



Praktikum "Experimentelle Strömungsmechanik"

Versuch S1: Bestimmung von Materialkennwerten

Teilversuch b: Kugelfall-Viskosimeter - dynamische und kinematische Viskosität eines Newtonschen Fluids

Inhalt

1. Aufgabenstellung	2
2. Theoretische Grundlagen	2
3. Versuchsaufbau	4
4. Versuchsdurchführung und -auswertung	4
5. Literatur.....	5
6. Messblatt.....	6

1. Aufgabenstellung

Bestimmen Sie die dynamische Viskosität η und die kinematische Viskosität ν einer gegebenen Flüssigkeit mit einem Kugelfall-Viskosimeter (nach Höppler).

2. Theoretische Grundlagen

Die *dynamische Viskosität einer Newtonschen Flüssigkeit* wird aus der *Sinkgeschwindigkeit einer Kugel* bestimmt, die in einem senkrechten Rohr unter dem Einfluss der Schwerkraft durch die (unendlich ausgedehnte) Flüssigkeit fällt¹. Voraussetzung ist die laminare Umströmung der Kugel. Die Reynoldszahl muss genügend klein bleiben.

Die Kugel habe die Dichte ρ_K und den Durchmesser D_K . Die zu untersuchende Flüssigkeit habe die Dichte ρ_F und die gesuchte (konstante) dynamische Viskosität η . Die Erdbeschleunigung sei g .

Im stationären Fall fällt die Kugel (senkrecht) aufgrund des Kräftegleichgewichtes mit einer konstanten Geschwindigkeit u_∞ (Abb. 1). Es stellt sich ein Kräftegleichgewicht

$$\sum_i F_i = 0 \quad i = S, A, W \quad (1)$$

mit den folgenden, an der Kugel wirkenden Kräften ein:

Schwerkraft: $F_S = m_K g = \rho_K \frac{\pi D_K^3}{6} g \quad (2)$

Auftriebskraft: $F_A = m_F g = \rho_F \frac{\pi D_K^3}{6} g \quad (3)$

Widerstandskraft:

Die Widerstandskraft für die stationäre Umströmung einer Kugel wird bei Kenntnis des *Widerstandsbeiwertes* c_W berechnet mit

$$F_W = c_W \frac{\pi}{4} D_K^2 \cdot \frac{\rho_F}{2} u_\infty^2 \quad (4)$$

Für kleine *Reynoldszahlen* ($Re < 0.5$),

$$Re = \frac{u_\infty D_K \rho_F}{\eta} \quad (5)$$

d. h. für die schleichende Umströmung der Kugel, gilt für die Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes von der Reynoldszahl die Beziehung

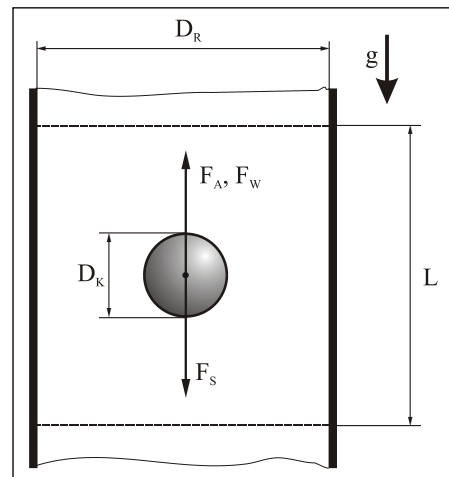


Abb. 1: Kräfte an einer frei fallenden Kugel

¹ Im für den Versuch angewendeten Kugelfall-Viskosimeter nach Höppler ist das Rohr, in dem sich die Kugel bewegt, um einen Winkel von 10° gegenüber der Senkrechten leicht geneigt. Dadurch wird die Bewegung der Kugel besser "geführt" und der Weg der Kugel ist exakter bestimmt. Obwohl Gl. (8) nur für eine senkrechte Bewegung der Kugel gilt (Kräftebilanz an senkrecht fallender Kugel), ist der Fehler durch die Anwendung auf eine leicht von der Senkrechten abweichenden Kugelbahn gering, da die Kugelkonstanten K_K mit Hilfe von Newtonschen Kalibrierflüssigkeiten (Flüssigkeiten mit a priori bekannter Viskosität) exakt bestimmt wurden.

$$c_w = \frac{24}{Re} \quad (6)$$

(vgl. hierzu Abb. 2). Damit kann die Widerstandskraft F_W berechnet werden. Einsetzen der Gln. (5) und (6) in Gl. (4) führt zu der als *Stokessches Widerstandsgesetz* bekannten Beziehung:

$$F_W = 3\pi D_K \eta u_\infty \quad (7)$$

Die Kräftebilanz an der Kugel entsprechend Gl. (1) führt zu einer Beziehung zur Berechnung der dynamischen Viskosität aus der stationären Sinkgeschwindigkeit u_∞ der Kugel:

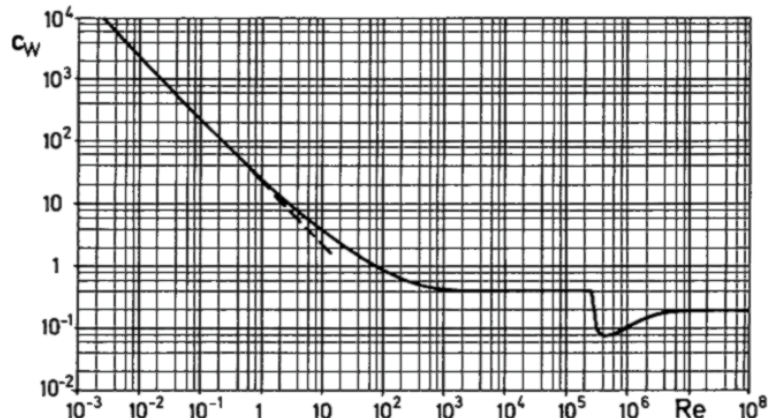


Abb. 2: Widerstandsbeiwert c_w als Funktion der Reynoldszahl für die stationäre Umströmung einer glatten Kugel

(Quelle: <http://www.peterjunglas.de/fh/vorlesungen/stroemungslehre2/images/bild54.png>)

$$\eta = \frac{(\rho_K - \rho_F) D_K^2 g}{18 u_\infty} \quad (8)$$

Die stationäre Sinkgeschwindigkeit kann durch Einführung der Fallhöhe L und der Sinkzeit t_s substituiert werden. Für die Berechnung der Viskosität ergibt sich somit die Beziehung

$$\eta = \frac{(\rho_K - \rho_F) D_K^2 g t_s}{18 L}, \quad (9)$$

in der allerdings der Wandeinfluss nicht berücksichtigt wurde. Es ist sinnvoll, die entsprechenden geometrischen Größen, die Erdbeschleunigung und auch den Wandeinfluss aufgrund der endlichen Abmessungen des äußeren Rohres des Viskosimeters zu einer Kugelkonstanten K_K zusammenzufassen, woraus die Beziehung

$$\eta_F = K_K (\rho_K - \rho_F) t_s \quad (10)$$

zur Berechnung der dynamischen Viskosität aus der Fallzeit der Kugel resultiert. Diese Kugelkonstante kann mit Hilfe von Kalibrierflüssigkeiten, d. h. Flüssigkeiten mit einer bekannten Viskosität, experimentell bestimmt werden. Die kinematische Viskosität ν wird dann unter Berücksichtigung der Fluidichte bestimmt:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_F} = K_K \cdot \left(\frac{\rho_K}{\rho_F} - 1 \right) \cdot t_s \quad (11)$$

Die abgeleiteten Gesetzmäßigkeiten haben auch eine große Bedeutung für Probleme des Umweltschutzes, da hiermit solche Vorgänge wie Sedimentation und Schadstoffausbreitung beschrieben werden können.

3. Versuchsaufbau

Kernstück des Kugelfall-Viskosimeters (Abb. 3) ist ein um ca. 10° geneigtes Rohr aus Borosilikatglas mit einem konstanten Innendurchmesser. Das Glasrohr wird durch ein Wasserbad temperiert. Eine Präzisionskugel aus Glas oder Stahl mit genau bekanntem Durchmesser und bekannter Dichte gleitet in dem Glasrohr nach unten. Die stationäre Sinkgeschwindigkeit der Kugel wird durch die Viskosität und die Dichtedifferenz zwischen Kugel und Fluid bestimmt. Das gesamte Messsystem ist schwenkbar gelagert und kann in zwei definierten Stellungen betrieben werden. Somit ist eine bidirektionale Messung möglich, wobei sich die Kugelkonstanten K_K in Auf- und Abwärtsrichtung möglicherweise leicht unterscheiden können.



Abb. 3: Kugelfall-
viskosimeter

Zur Messung der Fallzeit zwischen den beiden äußeren Marken am Messrohr wird eine Stoppuhr benutzt. Als Bezugspunkt beim Passieren einer Marke wird jeweils die untere Kante der Kugel verwendet. Wichtig ist, die Augen in Höhe der jeweiligen Marke zu bringen, damit Messfehler hinsichtlich des Passierens der Marke durch die Kugel vermieden werden.

4. Versuchsdurchführung und -auswertung

Gegeben ist ein Silikonöl, dessen Dichte im Versuch S1d zu bestimmen ist. Dieses Silikonöl wurde bereits in das innere Glasrohr eingefüllt und genügend lange temperiert. Als Kugel wird die Stahlkugel mit der Nummer 4 (siehe Kalibrierschein) benutzt. Diese befindet sich ebenfalls bereits im Glasrohr.

Bestimmen Sie die dynamische und kinematische Viskosität des Silikonöls bei der angegebenen Temperatur. Orientieren Sie sich bei der Durchführung des Versuches an dem folgenden Schema:

1. Die Kugelkonstante, den Durchmesser und die Materialdichte der Kugel entnehmen Sie dem Kalibrierschein, der Bestandteil der Geräteunterlagen ist.
2. Messen Sie die Sinkzeiten der Kugel zwischen den äußeren Markierungen am Messrohr mit einer Stoppuhr möglichst genau. Wählen Sie als Bezugsebene die Kugelunterseite. Beachten Sie die unterschiedlichen Kugelkonstanten für die verschiedenen Fallrichtungen bezüglich des Rohres.
3. Führen Sie mindestens drei Messungen für die Sinkzeit t_s durch und mitteln Sie diese Zeiten.
4. Berechnen Sie die dynamische und kinematische Viskosität. Beachten Sie dabei die Maßeinheiten, in denen die verschiedenen Größen in Gl. (10) oder (11) eingesetzt werden müssen. Für die auf dem Kalibrierschein angegebene Gleichung gilt: $\Delta\rho = \rho_K - \rho_F$ in g/cm^3 , K_K in $mPas \cdot cm^3 / (g \cdot s)$ und t_s in s. Die dynamische bzw. kinematische Viskosität wird folglich in $mPas$ bzw. $10^{-3} m^2 / s$ erhalten.
5. Überprüfen Sie durch Berechnung der *Reynoldszahl*, ob Gl. (6) anwendbar ist. Die Messlänge zwischen den äußeren Markierungen am Innenrohr beträgt 100 mm.

6. Vergleichen Sie die Werte mit den Ergebnissen aus dem parallel verlaufenen Rotationsviskosimeter-Versuch (Versuch S1a) und Kapillarviskosimeter-Versuch (Versuch S1c), bei dem die gleiche Substanz verwendet wurde.

7. Analysieren Sie eventuelle Abweichungen und Fehlermöglichkeiten.

5. Literatur

- Pahl, M. H.; Gleißle, W.; Laun, H.- M.
Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere, VDI-Verlag Düsseldorf 1991
- Schramm, G.
Einführung in die Rheologie und Rheometrie, HAAKE, Karlsruhe 1995
- Macosko, C.
Rheology, VCH Publishers, Inc., New York 1994

6. Messblatt

$\rho_F =$	g / cm^3	Dichte der Flüssigkeit (Versuch S1d)
$\rho_K =$	g / cm^3	Dichte der Kugel
$K_{K,1} =$	$mPas \cdot cm^3 / (g \cdot s)$	Kugelkonstante Richtung 1
$K_{K,2} =$	$mPas \cdot cm^3 / (g \cdot s)$	Kugelkonstante Richtung 2

T / °C	t_s / s (Ri. - Richtung)						\bar{t}_s / s	η / Pas
20	Ri. 1	Ri. 2	Ri. 1	Ri. 2	Ri. 1	Ri. 2		