

RHEOMETRISCHE MESSUNG AN EINER EBENEN MIKROKANALSTRÖMUNG

VISCOUS MEASUREMENT WITH A TWO-DIMENSIONAL MICRO-CHANNEL FLOW

Dieter Petrak

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mechanik und Thermodynamik, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz

Mikroströmungviskosimeter, Flüssigkeitsströmung, Fasergittersensor, Fließkurve
Micro-flow viscometer, liquid flow, fibre-array sensor, viscosity-shear rate function

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden Messungen an einer ebenen Mikrokanalströmung vorgestellt, die zur Bestimmung von Scherrate, Fließkurve und Zähigkeit der untersuchten Flüssigkeit geeignet sind. Messgrößen sind der Druckabfall längs des Mikrokanals und die Häufigkeitsverteilung der Strömungsgeschwindigkeit. Das zur Auswertung der Messdaten erforderliche Modell wird vorgestellt. Der einfache Versuchsaufbau besteht aus der schwerkraftgetriebenen Mikrokanalströmung und einem faseroptischen Ortsfilter-Sensor zur Geschwindigkeitsmessung. Die Untersuchungen erfolgten beispielhaft für Wasser als Newtonfluid mit scherratenunabhängiger Zähigkeit.

Einleitung

Das Fließverhalten von Produkten wie z. B. Ölen, Polymerlösungen und Druckfarben kennzeichnet sowohl die Produktendqualität als auch ihre Verarbeitung im Herstellungsprozess. Quantitative Aussagen zum Fließverhalten werden mit Hilfe unterschiedlicher Rheometer erhalten. Um in einem kontinuierlich anfallenden Produktstrom messen zu können, ist ein Online-Rheometer einzusetzen. Hierfür eignet sich ein Kapillarrheometer, bei dem für jeweils einen Volumenstrom der Druckabfall gemessen wird. Die schnelle und annahmefreie Messung von Fließkurven für den in der Rohrströmung vorkommenden Scherratenbereich bietet nach Arola et al 1997 ein auf dem Einsatz der kernmagnetischen Resonanz (NMR) beruhendes Rheometer, das in seinem Aufbau sehr aufwendig ist. Fließkurve und Scherviskosität werden dabei aus der Messung des Druckabfalls und der Messung der Geschwindigkeitshäufigkeitsverteilung ermittelt. Das Verfahren zeigt eine gute Übereinstimmung mit konventionellen Methoden und bietet das Potential für ein in-line und on-line Monitoring der Scherzähigkeit von Ein- und Mehrphasenfluiden.

Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Entwicklung eines einfachen Rheometers für transparente Flüssigkeiten, bei dem die aufwendige Messung der Geschwindigkeiten mittels NMR durch eine optische Messung mit Hilfe eines Ortsfilterverfahrens ersetzt wird. Damit ist hier die Existenz von Tracerpartikeln in der Flüssigkeit für die Messung erforderlich. Anstelle einer Kapillare mit Kreisquerschnitt wird ein Mikrokanal mit Rechteckquerschnitt eingesetzt, in dem eine ebene Kanalströmung vorliegt.

Messprinzip

Die zu untersuchende Flüssigkeit durchströmt nach Abb. 1 druckgetrieben einen Mikrokanal, dessen Rechteckquerschnitt so gewählt wird, dass sich eine ebene laminare Strömung einstellt. Die Messgrößen Druckabfall Δp längs des Kanals sowie die Geschwindigkeitshäufigkeitsverteilung $f(u)$ werden in ein physikalisches Modell eingesetzt, das die Bestimmung von Scherrate, Fließkurve und Scherzähigkeit der untersuchten Flüssigkeit gestattet.

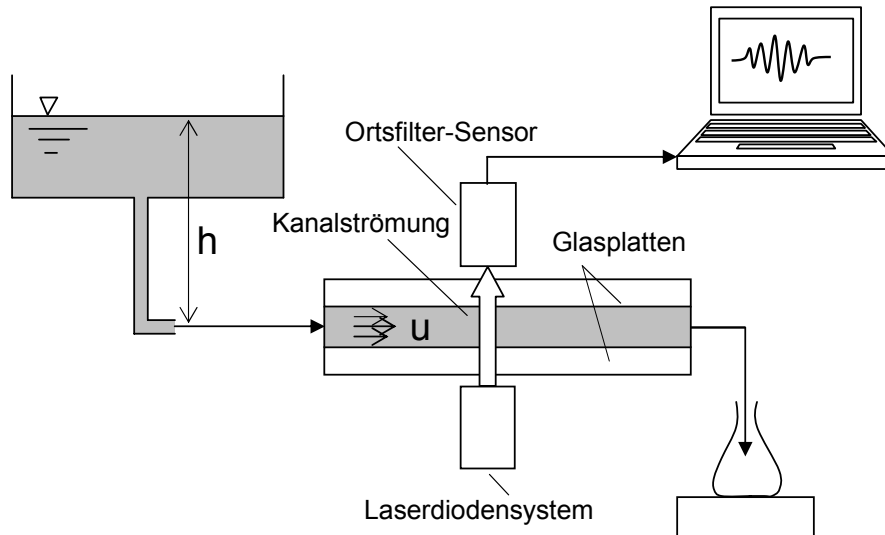


Abb. 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus

Die Geometrie des Kanals, Koordinatensystem und Unterteilung des Kanalvolumens sind in Abb. 2 dargestellt. Nach Abb. 2 besitzt der Mikrokanal eine Kanallänge L und einen Kanal-

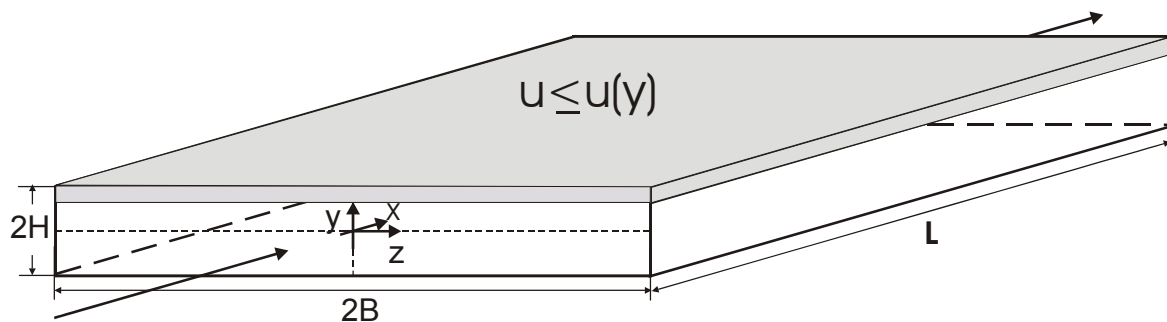


Abb. 2: Kanalgeometrie

querschnitt $2H \cdot 2B$, wobei $2H \ll 2B$ ist. Im Kanal liegt eine ebene Strömung vor, deren Geschwindigkeit u in x -Richtung nur von der y -Koordinate abhängt: $u = u(y)$. Unter Einsatz eines faseroptischen Ortsfilter-Sensors nach Petrak 2005 wird in y -Richtung über die Länge des Sensors die Strömungsgeschwindigkeit $u(y)$ erfasst und als Häufigkeitsdichteverteilung $f(u)$ dargestellt. Dabei erfolgt die Geschwindigkeitsmessung mittels dichteneutraler Tracerpartikel, die in der Flüssigkeit vorhanden sind. Aus der Häufigkeitsdichteverteilung $f(u)$ wird über eine Integration die zugehörige Häufigkeitssummenverteilung $F(u)$ erhalten.

Mit Hilfe des in Abb. 2 dargestellten Teilvolumens des Kanals kann ein Zusammenhang zwischen der Häufigkeitssummenverteilung $F(u)$ und der Ortskoordinate y hergestellt werden.

Im Teilvolumen befinden sich alle Geschwindigkeiten u , die kleiner als $u(y)$ sind. Das gilt analog auch für $u(-y)$. Aus der Definition der Summenhäufigkeit erhält man dann

$$F(u) = \frac{H \cdot 2B \cdot L - y \cdot 2B \cdot L}{H \cdot 2B \cdot L} = 1 - \frac{y}{H} \quad (1)$$

und nach Differenzieren von Gleichung (1)

$$-\frac{du}{dy} = \frac{1}{H \cdot f(u)} \quad (2)$$

Aus der Beziehung (1) folgt das Geschwindigkeitsprofil $u(y)$ und aus der Beziehung (2) die Abhängigkeit der Scherrate $-du/dy$ von u bzw. y .

Für die Schubspannung τ erhält man die Beziehung (3)

$$\tau = \frac{\Delta p \cdot B \cdot y}{L(B + y)} \quad (3)$$

woraus sich unter Verwendung des Zusammenhangs $y(-du/dy)$ aus (1) und (2) die Fließkurve $\tau(-du/dy)$ ergibt.

Unter Verwendung des Newtonschen Ansatzes gilt dann für die Scherzähigkeit η :

$$\eta = -\frac{\tau}{du/dy} \quad (4)$$

Aus der Fließkurve $\tau(-du/dy)$ lässt sich die Scherzähigkeit η in Abhängigkeit von der Scherung $-du/dy$ ableiten. Der hier dargestellte Algorithmus gilt sowohl für Newtonfluide als auch für Nichtnewtonfluide.

Messaufbau

Der Mikrokanal wird von einer 0,1 mm dicken Folie aus Neusilber gebildet, die sich zwischen zwei Glasplatten befindet und die in Abb. 3 angegebenen Abmessungen besitzt.

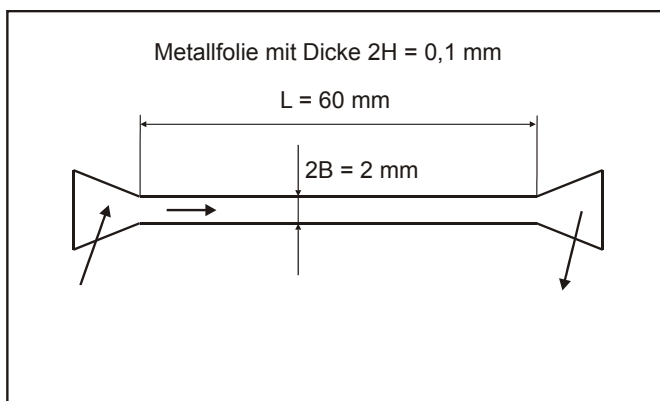


Abb. 3: Kanalabmessungen

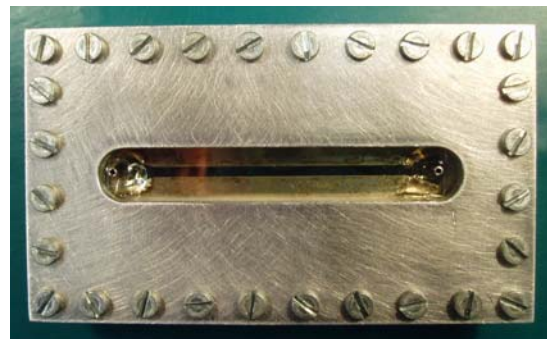


Abb. 4: Sandwichaufbau

Abb. 4 zeigt den gewählten Sandwichaufbau des Mikrokanals. Der Druckabfall Δp entspricht dem statischen Druck $\rho g h$ der untersuchten Flüssigkeit, wobei h die Höhe des Flüssigkeits-

spiegels in einem Vorratsbehälter gegenüber dem Höhenniveau des horizontal angeordneten Mikrokanals ist. Der Druckabfall über die Kanaleinlaufänge l_e wird abgeschätzt. Der Aufbau des faseroptischen Ortsfilter-Sensors ist in Abb. 5 dargestellt.

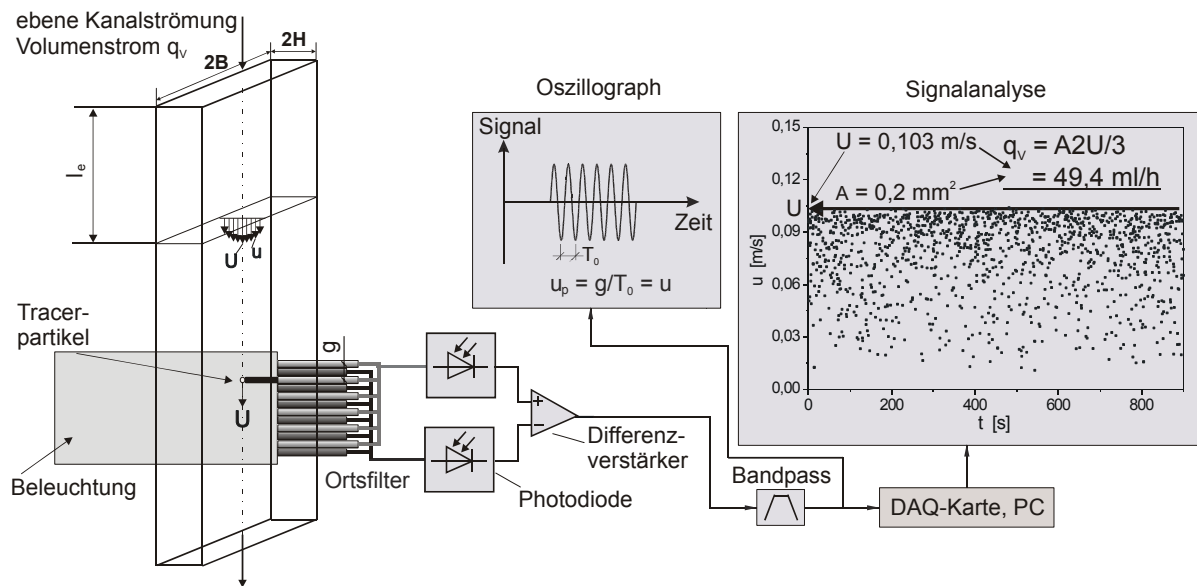


Abb. 5: Faseroptischer Ortsfilter-Sensor plus Signalanalyse

Das Differenz-Ortsfilter besteht aus 12 Stufenindexfasern und besitzt eine Filterkonstante $g = 170 \mu\text{m}$. Als Beleuchtungseinheit wird ein Laserdiodenmodul verwendet mit einer Ausgangsleistung von 3 mW bei einer Wellenlänge von 670 nm. Bestandteile der Signalanalyse sind die Frequenzanalyse mittels FFT und verschiedene Bausteine der Signalvalidierung.

Messergebnisse

Beispielhaft wurde das Newtonfluid destilliertes Wasser benutzt, dem kugelförmige Tracerpartikel mit $2 \mu\text{m}$ - und $4 \mu\text{m}$ - Durchmesser sowie einer Dichte von 1050 kg/m^3 zugesetzt wurden. Bei vorgegebenem Volumenstrom q_v mittels Kolbenpumpe konnte mit Hilfe des Vergleichs zwischen gemessenem Volumenstrom anhand der analytischen Lösung $q_v = 2H \cdot 2B \cdot U \cdot 2/3$ gezeigt werden, dass sich im Mikrokanal eine ebene Strömung einstellt. U ist die gemessene Maximalgeschwindigkeit in der Kanalachse. Es stellte sich über die Höhe $h = 0,22 \text{ m}$ des Vorratsbehälters ein Volumenstrom von $21,6 \text{ ml/h}$ ein ($U = 0,045 \text{ m/s}$, $Re = 3$). Die Einlaufänge l_e wurde nach Durst et al 2005 zu ca. $0,1 \text{ mm}$ bestimmt. Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgten an der Position $x = 30 \text{ mm}$.

In Abb. 6 a) ist die gemessene Häufigkeitsdichteverteilung $f(u)$ dargestellt, die bezüglich der Klassenmittengeschwindigkeit zu korrigieren ist. Eine weitere Korrektur ergibt sich aus dem partikelfreien Wandbereich. Die Berechnung der Liftkräfte auf rotierende und nichtrotierende Partikel in Scherströmungen nach Saffmann 1965 und Crowe et al 1998 zeigt einen zu vernachlässigenden Lifteffekt. In Abb. 6 b) ist die korrigierte Häufigkeitsdichteverteilung $f(u)$ angegeben, aus der sich die in Abb. 7 dargestellte Häufigkeitssummenverteilung $F(u)$ durch Integration gewinnen lässt.

Mit Hilfe der Beziehung (1) ist jetzt die in Abb. 8 dargestellte Abhängigkeit $y(u)$ gegeben. Zum Vergleich ist das sich aus der analytischen Lösung ergebende Geschwindigkeitsprofil

der ebenen laminaren Kanalströmung angeführt: $y = H \sqrt{1 - \frac{u}{U}}$.

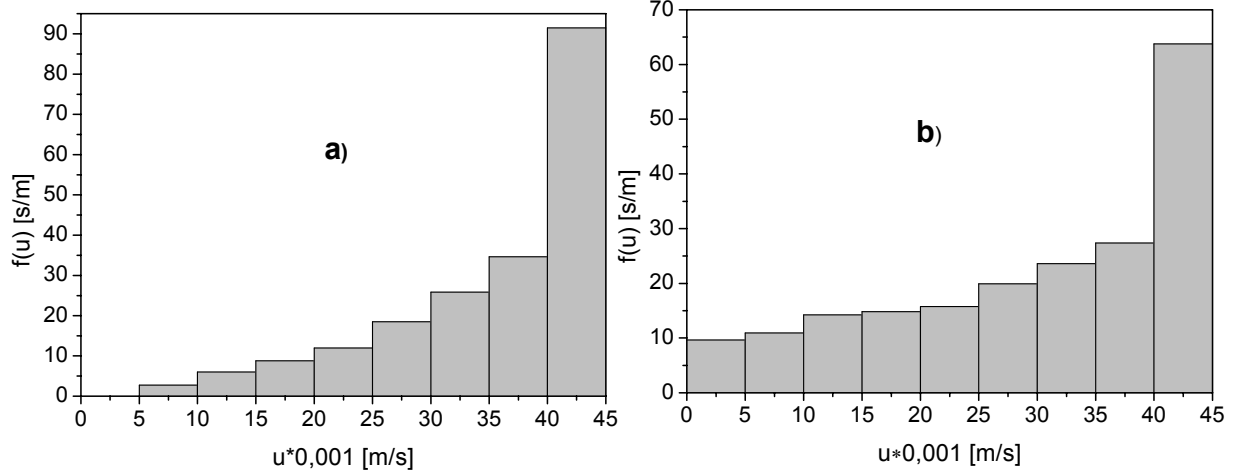


Abb. 6: a) gemessene Häufigkeitsdichteverteilung, b) korrigierte Häufigkeitsdichteverteilung

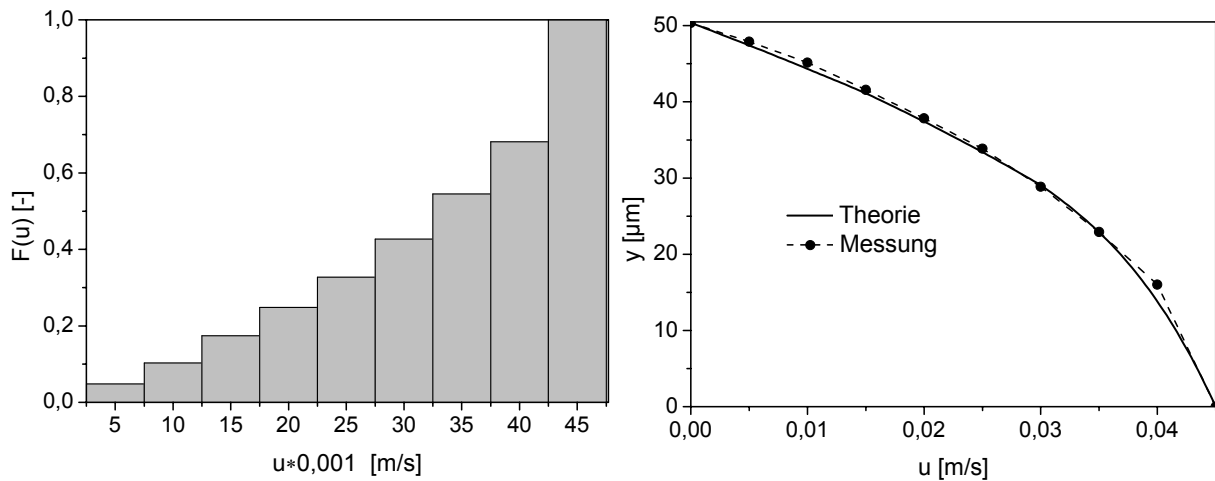


Abb. 7: Summenhäufigkeitsverteilung aus Abb. 6 b)

Abb. 8: Geschwindigkeitsprofil

Scherrate $-du/dy$ (y) und Fließkurve $\tau(-du/dy)$ zeigen die Abbildungen 9 und 10.

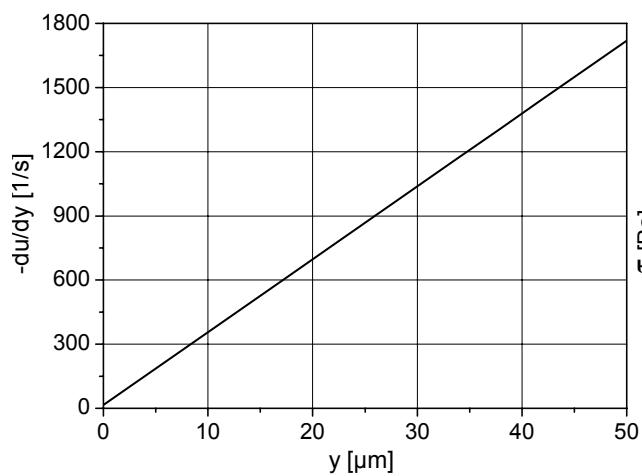


Abb. 9: Scherrate über y

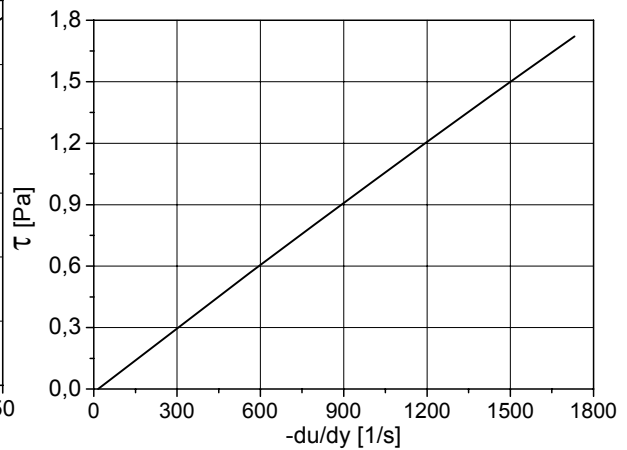


Abb. 10: Fließkurve

Aus der Beziehung (4) bzw. Abb. 10 ergibt sich die gesuchte Scherzähigkeit in Abhängigkeit von der Scherrate. Wie erwartet und aus Abb. 11 ersichtlich, ist die Zähigkeit für Wasser als Newtonfluid unabhängig von der Scherrate (Unsicherheit kleiner als 0,8 %).

Die Anwendung von Modell und Messverfahren ist nicht auf Newtonfluide begrenzt. Voraussetzungen sind aber die optische Transparenz der Flüssigkeit und das Vorhandensein geeigneter Tracerpartikel.

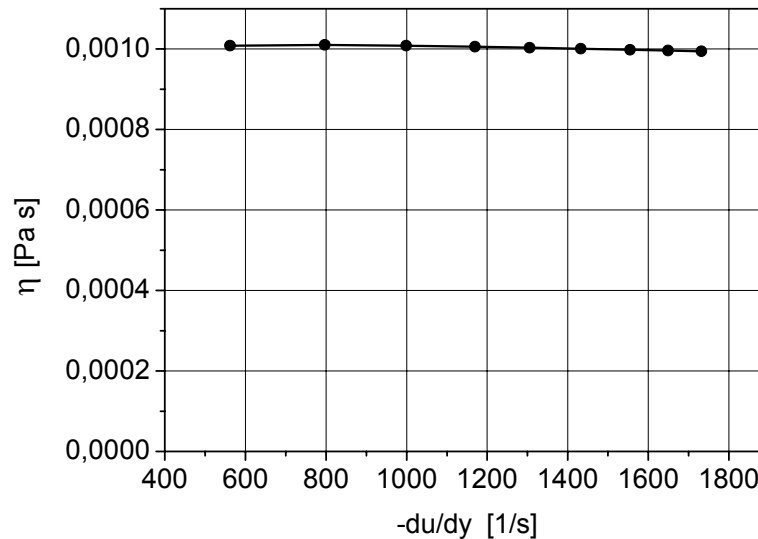


Abb. 11: Scherzähigkeit von Wasser in Abhängigkeit von der Scherrate

Literatur

Arola, D. F., Barrall, G. A., Powell, R. L., McCarthy, K. L., McCarthy, M. J., 1997: "Use of nuclear magnetic resonance imaging as a viscometer for process monitoring", Chemical Engineering Science, Vol. 52, No. 13, pp. 2049-2057.

Crowe, C., Sommerfeld, M. and Tsuji, Y., 1998: "Multiphase Flows with Droplets and Particles", CRC Press.

Durst, F., Ray, S., Ünsal, B., Bayoumi, O. A., 2005: "The Development Lengths of Laminar Pipe and Channel Flows", Journal of Fluids Engineering, Vol. 127, pp. 1154-1160.

Petrak, D., 2005: "Über die Untersuchung von Flüssigkeitsströmungen in Kapillaren und Mikrokanälen mit Hilfe der faseroptischen Ortsfiltertechnik", Proc. 13. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, veranst. von der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA e.V., Cottbus, 6.-8. September 2005, S. 39-1 – 39-8.

Saffmann, P.G., 1965: "The lift on a small sphere in a slow shear flow", J. Fluid Mech., Vol. 22, part 2, pp. 385-400.