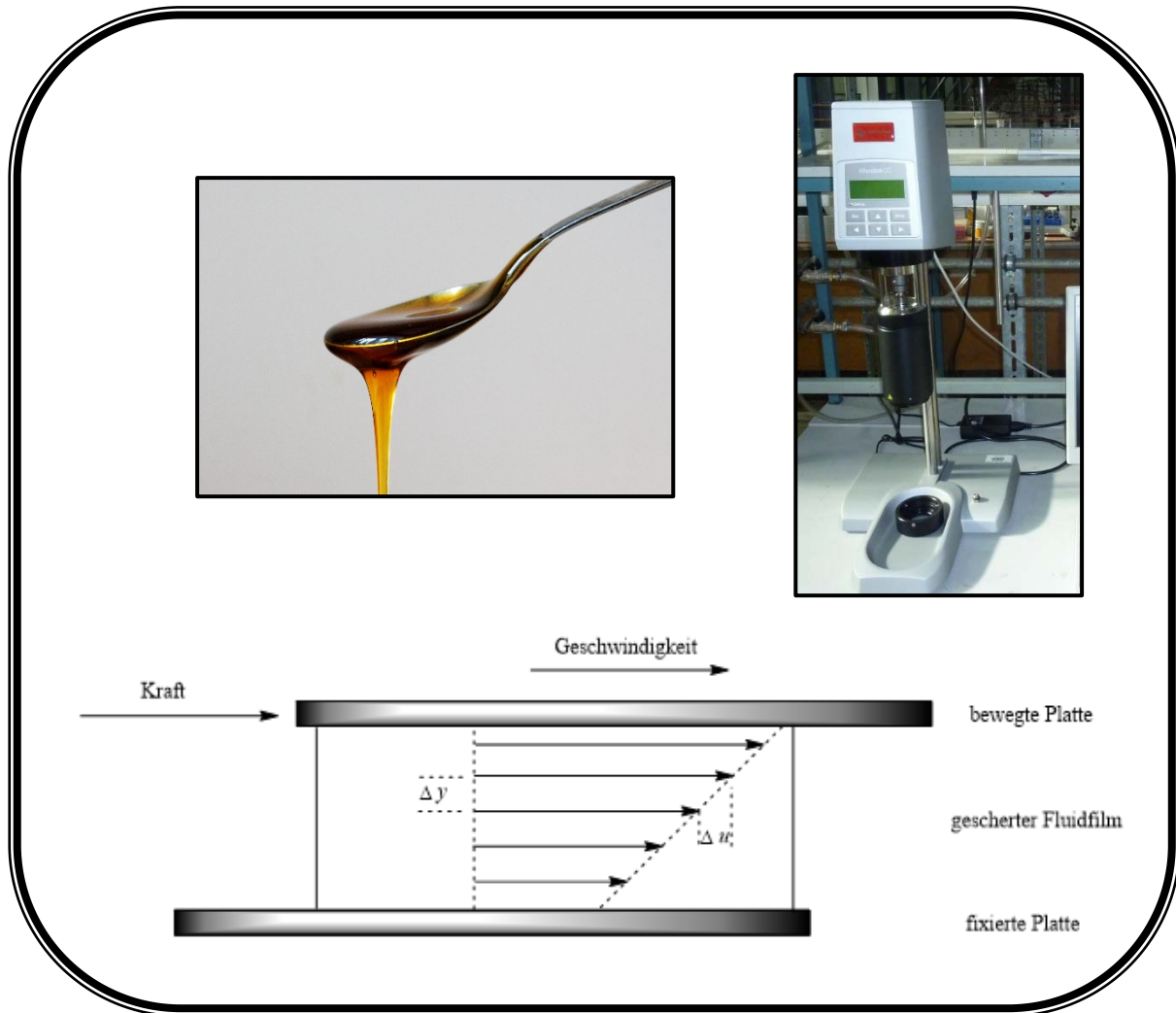


Themengebiet: Strömungslehre

Viskosimetrie



Lernziele:

- Einarbeitung in das Prinzip der Rotationsviskosimetrie
- Klassifizierung von Fluiden in newtonsche und nicht-newtonsche
- Abhängigkeiten der Viskosität von Temperatur und Schergeschwindigkeit
- Herausstellen der Unterschiede zwischen dilatanten und strukturviskosen Fluiden
- Bestimmung der Parameter der Ostwald und Steiger-Ory-Gleichung
- Anwendungsbezug durch Berechnung des Druckverlustes in einer hypothetischen Anlage

Verzeichnis der verwendeten Symbole

D	Geschwindigkeitsgefälle (Schergeschwindigkeit)
h_m	Mittlere hydrostatische Druckhöhe
J_g	Staudinger-Index (Grenzviskosität)
l	Länge der Kapillare
M	Drehmoment
n	Drehzahl
p	Wirkdruck
r	Radius der Kapillare, des Messzylinders, des Strömungsrohres
t	Zeit
u	Fließgeschwindigkeit in Strömungsrichtung x
V	Durchflussvolumen (Kapillare)
\dot{V}	Volumenstrom
w	Strömungsgeschwindigkeit
δ	Radienverhältnis
ζ	Rohrreibungsbeiwert
η	Dynamische Viskosität
θ	Temperatur
λ	Widerstandsbeiwert
ν	Kinematische Viskosität
ρ	Dichte
τ	Schubspannung
φ	Fluidität
ω	Winkelgeschwindigkeit

1. Einleitung

Der Begriff der Viskosität ist untrennbar mit allen Strömungsvorgängen von Fluiden verbunden. Ohne ihre Kenntnis ist es nicht möglich, Apparate und Aggregate in Produktions- und Verarbeitungsverfahren, in denen Wärme- und hydrodynamische Transportprozesse ablaufen, zu dimensionieren. Ganz besonders wird das deutlich bei der Maßstabsvergrößerung. So enthalten die charakteristischen Kenngrößen für die Strömungsvorgänge und den Wärmetransport direkt die Viskosität

- Reynolds-Zahl, Re
- Prandtl-Zahl, Pr
- Archimedes-Zahl, Ar
- Nusselt-Zahl, Nu

bzw. hängen funktionell mit ihr zusammen: $Nu = f(Re, Pr)$.

Transportvorgänge in Pumpen und Rohrleitungen, Mischvorgänge in Rührwerken und Reaktoren, Wärmeaustauschvorgänge sind ohne Kenntnis der Viskosität nicht berechenbar. Eine große Rolle spielt die Viskosität auch bei Polymerisationsprozessen durch den funktionellen Zusammenhang von Viskosität des Polymers und der Molmasse.

Mit ihrer experimentellen Ermittlung befasst sich die Viskosimetrie. Sie hat die Aufgabe, das Fließverhalten von fluiden Medien, vorrangig von vorwiegend flüssigen oder gasförmigen Stoffsystemen zu messen. Die Ergebnisse sind Fließ- bzw. Viskositätskurven sowie Viskositäts-Temperatur-Kurven.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Viskosität

Viskosität ist definiert nach DIN 1342, Teil 2^[1] als die Eigenschaft eines fließfähigen (vorwiegend flüssigen oder gasförmigen) Stoffsystems, bei einer Verformung eine Spannung aufzunehmen, die nur von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt. Ebenso kann die Spannung als Ursache der Verformungsgeschwindigkeit angesehen werden.

Damit ist die Viskosität ein Maß für die innere Reibung eines Fluids. Vereinfacht ist die viskose Strömung (stationäre, ebene Parallelströmung) in Abbildung 1 zweidimensional dargestellt.

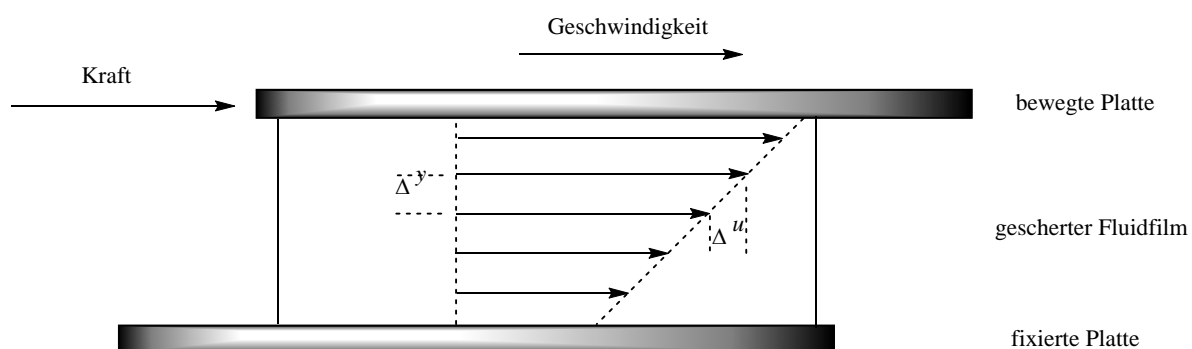


Abbildung 1: Parallelplattenversuch – Grundversuch der Viskosimetrie.

Zwischen zwei parallel angeordneten Platten befindet sich ein Fluidfilm, welcher aus unendlich vielen, unendlich dünnen laminaren Schichten besteht. Wird nun eine der Platten bewegt, so gibt diese mittels Adhäsion den entsprechenden Impuls auf die angrenzende laminare Schicht weiter. Diese gibt über Kohäsionskräfte einen schwächeren Impuls an die darauf folgende laminare Schicht weiter (usw.). Daraus resultiert ein Schergefälle im Fluidfilm, auch Geschwindigkeitsgefälle oder Scherrate genannt.

Das Geschwindigkeitsgefälle D , die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit senkrecht zur Strömungsrichtung x , ist definiert als der Grenzwert des Quotienten aus dem Geschwindigkeitsunterschied Δu zwischen zwei benachbarten Ebenen (Schichten) und ihrem Abstand Δy .

$$D = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta y} = \frac{du}{dy} \quad (1)$$

Die Schubspannung τ ist definiert als der Quotient aus der in Strömungsrichtung x wirkenden Kraft F und der Fläche $\Delta z \cdot \Delta x$, an der diese Kraft angreift.

$$\tau = \frac{F}{\Delta z \cdot \Delta x} \quad (2)$$

Zwischen dem Geschwindigkeitsgefälle D und der Schubspannung τ besteht nach dem newtonschen Gesetz der inneren Reibung eines fließfähigen Stoffsystems folgender mathematischer Zusammenhang

$$\tau = \eta \cdot D \quad (3)$$

Der Proportionalitätsfaktor dieser Gleichung wird als dynamische Viskosität η bezeichnet. Für newtonsche Flüssigkeiten ist er eine stoffspezifische, aber temperaturabhängige Konstante. Gebräuchlich ist auch der Kehrwert η^{-1} . Man bezeichnet ihn als Fluidität φ .

Die kinematische Viskosität ν ist der Quotient aus dynamische Viskosität η und Dichte ρ .

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4)$$

Bei Lösungen unterscheidet man die Viskosität der Lösung η und die Viskosität des Lösungsmittels η_s . Der Quotient beider Größen wird als relative Viskosität (Viskositätsverhältnis) η_r bezeichnet

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_s} \quad (5)$$

$$\frac{\eta - \eta_s}{\eta_s} = \eta_r - 1 \quad (6)$$

Der Quotient aus Gleichung (6) heißt relative Viskositätsänderung und dient zur Berechnung des Staudinger Indexes J_g , welcher früher mit $[\eta]$ bezeichnet wurde.

$$J_g = \lim_{\substack{\beta_i \rightarrow 0 \\ \tau \rightarrow 0}} \left(\frac{1}{\beta_i} \cdot \frac{\eta - \eta_s}{\eta_s} \right) \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7)$$

mit β_i als Massenkonzentration des gelösten Stoffes $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$.

Der Staudinger Index spielt für die Berechnung der Molmasse für Polymere eine große Rolle. Die Viskositäts-Temperatur-Abhängigkeit kann nicht durch allgemeine Gleichungen beschrieben werden. Für bestimmte Stoffe bzw. Stoffklassen, z.B. Mineralöle, existieren empirische Beziehungen.

2.2. Ursachen und Einflussparameter der Viskosität

Die Viskosität aller fluiden Systeme hat ihre Ursache in Wechselwirkungen auf molekularer Ebene. Welche Wechselwirkungen in der entsprechenden Substanz vorherrschen, ist von deren chemischer Struktur abhängig. In Alkanen, beispielsweise *n*-Hexan, sind die Van-der-Waals-Kräfte maßgeblich für das Viskositätsverhalten, während in Wasser vor allem Wasserstoffbrückenbindungen zur Viskosität beitragen. In makromolekularen Substanzen wirken zusätzliche Kohäsionskräfte, welche durch Verschlaufungen, Verfilzungen u. ä. entstehen.

In gasförmigen Fluiden treten diese Wechselwirkungen nicht auf, da in der Theorie die entsprechenden Teilchen zu weit voneinander entfernt sind, als dass die oben genannten Formen der intermolekularen Wechselwirkungen auftreten. Daher beruht das viskose Verhalten von Gasen maßgeblich auf der Wechselwirkung der Gasteilchen durch Stöße.

Aus den Ursachen für die Viskosität lassen sich die möglichen Einflussparameter für die Viskosität direkt ableiten. Dabei sind die wichtigsten Druck, Temperatur, die Substanz selbst sowie die Konzentration, in welcher die Substanz vorliegt.

Für Flüssigkeiten gilt dabei bezüglich der Temperatur, dass die Viskosität mit steigender Temperatur abfällt. Dies liegt an der steigenden kinetischen Energie der Teilchen, die den Einfluss der besprochenen intermolekularen Wechselwirkungen auf die Viskosität abmildert. Es wird also eine Art Aktivierungsenergie bereitgestellt, die für das Überwinden der intermolekularen Wechselwirkungen notwendig ist. Daher besitzen entsprechende mathematische Beschreibungen dieses Verhaltens auch die Form der Arrhenius-Gleichung (vgl. mit Andrade-Gleichung, Abschnitt 4.2). Für Gase steigt die Viskosität mit einer entsprechenden Temperaturerhöhung, da durch eine Erhöhung der kinetischen Energie der Teilchen auch die Anzahl der Stöße zunimmt. Da diese Stöße die Ursache für das viskose Verhalten von Gasen sind, resultiert aus einer erhöhten Stoßanzahl eine erhöhte Viskosität. Der Einfluss des Drucks auf Flüssigkeiten kann meist vernachlässigt werden, da Flüssigkeiten nahezu inkompressibel sind. Für Gase gilt diese Einschränkung selbstverständlich nicht. Die Viskosität gasförmiger Fluide steigt im Allgemeinen mit zunehmendem Druck und ist nur dann unabhängig von diesem, wenn die mittlere freie Weglänge der Teilchen klein im

Verhältnis zu den Gefäßabmessungen und groß im Verhältnis zu der entsprechenden Molekülgröße ist.

2.3. Thixotropes und rheopexes Verhalten

Neben den oben genannten Einflüssen kann sich die Viskosität auch über die Zeit (einer Messung) ändern, ohne dass die vorgegebene Scherrate geändert wird. Wird die Viskosität dabei geringer, spricht man von einem thixotropen Verhalten, wird sie höher, so wird dies als rheopexes Verhalten bezeichnet (siehe Abbildung 2). Beide Vorgänge haben ihre Ursache in der Zerstörung von Überstrukturen der untersuchten Substanz, welche durch die länger andauernde Beanspruchung verursacht wird, wobei sich die Überstrukturen nach Ende der Beanspruchungsphase wieder ausbilden (können). Dieses Verhalten ist nicht mit dilatantem oder strukturviskosem Verhalten zu verwechseln (siehe Kapitel 2.5). Bei diesen Änderungen ist die Höhe der entsprechenden Scherrate für das Verändern der Viskosität maßgeblich, bei thixotropem bzw. rheopexem Verhalten ist die Zeit maßgebend, über die eine konstante Scherrate angelegt wird. Ist eine solche zeitlich herbeigeführte Änderung der Viskosität irreversibel, so spricht man von Rheodestruktion.

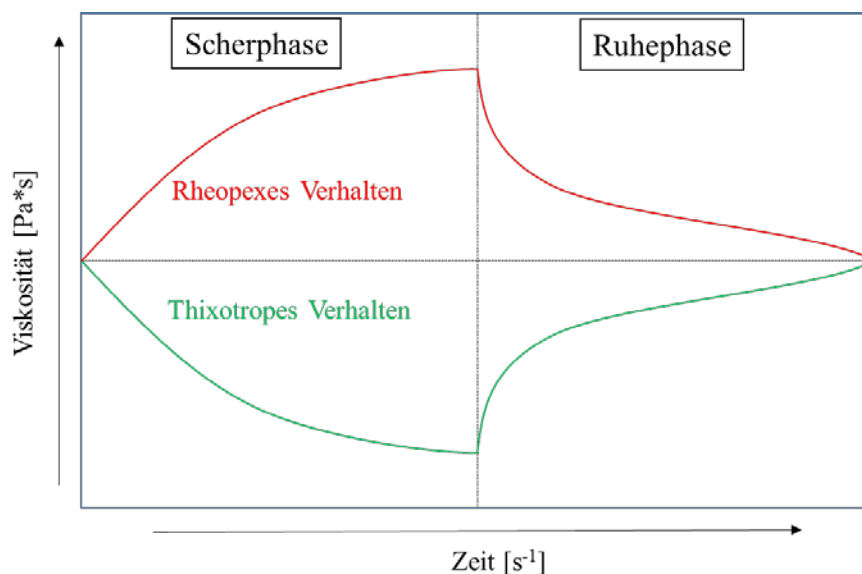


Abbildung 2: Zeitliche Abhängigkeit der Viskosität bei einer konstanten Scherrate.

2.4. Newtonsche Flüssigkeiten

Eine newtonsche Flüssigkeit ist ein isotropes reinviskoses Fluid, für das die Gleichung (3) in allen drei Koordinatenrichtungen gilt und die Schubspannung τ und das Geschwindigkeitsgefälle D direkt proportional sind. Der Bereich, für den diese Bezeichnung gilt, heißt newtonscher Bereich.

Damit ist die Viskosität eine stoffspezifische Größe, die allerdings temperaturabhängig ist (Viskositäts-Temperaturverhalten).

2.5. Nicht-newtonsche Flüssigkeiten

Die nicht-newtonschen Flüssigkeiten sind Flüssigkeiten, für die die Proportionalität zwischen Schubspannung τ und Geschwindigkeitsgefälle D nicht linear ist. Für sie ist die Viskosität keine einheitliche stoffspezifische Größe mehr, sondern bedarf darüber hinaus auch der Angabe des entsprechenden Geschwindigkeitsgefälles.

Unter dem Oberbegriff der nicht-newtonsche Flüssigkeiten werden drei Klassen von Flüssigkeiten zusammengefasst:

- nichtlinear-reinviskose (z. B. Polymerlösungen),
- linear-viskoelastische (z. B. Polymerschmelzen) und
- nichtlinear-viskoelastische Flüssigkeiten.

Strukturviskose und **dilatante** Flüssigkeiten gehören zu den nichtlinear-reinviskosen Flüssigkeiten und wurden historisch zuerst als nicht-newtonsche Flüssigkeiten erkannt.

Bei strukturviskosen Flüssigkeiten (z.B. hochmolekulare Substanzen und ihre Lösungen) ist deren Viskosität bei höheren Werten der Schubspannung oder des Geschwindigkeitsgefälles kleiner als bei niedrigen Werten. Dilatante Flüssigkeiten weisen dagegen bei höheren Werten der Schubspannung oder des Geschwindigkeitsgefälles höhere Viskositätswerte auf. Für beide letztgenannten Flüssigkeiten lässt sich eine scheinbare Viskosität η_a angeben, die angibt, welche Viskosität eine newtonsche Flüssigkeit gleichen Fließverhaltens aufweist.

Tritt bei einem Feststoff (z.B. Pigmentfarbstoff) oberhalb einer Fließgrenze nach Überschreiten der kritischen Schubspannung τ_0 wieder Proportionalität zwischen Geschwindigkeitsgefälle und Schubspannung auf, spricht man von einem **Bingham-Körper**.

Für strukturviskose Flüssigkeiten wurde eine Reihe empirischer Ansätze entwickelt, z.B.

$$\tau = a \cdot D^b \quad D = \frac{k}{\tau^{n-2}} \quad (n > 1) \quad (\text{Ostwald-Gleichung}) \quad (8)$$

$$D = a \cdot \tau + b \cdot \tau^3 \quad (\text{Steiger-Ory-Gleichung}) \quad (9)$$

$$\tau = a + b \cdot \frac{1}{D} \quad D = \frac{a \cdot \sin(h \cdot \tau)}{b} \quad (\text{Hyperbolische Gleichung}) \quad (10)$$

Die Stoffkonstanten a , b , k und n sind anhand der Messwerte (Rotationsviskosimeter) zu bestimmen.

Für die Berechnung von Re-Zahlen für Förder-, Rühr- und Mischprozesse werden die scheinbaren Viskositäten η_a verwendet, die den tatsächlichen oder zu wählenden technologischen Bedingungen entsprechen, d.h. t und D müssen bekannt sein.

Die prinzipiellen Fließkurven und Viskositätskurven für diese Flüssigkeiten zeigen Abbildung 3 und Abbildung 4.

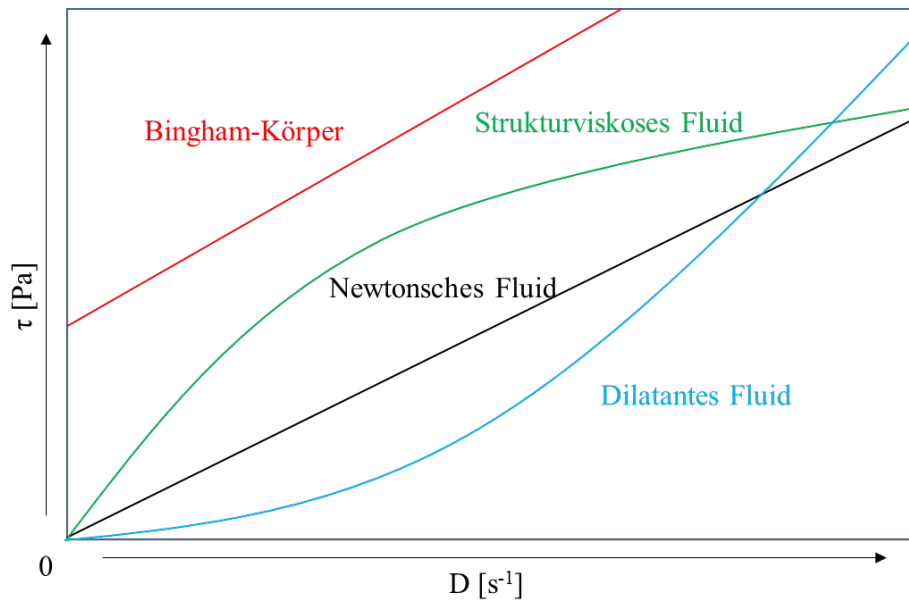


Abbildung 3: Fließkurven von newtonschen, dilatanten und strukturviskosen Fluiden sowie eines Bingham-Körpers.

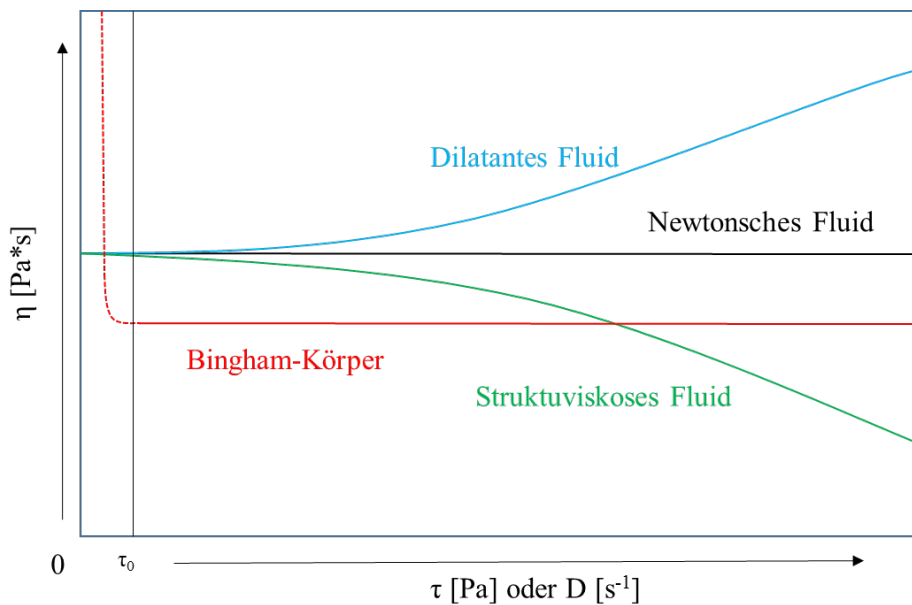


Abbildung 4: Viskositätskurven von newtonschen, dilatanten und strukturviskosen Fluiden sowie eines Bingham-Körpers.

Die Fließkurve ist die graphische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Schubspannung τ und dem Geschwindigkeitsgefälle (früher auch Schergefälle genannt) D in einer Schichtenströmung bzw. eines plastischen Stoffes oberhalb der Fließgrenze.

Die Viskositätskurve ist die graphische Darstellung der Scherviskositätsfunktion $\eta = f(D)$ oder $\eta = f(\tau)$. Als Fließkurve wird die Darstellung $\tau = f(D)$ bezeichnet.

2.6. Methoden zur Bestimmung der Viskosität

Zur Viskositätsmessung stehen drei prinzipielle Messmethoden zur Verfügung:

- Kapillarviskosimetrie
- Kugelfallviskosimetrie
- Rotationsviskosimetrie

Die Auswahl richtet sich nach folgenden Kriterien:

- Prüfung der Substanz nach der Art des Fluids (newtonsches oder nicht-newtonsches Fluid).
- Newtonsche Flüssigkeiten können mit technisch wenig aufwendigen Geräten wie Schwerkraft-Kapillarviskosimeter (Ubbelohde, Vogel-Ossag, Cannon-Fenske), Kugelfallviskosimeter (Höppler) oder einfachen Rotationsviskosimetern (ein oder zwei Drehzahlen, einfache Meßsysteme) vermessen werden, wobei alle Geräte die Absolutwerte der Viskosität messen.
- Nicht-newtonsche Flüssigkeiten können nur mit Rotationsviskosimetern vom Typ Searle bzw. Couette mit definiertem Ringspalt oder aber Kapillarviskosimetern mit großem Länge/Durchmesser-Verhältnis und variabel einstellbarem Druck vermessen werden.

Am günstigsten, aber auch in der Erstbeschaffung am teuersten, ist der Einsatz eines Rotationsviskosimeters mit definiertem Ringspalt.

Bestimmung der Viskosität durch Schwerkraft-Kapillarviskosimetrie

Das Messprinzip der kinematischen Viskosität mit Kapillarviskosimetern beruht auf der Anwendung des Hagen-Poiseuillischen Gesetzes für eine laminare Strömung

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot V \cdot l} \cdot t = C^x \cdot t \quad (11)$$

Erzeugt man den Wirkdruck p durch einen definierten Höhenunterschied h_m vor und hinter der Kapillare und führt die kinematische Viskosität ν ein, so erhält man

$$\nu = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot g \cdot h_m}{8 \cdot V \cdot l} \cdot t = K^* \cdot t \quad (12)$$

Der Koeffizient K^* ist für ein gegebenes Viskosimeter eine Konstante und wird in der Gleichung (12) durch eine vom Viskosimeterhersteller ermittelte Konstante K ersetzt. Damit ergibt sich für die Auswertung der Messung der kinematischen Viskosität

$$v = K \cdot t \quad [\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (13)$$

mit $K (K^*) \quad [\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-2}]$
 $t \quad [\text{s}]$

Kapillarviskosimeter erlauben prinzipiell das Vermessen sowohl newtonscher als auch nicht-newtonscher Flüssigkeiten, vorzugsweise nichtlinear-reinviskoser Stoffe. Dazu muss die Druckdifferenz Δp durch das Anlegen von Fremddruck variiert werden. Für die Berechnung der Schubspannung τ und des Geschwindigkeitsgefälles D gelten folgende Beziehungen:

$$\tau_R = \frac{r}{2 \Delta l} \cdot \Delta p = c_1 \cdot \Delta p \quad [\text{Pa}] \quad (14)$$

$$\tau_R = \frac{r}{2 l} \cdot \Delta p \quad (15)$$

$$D_R = \frac{4}{\pi r^3} \cdot \dot{V} = c_2 \cdot \dot{V} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (16)$$

r	Radius der Kapillare	[cm]
l	Kapillarlänge	[cm]
Δp	Druckdifferenz über die Kapillarlänge (zwischen den definierten Punkten)	[Pa]
\dot{V}	Volumenstrom	$[\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
$c_{1,2}$	Instrumentenkonstanten	

Bestimmung der Viskosität nach der Kugelfallmethode

Das Messprinzip zur Messung der dynamischen Viskosität beruht auf der Anwendung des Gesetzes von Stokes und des Auftriebsprinzips von Archimedes für eine rollende und gleitende Bewegung einer Kugel mit der Dichte ρ_1 in einem geneigten zylindrischen Rohr, das mit der zu prüfenden Flüssigkeit mit der Dichte ρ_2 gefüllt ist. Dabei stellt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen der Reibungskraft nach Stokes, der Auftriebskraft nach Archimedes sowie der Gewichtskraft der Kugel ein, aus welchem die Viskosität berechnet werden kann.

Zur Auswertung der Messergebnisse gilt die Gleichung

$$\eta = K \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot t \quad [\text{mPa} \cdot \text{s}] \quad (17)$$

$$K \quad [\text{mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^3 / \text{g} \cdot \text{s}]$$

$$t \quad [\text{s}]$$

$$\rho_i \quad [\text{g}/\text{cm}^3]$$

Bestimmung der Viskosität durch Rotationsviskosimetrie

Rotationsviskosimeter werden verwendet, um die dynamische Viskosität unter definierten, nach Betrag und Einwirkungsdauer aber variablem Geschwindigkeitsgefälle zu messen, das heißt, Fließkurven aufnehmen. Sie sind sowohl für newtonsche als auch für nicht-newtonsche Flüssigkeiten geeignet. Das Messprinzip beruht auf der Scherung der Flüssigkeit in einem coaxialen Ringspalt, der von einem Innen- und Außenzylinder gebildet wird. Dabei kann entweder der Innenzylinder, auch Rotor oder Drehkörper genannt (Searle-System), oder aber der Außenzylinder (Couette-System) rotieren. Das System eines sich bewegenden Zylinders ist analog zum bereits erläuterten Grundversuch der Viskosimetrie, wenn man sich die parallelen Platten als zu zwei Zylindern gebogenes System vorstellt (vgl. Kapitel 2.1).

Der viskositätsbedingte Widerstand der gescherten Flüssigkeit führt bei vorgegebener Winkelgeschwindigkeit ω zur Einstellung eines zugehörigen Drehmomentes, das direkt proportional zur Viskosität ist. Wird umgekehrt das Drehmoment vorgegeben, so stellt sich eine zugehörige Winkelgeschwindigkeit ein, die umgekehrt proportional zur Viskosität ist. Für hochviskose Stoffsysteme tritt an die Stelle des coaxialen Zylindersystems das Kegel/Platte-Messsystem.

Das Geschwindigkeitsgefälle berechnet sich bei vorgegebener Winkelgeschwindigkeit ω (Drehzahl n) zu

$$D = \omega \cdot \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (18)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad [\text{s}^{-1}]$$

$$\delta = \frac{r_A}{r_I} \quad (\text{Verhältnis der Radien des Außen- und Innenzylinders})$$

Die Schubspannung berechnet sich zu:

$$\tau = \frac{M}{2\pi \cdot r_I^2 \cdot l} \quad [\text{Pa}] \quad (19)$$

$$l \quad \text{Länge des Zylinders} \quad [\text{cm}]$$

$$M \quad \text{Drehmoment} \quad [\text{Ncm}]$$

$$r_I \quad \text{Radius des Innenzylinders} \quad [\text{cm}]$$

3. Versuchsdurchführung

Der Versuch wird mittels eines Rotationsviskosimeters durchgeführt. Der grundlegende Aufbau ist in Abbildung 5 dargestellt. Es ist das Fließverhalten je einer newtonschen und zweier nicht-newtonschen Flüssigkeiten durch die experimentelle Aufnahme der Fließ- und Viskositätskurve mit Hilfe der Rotationsviskosimetrie zu untersuchen. Es wird eine Stärke-Lösung, Hydroxyethylcellulose sowie Glycerin untersucht. Ebenfalls soll das Viskositäts-Temperaturverhältnis einer newtonschen Flüssigkeit untersucht werden und der Druckverlust in einer hypothetischen Anlage berechnet werden. Eine genauere Beschreibung der durchzuführenden Aufgaben ist in Abschnitt 4 zu finden.

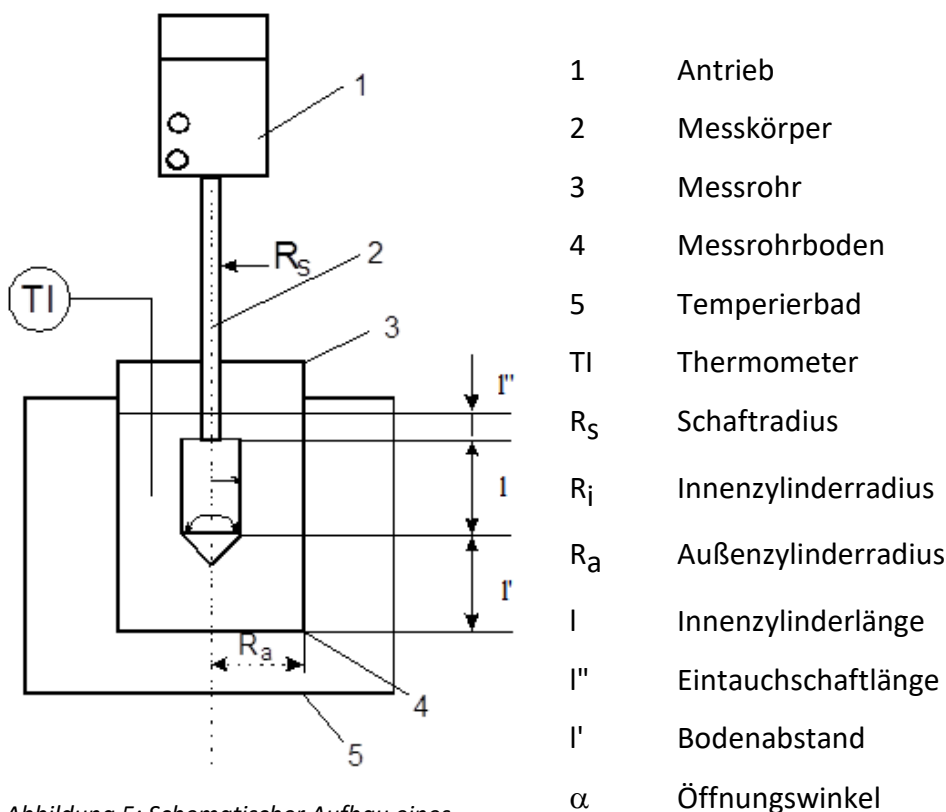


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines Rotationsviskosimeters.

4. Aufgabenstellung

4.1. Viskositätsverhalten von newtonschen und nicht-newtonschen Fluiden

Nehmen sie die Viskosität der drei Fluide bei den Scherraten 50 s^{-1} , 100 s^{-1} , 300 s^{-1} , 500 s^{-1} , 1000 s^{-1} , 1500 s^{-1} auf. Pro Scherrate werden 30 Messpunkte aufgenommen. Zeichnen sie für alle Proben die Fließ- und Viskositätskurven als $\tau = f(D)$ und $\tau/D = f(D)$. Identifizieren sie mittels der erhaltenen Kurven die newtonsche und die nicht-newtonschen Flüssigkeiten. Begründen sie ihre Zuordnung.

Klassifizieren sie die nicht-newtonschen Fluide und begründen sie ihre Einteilung mittels der Auftragung von $\lg(\tau)$ gegen $\lg(D)$ und ermitteln sie die Parameter der Steiger-Ory-Gleichung (a, b) sowie die Parameter der Ostwald-Gleichung (a, b, k, n) für die strukturviskose Substanz. Fitten sie hierfür die, aus ihren Messergebnissen erhaltenen Graphen, mit einer passenden Funktion.

Ermitteln sie für das newtonsche Fluid die Viskosität mathematisch mittels linearer Regression aus der entsprechenden Fließkurve.

4.2. Viskositäts-Temperaturverhalten einer newtonschen Flüssigkeit

Ermitteln sie mit Hilfe des Rotationsviskosimeters experimentell das Viskositäts-Temperatur-Verhalten der newtonschen Flüssigkeit. Nehmen sie hierfür die Viskosität bei 20°C, 30°C, 40°C, 50°C und 60°C bei einer Scherrate von 500 s⁻¹ auf. Für jede Temperatur werden zunächst 150 Messpunkte eingestellt. Nachdem eine konstante Schubspannung erreicht wurde, werden fünf Messpunkte zur Berechnung aufgenommen, anschließend kann die Messung abgebrochen werden.

Stellen sie das V-T-Verhalten graphisch dar und ermitteln sie einen funktionellen Zusammenhang zwischen Viskosität und Temperatur. Nutzen sie hierfür die Andrade-Gleichung und bestimmen sie die Parameter A und B. Tabellieren sie die Messwerte und führen sie die Auswertung grafisch durch. Die Andrade-Gleichung entspricht folgendem Schema:

$$\eta = A \cdot e^{\frac{B}{RT}} \quad (20)$$

4.3. Druckverlust einer strukturviskosen Flüssigkeit in einer hypothetischen Anlage

Berechnen sie den Druckverlust bei der Förderung der o.a. strukturviskosen Flüssigkeit für eine hypothetische Anlage (siehe Abbildung 6) bei folgenden technologischen Bedingungen:

Durchmesser der Rohrleitung	5 cm
Länge der Rohrleitung	50 m
Höhenunterschied	10 m
4 Glattröhrbögen	Widerstandswerte s.u.
2 Durchgangsventile	Widerstandswerte s.u.
Fördertemperatur	a) 20 °C b) 30 °C
Strömungsgeschwindigkeit	0,5 m/s und 1,0 m/s
Rohrmaterial	Stahlrohr, geschweißt

Ermitteln sie die entsprechenden Werte für den Druckverlust bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 sowie 1,0 m s⁻¹ jeweils für 20°C und 30 °C. Interpretieren sie das Ergebnis bezüglich technischer Realisierbarkeit, wirtschaftlicher Förderleistung sowie einer kurzen ökonomischen Einschätzung.

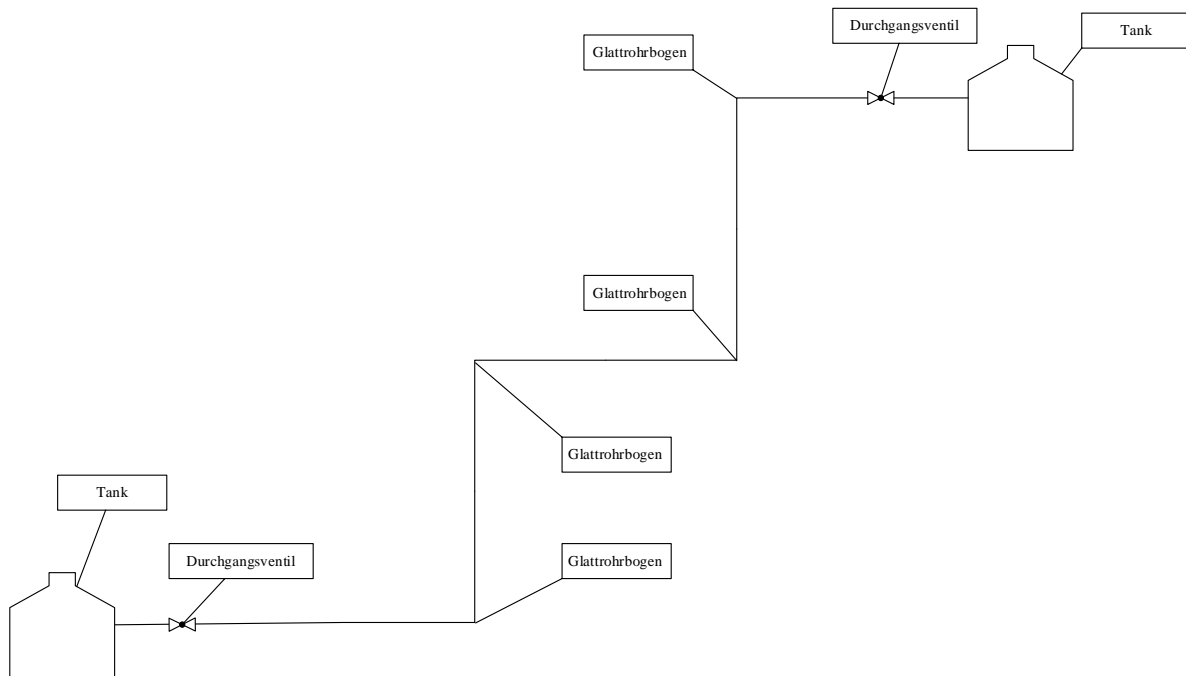


Abbildung 6: Skizzierter Aufbau eines Rohrsystems zum Transport einer Flüssigkeit.

Berechnen sie den Druckverlust wie folgt:

- Berechnen sie den Volumenstrom \dot{V} , leiten sie sich eine geeignete Gleichung aus der allgemeinen Definition des Volumenstroms ab
- Berechnen sie D näherungsweise mittel Gleichung (16) der Praktikumsanleitung
- Berechnen sie η_a mittels der, für das Rotationsviskosimeter aufgestellten, Ostwaldgleichung
- Berechnen sie τ auf der Grundlage folgender Funktion $\tau / D = \eta_a = f(D)$
- Berechnung sie Re und λ mittels der unten angegebenen Gleichungen
- Berechnung sie die Druckverluste. Für die Dichte ρ ist die Dichte von Wasser entsprechend der vorgegebenen Arbeitstemperatur einzusetzen (für H_2O $\rho_{20} = 998,4 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{30} = 995,6 \text{ kg/m}^3$).

Gleichungen für laminare Strömungen:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \tag{22}$$

$$Re = \frac{u \cdot d_i \cdot \rho}{\eta_a} \tag{23}$$

Gleichungen für turbulente Strömungen ($Re > 2320$):

$$\lambda = f\left(Re, \frac{d_i}{k}\right)$$

mit k Rohrrauigkeitswert (mm)

Für Stahlrohre (nahtlos, neu) beträgt $k = 0,03 \div 0,05 \text{ mm}$

Den Druckverlust berechnen sie nach der Gleichung:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} u^2 \left(\lambda \frac{l}{d_i} + \sum \phi \right) + \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad (21)$$

mit

ρ	Dichte der Flüssigkeit	[kg · m ⁻³]
g	Erdbeschleunigung	[m · s ⁻²]
u	Strömungsgeschwindigkeit	[m · s ⁻¹]
l	Rohrleitungslänge	[m]
Δh	Höhenunterschied	[m]
d_i	Innendurchmesser der Rohrleitung	[m]
λ	Rohrreibungsbeiwert	[-]
ϕ	Einzelwiderstand der angegebenen Bauteile	[-]

ϕ -Werte:

Glattrohrbogen: 0,30

Absperrventil: 5,0

5. Antestat

Für das Antestat sollten sie folgende Aspekte kennen:

- Theoretische Grundlagen der Viskosimetrie, d.h. Definition, Ursachen und Einflussparameter
- Einteilung in newtonsche und nicht-newtonsche Fluide
- Methoden zur Bestimmung der Viskosimetrie
- Allgemeiner Versuchsaufbau und Kenntnis der Durchführung

6. Literatur

- [1] DIN 1342 Teil 2, 2. 1986 Viskosität, Newtonsche Flüssigkeiten.
- [2] Baerns, M., Technische Chemie, WILEY-VCH, 2008.
- [3] Gmehling, Grundoperationen – Lehrbuch der Technischen Chemie Band 2, Thieme Verlag, 1996.
- [4] Ullmanns Enzyklopädie der Technischen Chemie, Bd. 4., 4. Auflage.
- [5] Schramm, G., Einführung in die praktische Viskosimetrie, Firmenschrift Gebr. Haake, Karlsruhe 1981.
- [6] DIN 1342 Teil 1, 10. 1983 Viskosität, Rheologische Begriffe.
- [7] DIN 13342 6. 1976 Nicht-newtonsche Flüssigkeiten.
- [8] DIN 51562 Teil 1, 1.1983 Messung der kinematischen Viskosität mit dem Ubbelohde-Viskosimeter (Normalausführung).
- [9] DIN 53019 Teil 1,5.1980 Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern mit Standardgeometrie (Normalausführung).
- [10] Ullmann's Chemical Engineering and Plant Design Volume 1, WILEY-VCH, 2005.