

Versuch 107

Das Kugelfall-Viskosimeter nach Höppler

Antonia Joëlle Bock
antoniajoelle.bock@tu-dortmund.de

Rene-Marcel Lehner
rene.lehner@tu-dortmund.de

Durchführung: 07.01.2020

Abgabe: 14.01.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Strömungstypen und Viskosität	3
1.2	Das Kugelfallviskosimeter nach Höppler	4
2	Durchführung	5
3	Auswertung	6
4	Diskussion	8
	Anhang: originale Messdaten	9
	Literatur	9

1 Theorie¹

Im folgenden Experiment soll die Abhängigkeit der dynamischen Viskosität von destilliertem Wasser untersucht werden. Hierfür wird auf die Kugelfall-Methode nach Ernst Fritz Höppler mit dem entsprechenden Viskosimeter zurückgegriffen, deren theoretische Grundlagen im Weiteren erläutert werden.

1.1 Strömungstypen und Viskosität

Bewegt sich Flüssigkeit als Ganzes fort und finden nicht nur mikroskopische Bewegungen der einzelnen Teilchen innerhalb der Flüssigkeit statt, wird von einer Strömung gesprochen. Diese wird durch die Strömungsgeschwindigkeit $\mathbf{u} = d\mathbf{r}/dt$ eines am Ort \mathbf{r} zur Zeit t befindlichen Teilchens beschrieben. Der dadurch festgelegte Weg $\mathbf{r}(t)$ eines solchen Teilchens wird mit **Stromlinie** beziehungsweise **Stromfaden** bezeichnet. Sie charakterisieren die Flüssigkeiten in ihrem Strömungsverhalten und werden unter anderem von den stattfindenden Reibungsverlusten innerhalb der Flüssigkeit oder zwischen zwei verschiedenen Medien beeinflusst. Die sogenannte Viskosität² η ist ein Maß für die Stärke der Reibung innerhalb des Mediums und hat die Einheit $\text{Ns/m}^2 = \text{Pa}\cdot\text{s}$. Sie hängt unter anderem vom Stoff als auch von der Temperatur ab.

Von Interesse seien hier vor allem viskose Flüssigkeiten. Nicht-viskose Flüssigkeiten – auch **ideale Flüssigkeiten** – haben eine Viskosität von $\eta \approx 0$, die innere Reibung ist bei diesen also vernachlässigbar klein. Strömungen viskoser Flüssigkeiten lassen sich in **laminare** und **turbulente Strömungen** unterteilen. Charakteristisch für eine laminare Strömung sind die durch die Stromlinien getrennten Flüssigkeitsschichten, die sich nicht miteinander vermengen. Hier überwiegt die innere Reibung der an den Randschichten. Ist dies nicht der Fall, destabilisiert sich diese Strömung und geht in eine turbulente über, bei der sich Wirbel und Ähnliches ausbilden. Besonders anschaulich wird dieser Sachverhalt unter Betrachtung der Abbildungen 1 a und b.

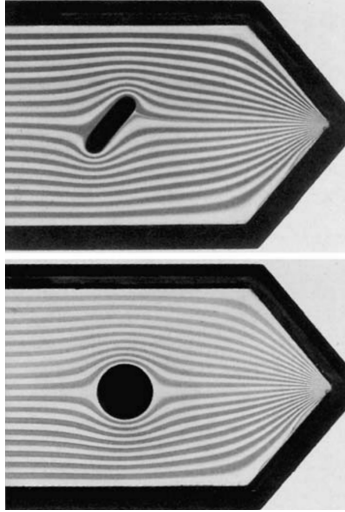
Mithilfe der dimensionslosen **Reynoldszahl** Re kann quantifiziert werden, inwieweit eine Flüssigkeit laminar beziehungsweise turbulent ist. Liegt Re unterhalb der sogenannten **kritischen Reynoldszahl** Re_c , ist die Strömung laminar, ansonsten turbulent. Berechnet wird die Reynoldszahl über

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta}, \quad (1)$$

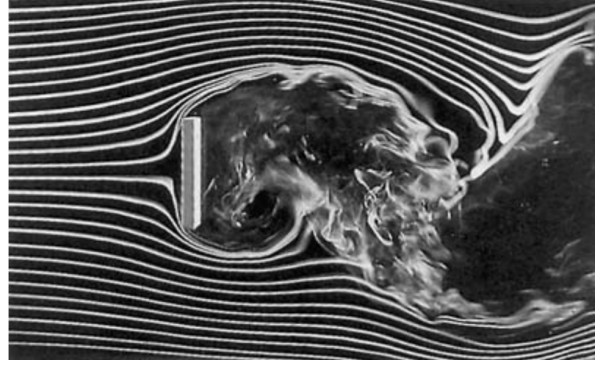
wobei ρ die Dichte der Flüssigkeit ist, v die Geschwindigkeit eines Körpers gegenüber der Flüssigkeit und L eine zu definierende charakteristische Länge, die der Geometrie der Situation entspricht. Ohne 1.2 etwas vorwegzunehmen sei an dieser Stelle angemerkt, dass bei zylinderförmigen Behältern und kugelförmigen Fallkörpern, deren Durchmesser nur um Weniges kleiner sind als der des Zylinders, der Durchmesser d häufig als L gewählt wird.

¹Unter Verwendung der Quellen [1], [2] und [3].

²Ist von Viskosität die Rede, ist meist die dynamische Viskosität gemeint. Es gibt ebenfalls die kinematische Viskosität ν . Wenn diese erwähnt werden soll, wird dies üblicherweise ohne Weglassung des Attributs *kinematisch* getan.



(a) Eine laminare Strömung[1].



(b) Eine turbulente Strömung[1].

Abbildung 1: Von links nach rechts laufende Strömungen viskoser Flüssigkeiten.

1.2 Das Kugelfallviskosimeter nach Höppler

Ein Kugelfallviskosimeter besteht aus einem zylinderförmigen Behälter, der mit vorzugsweise Wasser gefüllt. Dadrin befindet sich eine Röhre, die mit dem Fluid gefüllt wird, dessen Viskosität untersucht werden soll. Über ein angeschlossenes Thermostat kann die Temperatur des Wassers reguliert werden, welche sich nach kurzer Zeit auf das Fluid überträgt. Das Prinzip beruht auf der *Stokes'schen Reibung* F_R , die durch eine fallende Kugel im Fluid erzeugt wird. Quantifizieren lässt sich dies über

$$F_R = 6\pi\eta vr, \quad (2)$$

wobei v die Geschwindigkeit und r den Radius der Kugel darstellen. Ebenfalls der Gewichtskraft $F_G = mg$ entgegen wirkt die Auftriebskraft

$$F_A = V\rho_{\text{Fl}}g \quad (3)$$

mit dem durch die Kugel verdrängten Volumen V , der Dichte der Flüssigkeit ρ_{Fl} und der Erdbeschleunigung g .

Wird eine Kugel mit diesem Wissen am oberen Ende der Röhre in das Fluid gelassen, stellt sich nach kurzer Zeit ein Kräftegleichgewicht und dementsprechend eine gleichförmige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit ein. Aus dem Gleichgewicht

$$F_A + F_R = F_G \quad (4)$$

lässt sich die dynamische Viskosität η des Fluids bestimmen. Daraus ergibt sich der Zusammenhang

$$\eta = K(\rho_{\text{Körper}} - \rho_{\text{Fl}})t \quad \text{mit der Fallzeit } t, \quad (5)$$

der Besonderheiten der spezifischen Apparatur, wie beispielsweise die Neigung der Röhre, mithilfe der Konstante K mitberücksichtigt.

Da beim Kugelfallviskosimeter nach Höppler der innere Zylinder nur minimal größer als der Kugeldurchmesser ist, ist nämlich die Apparatur um wenige Grade geneigt, damit die Kugel nicht frei im Fluid herabsinkt, sondern an der Rohrrinnenwand herabgleiten kann. Dies ist wichtig, um keine Turbulenzen beziehungsweise Wirbel zu erzeugen, wenn die Kugel mehrere Male an die Wand stößt. Die Turbulenzen würden die Messergebnisse erheblich verfälschen.

Dies wird unter Variation der Temperatur mithilfe des genannten Thermostats durchgeführt, um eine Relation zwischen Temperatur und Viskosität herstellen zu können. Der Zusammenhang wird über die Andrade'sche Gleichung

$$\eta = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (6)$$

mit den konstanten Parametern A und B und der Temperatur T des Fluids hergestellt.

2 Durchführung

Direkt zu Anfang werden die Eckdaten der zu verwendenden Glaskugeln aufgenommen. Hierbei handelt es sich um zwei Stück, die einen geringfügigen Unterschied im Radius aufweisen. Die Masse wird notiert und der Durchmesser mithilfe einer Schiebelehre gemessen. Daraus lässt sich bei der Auswertung die Dichte bestimmen.

Im Viskosimeter sollte im äußeren Zylinder bereits Wasser enthalten sein, das Raumtemperatur haben sollte, sodass keine großen Temperaturschwankungen bei der ersten Messung auftreten. Ist dies noch nicht getan, wird dies an dieser Stelle nachgeholt.

Das zu untersuchende Fluid ist Wasser, genauer bidestilliertes Wasser. Es handelt sich um besonders reines Wasser, welches zweifach destilliert worden ist.

Das Viskosimeter hat am inneren Zylinder oben und unten jeweils einen Schraubverschluss. Der obere samt vorhandener Stopfen wird geöffnet beziehungsweise entfernt und das Rohr mit dem reinen Wasser befüllt. Da Luftbläschen für die Messung im Folgeschritt entfernt werden, kann bereits an dieser Stelle darauf geachtet werden, möglichst wenig Blasen beim Befüllen entstehen zu lassen. Das Beseitigen der Bläschen geschieht mithilfe eines Glasstabs, der am unteren Ende zu einer kleinen Kreisscheibe ausgedehnt ist. Die Luftblasen werden nun von unten mit dem besagten Stab zur Öffnung getragen, bis das Wasser blasenfrei ist.

Ist dies geschehen, wird die kleinere der beiden Kugeln in das Wasser gelassen und der Deckel so verschlossen, dass keine Luft in der Röhre enthalten ist. Nun wird bei Raumtemperatur, die am Thermometer des Thermostats abzulesen ist, die Fallzeit gemessen, die die sich mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegende Kugel benötigt, um von der ersten der drei Markierungen bis zur letzten zu gelangen. Die erste Markierung ist so gewählt, dass bei Erreichen dieser sich das Gleichgewicht der Auftriebs-, Gewicht- und Reibungskraft eingestellt hat und die Kugel nicht weiter beschleunigt. Die Distanz zwischen der ersten und dritten Markierung beträgt $x = 100 \text{ mm}$. Ist die Kugel unten

angekommen, wird das Viskosimeter um 180° gedreht und die Messung wiederholt. Insgesamt sollen zehn Messzeiten aufgenommen werden.

Diese Messung wird genau so nochmal mit der größeren Kugel wiederholt. Dafür muss der untere Verschluss geöffnet und die Kugel herausgeholt werden, was unvermeidlich mit einem Auslaufen der inneren Röhre einhergeht. Diese wird nun wieder aufgefüllt, auf dieselbe Art und Weise blasenfrei gemacht und die zweite Kugel wird in das Gefäß gelassen. Nach weiteren zehn Messungen wird mithilfe des Thermostats die Temperatur des umgebenden Wassers schrittweise erhöht. Bei einer Erhöhung der Temperatur muss jeweils eine Weile gewartet werden, um sicherzugehen, dass das temperierende Wasser und das reine Wasser dieselbe Temperatur angenommen haben. In Summe sollen jeweils zehn Fallzeiten für zehn verschiedene Temperaturen des bidestillierten Wassers gemessen werden. Hierfür wird ausschließlich die große Glaskugel verwendet. Beim Erhitzen sollte maximal eine Temperatur von 70°C erreicht werden. Außerdem empfiehlt es sich, in Abständen die Entlüftungsschraube zu lockern, um dem entstehenden Druck entgegen zu wirken.

3 Auswertung

Tabelle 1: Fallzeiten der kleinen Kugel bei Raumtemperatur.

Fallzeit t / s	
12.40	12.17
12.36	12.35
12.31	12.09
12.43	12.35
12.57	12.52

Tabelle 2: Fallzeiten der großen Kugel bei steigender Temperatur.

Temperatur $T / ^\circ\text{C}$	Fallzeit t / s		Temperatur $T / ^\circ\text{C}$	Fallzeit t / s	
23.5	92.25	92.32	46.0	53.47	53.29
	91.48	91.32		52.74	53.53
	91.22	91.25		53.22	53.89
	92.12	91.83		53.27	53.99
	92.62	92.69		53.56	53.62
31.5	71.75	72.13	51.0	49.50	49.35
	71.75	71.83		49.22	49.35
	70.69	71.62		49.32	49.47
	71.03	70.42		48.06	48.33
	69.85	69.80		48.93	48.59
35.0	69.22	69.39	55.0	46.16	45.81
	67.31	67.01		45.98	45.84
	66.88	66.92		46.00	45.14
	67.17	66.25		45.84	45.76
	66.19	65.93		45.84	45.72
39.0	61.90	61.91	60.0	43.38	43.09
	62.00	62.00		43.17	42.54
	61.81	61.66		42.53	43.51
	61.12	61.21		43.00	42.81
	61.54	61.46		43.18	43.26
42.0	57.37	57.87	64.0	40.53	40.34
	57.56	57.55		40.19	40.24
	57.62	57.54		40.28	40.28
	58.00	57.97		40.46	40.48
	57.03	57.20		40.16	40.42

Tabelle 3: Fehlerrechnung mit Messwerten der großen Kugel.

Temperatur $T / ^\circ\text{C}$	Fallzeit t / s
23.5	91.910 ± 0.538
31.5	71.087 ± 0.812
35.0	67.227 ± 1.124
39.0	61.661 ± 0.304
42.0	57.571 ± 0.301
46.0	53.458 ± 0.339
51.0	49.012 ± 0.487
55.0	45.809 ± 0.255
60.0	43.047 ± 0.314
64.0	40.338 ± 0.122

4 Diskussion

Anhang: originale Messdaten

Abbildung 2: Kopie der originalen Messdaten.

V107.2 Höppler-Viskosimeter 07.01.20

Durchmesser: $d_1 = 15,6 \text{ mm}$, $d_2 = 15,76 \text{ mm}$ | $m_1 = 4,4531 \text{ g}$, $m_2 = 4,9528 \text{ g}$

$T = 23,5^\circ\text{C}$ (1)	12,40 s 12,36 s 12,31 s 12,43 s 12,57 s	12,17 s 12,35 s 12,09 s 12,35 s 12,52 s	12,44 s
(2)	1 min 32,25 s 1 min 32,32 s 1 min 31,47 s 1 min 31,32 s 1 min 31,22 s	1 min 31,25 s 1 min 32,12 s 1 min 31,83 s 1 min 32,62 s 1 min 32,69 s	
$T = 31,5^\circ\text{C}$ (2)	1 min 11,75 s 1 min 12,12 s 1 min 11,75 s 1 min 11,83 s 1 min 10,69 s	1 min 11,62 s 1 min 11,03 s 1 min 10,42 s 1 min 09,85 s 1 min 09,80 s	
$T = 35^\circ\text{C}$	1 min 09,22 s 1 min 09,39 s 1 min 09,31 s 1 min 07,01 s 1 min 06,88 s	1 min 06,92 s 1 min 07,17 s 1 min 06,25 s 1 min 06,19 s 1 min 05,93 s	
$T = 39^\circ\text{C}$	1 min 01,90 s 1 min 01,91 s 1 min 02,00 s 1 min 02,00 s 1 min 01,81 s	1 min 01,66 s 1 min 01,12 s 1 min 01,21 s 1 min 01,54 s 1 min 01,46 s	
$T = 42^\circ\text{C}$	57,37 s 57,87 s 57,56 s 57,55 s 57,62 s	57,54 s 58,00 s 57,97 s 57,03 s 57,20 s	
$T = 46^\circ\text{C}$	53,47 s 53,29 s	52,74 s 53,53 s	53,22 s 53,89 s 53,27 s 53,99 s 53,56 s 53,62 s
$T = 51^\circ\text{C}$	49,50 s 49,35 s	49,22 s 49,35 s	49,32 s 49,47 s 48,06 s 48,33 s 48,93 s 48,59 s
$T = 55^\circ\text{C}$	46,18 s 45,81 s	45,98 s 45,84 s	46,00 s 45,14 s 45,84 s 45,76 s 45,84 s 45,72 s
$T = 60^\circ\text{C}$	43,38 s 43,09 s	43,17 s 42,54 s	42,55 s 43,51 s 43,00 s 42,81 s 43,18 s 43,26 s
$T = 64^\circ\text{C}$	40,53 s 40,34 s	40,19 s 40,24 s	40,28 s 40,28 s 40,46 s 40,48 s 40,16 s 40,42 s

B. S.

Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 1. Mechanik und Wärme*. 4. Aufl. Springer, 2006.
- [2] TU Dortmund. *Versuchsanleitung V107 - Das Kugelfall-Viskosimeter nach Höppler*. 2019.
- [3] Dieter Meschede. *Gerthsen Physik*. 23. Aufl. Springer, 2006.