



Praktikum "Experimentelle Strömungsmechanik"

Versuch S1: Bestimmung von Materialkennwerten

Teilversuch a: Rotationsviskosimeter vom Searle-Typ - Fließkurve eines Newtonschen Fluids

Inhalt

1. Aufgabenstellung	2
2. Theoretische Grundlagen	2
3. Versuchsaufbau	4
4. Versuchsdurchführung	6
5. Versuchsauswertung	6
6. Literatur.....	7

1. Aufgabenstellung

Nehmen Sie mit dem Rotationsviskosimeter „MC1“ die Fließkurve $\tau(\dot{\gamma})$ einer Newtonschen Flüssigkeit auf und berechnen Sie die Viskositätsfunktion $\eta(\dot{\gamma})$.

2. Theoretische Grundlagen

Die Viskosität als Materialeigenschaft ist ein Maß für die "innere" Reibung, die bei der relativen Verschiebung von Fluidteilchen in einer Strömung entsteht. Aufgrund dieser Eigenschaft sind Fluide im bewegten Zustand in der Lage, Tangentialkräfte zu übertragen, die zu Scherspannungen auf Flächen in der x,z -Ebene führen.

Das Geschwindigkeitsfeld lautet in einer ebenen, stationären Scherströmung (Abb. 1)

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u(y) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

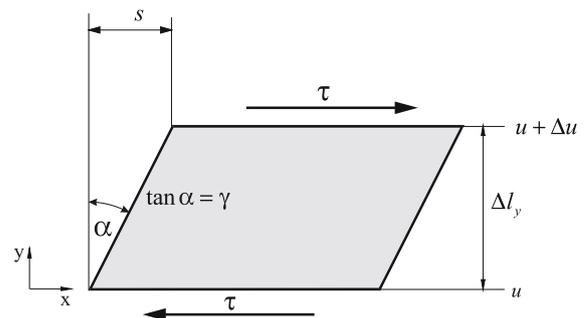


Abb. 1: einfache Scherdeformation an einem Flüssigkeitsteilchen

Der Zusammenhang zwischen der Scherspannung und der Schergeschwindigkeit¹ an einem Flüssigkeitsteilchen sei durch das Newtonsche Materialgesetz gegeben:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Es bedeuten:

τ	Scherspannung
$\gamma = \tan \alpha = \frac{s}{\Delta l_y}$	Scherdeformation (Scherwinkel)
$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{du}{dy}$	Schergeschwindigkeit bzw. Scherrate
$\eta(p, T)$	dynamische (Scher-)Viskosität

Der Proportionalitätsfaktor η ist die dynamische Viskosität (im Folgenden kurz als Viskosität bezeichnet) eines Materials mit der Dimension $[Pa \cdot s]$. Wird die Viskosität auf die Dichte ρ des Materials bezogen, erhält man die kinematische Viskosität $\nu = \eta/\rho$ mit der Dimension $[m^2/s]$.

Substanzen, bei denen die Viskosität nur von dem aktuellen thermodynamischen Zustand (z. B. Druck p , Temperatur T) und nicht von der Schergeschwindigkeit bzw. der Scherspannung abhängt, werden als "Newtonsche" Flüssigkeiten bezeichnet (z. B. Wasser, Mineralöl). Bei ihnen

¹ Die Scherspannung bzw. Schergeschwindigkeit werden in der Literatur oft auch als Schubspannung bzw. Deformationsgeschwindigkeit bezeichnet.

genügt es, zum Viskositätswert nur die zugehörige Temperatur (und ggf. den Druck) anzugeben. Bei "nicht-Newtonschen" Flüssigkeiten ist die Viskosität darüber hinaus noch von der Schergeschwindigkeit selbst abhängig ($\eta(\dot{\gamma}, \rho, T)$).

Der einfachste Fall für die Realisierung der einfachen Scherströmung ist das ebene Zwei-Platten-Modell (Abb. 2). Die obere Platte mit der Fläche A

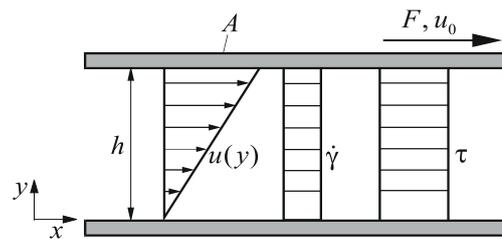


Abb. 2: Zwei-Platten-Modell

wird mit der konstanten Geschwindigkeit u_0 bewegt, wofür eine gewisse Kraft F notwendig ist; die untere Platte ruht. Aufgrund der Haftbedingung besitzt die Flüssigkeit an den Plattenrändern die entsprechende Plattengeschwindigkeit. Infolge des notwendigen Kräftegleichgewichtes bilden sich ein lineares Geschwindigkeitsprofil²

$$u(y) = u_0 \frac{y}{h} \quad (2)$$

und folglich eine konstante Schergeschwindigkeit

$$\dot{\gamma} = \frac{du(y)}{dy} = \frac{u_0}{h} = const. \quad (3)$$

aus. Die Scherspannung ist wegen des notwendigen Kräftegleichgewichtes im Spalt ebenfalls konstant mit

$$\tau = \frac{F}{A} = const. \quad (4)$$

Da ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Scherspannung und der Schergeschwindigkeit existiert, kann aus der Messung der oberen Plattengeschwindigkeit und der Abzugskraft sofort die Viskosität berechnet werden:

$$\eta = \frac{h F}{A u_0} \quad (5)$$

Ein wichtiger Viskosimetertyp zur experimentellen Ermittlung der Viskosität ist neben Kapillarviskosimetern (vgl. Versuch 1c) das Rotationsviskosimeter. In Rotationsviskosimetern wird das Zwei-Platten-Modell (Abb. 2) z. B. mit einem coaxialen Zylindersystem vom Searle-Typ³ (Abb. 3) realisiert. Die zu untersuchende Substanz befindet sich in dem Spalt zwischen dem feststehenden äußeren und dem mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi \cdot n$ (n ...Drehzahl in U/s) bewegten inneren Zylinder.

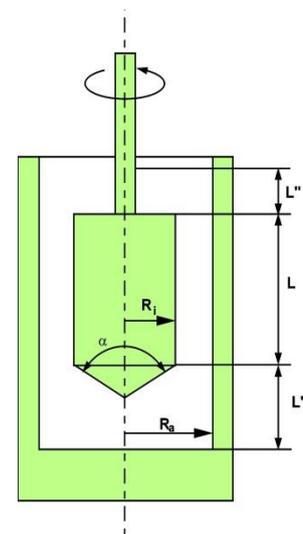


Abb. 3: Coaxiales Zylindersystem vom Searle-Typ nach DIN 53019/1

² An den Rändern setzen wir die Haftbedingung voraus: $u(y=0)=0$, $u(y=h)=u_0$.

³ Bei Rotationsviskosimetern vom Couette-Typ rotiert der Außenzylinder. Am feststehenden Innenzylinder wird das Torsionsmoment gemessen. Andere Testgeometrien sind konzentrische Kegel-Platte- und Platte-Platte-Geometrien.

Als erste Messgröße dient in Analogie zur Abzugskraft F im ebenen Platte-Platte-Modell das auf den Innenzylinder wirkende Torsionsmoment M , aus dem unter Berücksichtigung der geometrischen Abmessungen die Scherspannung am Innenzylinder mit

$$\tau_i = \frac{F_i}{A_i^*} = \frac{M_i / R_i}{2\pi R_i L \cdot c_L} = \frac{1}{2\pi \cdot R_i^2 \cdot L \cdot c_L} \cdot M_i = k_\tau \cdot M_i \quad (6)$$

berechnet werden kann. Der Faktor c_L dient der Korrektur des Stirnflächeneinflusses (vgl. DIN 53019/2). Für Newtonsche Flüssigkeiten (Index N) lässt sich die Schergeschwindigkeit am Innenzylinder aus der vorgegebenen Winkelgeschwindigkeit ω (In Analogie zur Abzugsgeschwindigkeit u_0 im ebenen Platte-Platte-Modell) und dem Radienverhältnis $\delta = R_o/R_i$ aus der Bewegungsgleichung leicht berechnen:

$$\dot{\gamma}_{i,N} = \frac{2}{1 - \left(\frac{1}{\delta}\right)^2} \cdot \omega = k_\dot{\gamma} \cdot \omega \quad (7)$$

Das Radienverhältnis sollte im Bereich von $1 < \delta \leq 1.08$ liegen.

Mit den Gln. (6) und (7) lässt sich somit (für Newtonsche Flüssigkeiten!) eine Beziehung zur Berechnung der Viskosität aus den Messgrößen "Drehzahl" und "Torsionsmoment" herleiten.

Bei Zylinderviskosimetern vom SEARLE-Typ treten aufgrund des Wirkens der Zentrifugalbeschleunigung Wirbel im Zylinderspalt auf, die die Viskositätsmessung merklich beeinflussen und zu falschen Messergebnissen führen können. Von G. I. TAYLOR (1923) wurde als Kriterium für das Auftreten dieser Wirbel die folgende Beziehung gefunden:

$$Ta = \frac{\omega R_i^2 (\delta - 1)^{3/2} \rho}{\eta} > 41.3 \quad (8)$$

Mit ihrer Hilfe ist das Abschätzen des Auftretens von TAYLOR-Wirbeln bei bekannter Geometrie, Winkelgeschwindigkeit, Viskosität und Dichte möglich.

3. Versuchsaufbau

Als Rotationsviskosimeter wird ein Gerät vom Searle-Typ (Innenzylinder rotiert) verwendet. Das Gerät besteht aus dem Messantrieb, der Rheometerelektronik, einer Eingabetastatur sowie einem vierzeiligen alphanumerischen Display und wird an einem Stativ befestigt (Abb. 4).

Der Innenzylinder, der mit einer Messkörperkupplung an der Antriebswelle befestigt ist, wird mit einem Gleichstrommotor angetrieben. Die Messgröße "Torsionsmoment M " zur Ermittlung der Scherspannung am Innenzylinder nach Gl. (6) wird aus der Kennlinie des Motors $M = f(I)$ auf der Grundlage der Messung des Motorstroms I intern berechnet. Die Drehzahl zur Ermittlung der Schergeschwindigkeit am Innenzylinder nach Gl. (7) wird über einen optischen Encoder bestimmt. Voraussetzung für die Berechnung der Scherspannung und Schergeschwindigkeit ist die Kenntnis der Geometrie des verwendeten Messsystems, die dem Gerät aufgrund der Anga-

be der Messsystemkennung bekannt ist. Als Messsystem wird das Zylindersystem Z3 nach DIN 53019/1 mit folgenden Daten benutzt:

- Radius des Innenzylinders R_i : 12.50 mm
- Radius des Außenzylinders R_o : 13.56 mm
- Messlänge L : 37.50 mm
- Korrekturfaktor Stirnflächeneinfluss c_L : 1.1
- Füllmenge: 18.0 ml

Da die Viskosität von Flüssigkeiten sehr stark von der Temperatur abhängt, muss eine genaue Temperierung des Messsystems erfolgen. Der Außenzylinder taucht in ein Temperierbad ein, die Durchtemperierung der Probe und des Innenzylinders erfolgt ausschließlich durch Wärmeleitung. Aus diesem Grunde muss nach Einfüllen der Probe und Positionierung des Messsystems eine gewisse Zeit gewartet werden, bevor mit der Messung begonnen wird.

Am Messkopf des Viskosimeters befindet sich ein vierzeiliges Display, auf dem Eingaben und Messergebnisse angezeigt werden. Mit Hilfe der Tasten

-  in Eingabefeldern: Erhöhen des Zahlenwertes um eins; sonst: Übergang zum nächst höheren Menü
-  in Eingabefeldern: nächste Stelle, sonst: nächster Menüpunkt
-  Enter-Taste zum Bestätigen der Auswahl
-  Start/Stop-Taste bei Messprogrammen

ist die Eingabe des Messprogramms möglich. Darüber hinaus können die Messwerte im Viskosimeter gespeichert und später abgerufen werden.

Zur Untersuchung der Substanzen stehen verschiedene Messprogramme wie Einzelpunktmessung oder Rampen auf- und abwärts mit und ohne Haltezeit zur Verfügung. Es können die Scherspannung oder die Schergeschwindigkeit als rheologische Größen bzw. das Torsionsmoment oder die Drehzahl als primäre Größen vorgegeben werden. Die Parameter für die Messprogramme werden menügesteuert mit der Tastatur eingegeben. Für den vorliegenden Versuch wird das Messprogramm "Fließkurve" ver-

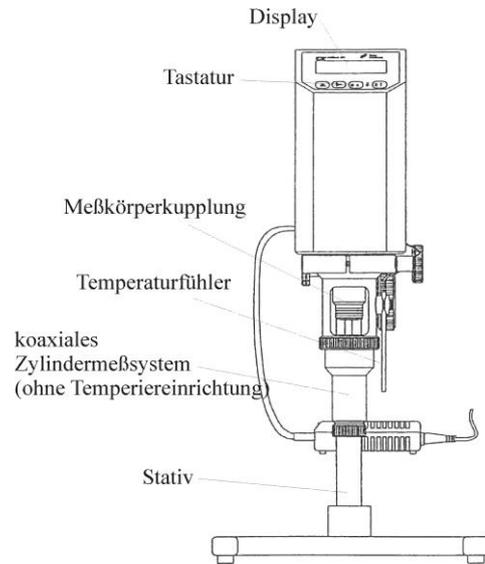


Abb. 4: schematischer Aufbau des Viskosimeters

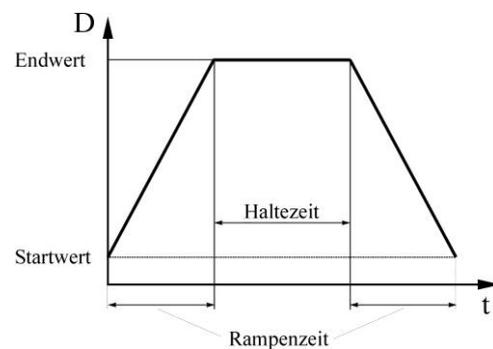


Abb. 5: Messprogramm "Fließkurve"

wendet (Abb. 5): es werden aufeinanderfolgend eine ansteigende lineare Rampe, ein konstanter Abschnitt sowie eine abfallende lineare Rampe realisiert. Als Vorgabegröße wird die Schergeschwindigkeit (hier mit D gekennzeichnet) verwendet.

Während der Messung werden die aktuelle Schergeschwindigkeit, die aktuelle Scherspannung sowie die aktuelle Temperatur angezeigt und etwa jeder vierte Messwert im Speicher des Gerätes abgelegt.

4. Versuchsdurchführung

1. Befestigen Sie den Zylinder mit Hilfe der Messkörperkupplung an der Messwelle. Füllen Sie die entsprechende Menge der zu untersuchenden Substanz in den Messbecher und befestigen Sie den Messbecher am Messkopf des Viskosimeters. Montieren Sie den Temperiermantel.
2. Schalten Sie das Viskosimeter ein.
3. Das Gerät zeigt einige Statusinformationen an und wechselt dann in das Hauptmenü. Hier wählen Sie mit den Pfeiltasten  und  den Menüpunkt PROGRAMM und bestätigen Sie mit .
4. Im folgenden Menü PROGRAMM (1) wählen Sie im ersten Versuchsteil das Programm OEL10000 (Schergeschwindigkeitsrampe aufwärts von 5 s^{-1} bis 500 s^{-1} in 60 s, halten bei 500 s^{-1} für 60 s und abwärts von 500 s^{-1} bis 5 s^{-1} in 60 s) bzw. im zweiten Versuchsteil das Programm OEL20000 (Schergeschwindigkeitsrampe aufwärts von 5 s^{-1} bis 500 s^{-1} in 180 s, halten bei 500 s^{-1} für 60 s und abwärts von 500 s^{-1} bis 5 s^{-1} in 180 s) und bestätigen Sie mit .
5. Nun wird der freie Speicher angezeigt. Durch Bestätigung mit  werden im nächsten Punkt die Einstellungen zur Kontrolle nochmals angezeigt. Nun kann das entsprechende Messprogramm mit  endlich gestartet werden. Sie haben nun eine kurze Pause, während der Sie die Anzeige des Gerätes beobachten können.
6. Nach beendeter Messung meldet sich das Gerät akustisch mit einem Ton und visuell mit der Anzeige STOP im Display.  drücken, im Hauptmenü MANUELL > SPEICHERN drücken.
7. Das Ausdrucken der gespeicherten Messwerte erfolgt über HAUPTMENÜ > SPEICHERN > ALLE DRUCKEN. Es wird die Probenanzahl angezeigt (es sollten zwei Messungen gespeichert sein). Nach Drücken von  erfolgt der Ausdruck der Messwerte beider Messungen⁴.

5. Versuchsauswertung

1. Stellen Sie die Fließkurve $\tau = f(\dot{\gamma})$ und die Viskositätsfunktion $\eta = f(\dot{\gamma})$ grafisch dar. Bestimmen Sie in der Fließkurve den Anstieg der Funktion.
2. Vergleichen Sie die erhaltenen Viskositätswerte mit den aus den Teilversuchen 1b und 1c ermittelten Werten.

⁴ Technisch bedingt ist die Bereitstellung der Messwerte in digitaler Form nicht möglich.

3. Vergleichen Sie die mit den Programmen OEL1 und OEL2 erhaltenen Ergebnisse miteinander und geben Sie Ursachen für mögliche Abweichungen an.
4. Schätzen Sie mit Gl. (8) ab, ob mit dem Auftreten von TAYLOR-Wirbeln im Zylinderspalt zu rechnen ist.

6. Literatur

- DIN 53019 / Teil1 und Teil 2
- Becker, E.: Technische Strömungslehre, Teubner Studienbücher Mechanik, Stuttgart 1993
- Macosko, C. W.: Rheology - Principles, Measurements and Applications, VCH Publishers, Inc. New York 1994
- Pahl, M.; Gleißle, W.; Laun, H.-M.: Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere, VDI-Verlag Düsseldorf 1991