilter-Sensor ist für die Messung kleiner Volumenströme Newtonscher Flüssigkeiten in Kapillaren und Mikrokanälen geeignet.
-  Kalibrierfreie Messung
-  Voraussetzungen: ausgebildete laminare Strömung, Tracerpartikel
-  Abstimmung der Tracerpartikelgröße (0,8...10 μm) auf den Kapillarinne Durchmesser, Unsicherheit von q_V : minimal 1%
-  Erreichter Minimalvolumenstrom: $q_V = 0,02 \text{ ml/h}$, noch verwendbarer Kapillarinne Durchmesser: 50 μm
-  Miniaturisierung gegeben