

## Versuchsprotokolle

---

Versuch 109

### Kugelfallmethode nach Stokes

#### Aufgaben

1. Messen der Fallzeiten von diversen Stahlkugeln in Rizinusöl.
2. Berechnen der dynamischen Viskosität des Öls.
3. Berechnen der kinematischen Viskosität und Überprüfen, ob der Fall im Bereich laminarer Strömungen erfolgte.

#### Grundlagen

##### Laminare Strömungen...

...sind Strömungsvorgängen, bei denen es innerhalb der Strömung zu keiner Verwirbelung kommt, also alle Teilströmungen gleichgerichtet verlaufen (z.B. Blutstrom in den menschlichen in Blutgefäßen). Die inneren Reibungsvorgänge können für zwei infinitesimal kleine „Strömungsflächen“ mit der Gleichung

$$F_R = \frac{\eta \cdot A \cdot v}{s}; v = konst$$

$$F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{ds}; v \neq konst$$

Hierbei ist  $\eta$  die dynamische Viskosität der strömenden Flüssigkeit und  $A$  die Auflagefläche der beiden Strömungsplatten. Ferner stellt  $v$  die Strömungsgeschwindigkeit und  $s$  den Abstand von der Gefäßwand dar. Die zweite Formel die an und für sich Allgemeiner von beiden, da sich auf Grund der Kohäsion und Adhäsion in der Flüssigkeiten Geschwindigkeitsgefälle  $\frac{dv}{ds}$  ergibt.

##### Stokesches Gesetz

Bewegt sich eine Kugel durch eine Flüssigkeit der dynamischen Viskosität  $\eta$  und verhält sich die Flüssigkeit durch die Relativgeschwindigkeit laminar, so wirkt auf sie nach dem Stokeschen Gesetz (benannt nach Sir George Gabriel Stokes, 1819- 1903) eine Reibungskraft  $F_R$ :

$$F_R = 6 \cdot \Pi \cdot r \cdot \eta \cdot v$$

##### Turbulente Strömungen

Bewegt sich allerdings die Kugel mit einer höheren Relativgeschwindigkeit, so dass sie die Laminarität der Flüssigkeit unterbricht, entstehen Wirbel, welche zu einer Widerstandskraft  $F_W$  der Flüssigkeit führen. Newton erkannte dieses Problem und formulierte allgemein:

$$F_W = c \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} v^2,$$

wobei  $A$  die dem Fluid entgegengesetzt Effektivfläche,  $\rho$  die Dichte der Flüssigkeit,  $v$  die Relativgeschwindigkeit und  $c$  ein Vorfaktor, Widerstandsbeiwert genannt, welcher sich nach Form und Beschaffenheit des Körpers und der Flüssigkeit richtet, ist.

##### Grenzbereich zwischen Laminar und Turbulent

Betrachtet man den Grenzbereich zwischen laminarer und turbulenter Umströmung für eine Kugel, so gilt:

$$\begin{aligned} F_R &= F_W \\ 6\Pi \cdot r \cdot \eta \cdot v &= c \cdot 2\Pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot v^2 \\ \frac{6}{c} &= R_E = \frac{\rho}{\eta} \cdot 2r \cdot v = \frac{d \cdot v}{\nu} \end{aligned}$$

$R_E$  wird Reynoldssche Zahl bezeichnet und gibt den Grenzwert zwischen laminarer und turbulenter Umströmung an. Ist der Term rechts von  $R_E$  kleiner als 0,4 (Reynoldssche Zahl für Kugeln in Öl) dann handelt sich es um laminares Verhalten, ist es größer, dann treten Turbulenzen und Wirbel auf und das Stokesche Gesetz gilt nicht. Statt der dynamischen Viskosität wird oft, wie z.B. oben, ebenso die kinematische Viskosität  $\nu$  genutzt:

$$\nu := \frac{\eta}{\rho}$$

##### Stokes Fallexperiment

Fällt eine Kugel in einer Flüssigkeit, so stellt sich nach einer gewissen Zeit ein Kräftegleichgewicht ein und sie fällt gleichförmig, geradlinig ohne jede Beschleunigung nach unten. Es gilt:

$$0 = F_R + F_A - F_G$$

$$F_G = F_R + F_A$$

## Versuchsprotokolle

$$m_K \cdot g = 6 \cdot \Pi \cdot r \cdot \eta \cdot v + m_{Fl} \cdot g$$

$$\frac{(m_K - m_{Fl}) \cdot g}{6 \cdot \Pi \cdot r \cdot v} = \eta$$

$$\frac{(\rho_K - \rho_{Fl}) \cdot \frac{4}{3} \Pi r^3 \cdot g}{6 \cdot \Pi \cdot r \cdot v} = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g}{9 \cdot v} \cdot (\rho_K - \rho_{Fl}) = \eta$$

Na bitte, da haben wir ja das ganze Problem in mächtig gebändigter Form...

### Bemerkungen in Kurzform:

- Die Viskosität  $\eta$  ist eine Stoffkonstante und signifikant temperaturabhängig
- Das Stokesche Gesetz gilt für unausgedehnte Fallrohre. Die Korrekturformel lautet:

$$F_R^{korrektur} = F_R \cdot \left( 1 + p \frac{r_{Kugel}}{R_{Gefäß}} \right)$$

- Auf Grund der extremen Temperaturabhängigkeit von  $\eta$  ist es ratsam, die Kugeln in unterschiedlicher Reihenfolge Fallen zu lassen ( $\rightarrow$  „Messwert“ Versuchsposition  $n_{pos}$ )

### Quellenangabe:

FSU: „Physikalisches Grundpraktikum“,  
 Springer: „Gerthsen- Physik“,  
 IZE: „Formeln Physik/ Chemie“,  
 Mende/ Simon: „Physik- Gleichungen und Tabellen“,  
 Kane & Laby: „Table of phy. And chem. Constants“

## Versuchsdurchführung

### Versuchsobjekt:

Verschiedene Kugeln (4 mit gleichen Radius, 5 Kugeln mit verschiedenen Radius), Fallgefäß mit Öl,

### Messgeräte:

Uhr, Thermometer, Präzisionswaage, Feinmessschraube, Lineal (Abmessen der Markierungen)

### Erwartete Werte:

Tabellenwert für  $\eta$  von Öl:

T in °C	$\eta$ in Pa s
18	1,11
20	0,95
22	0,82
24	0,71
25	0,7
30	0,451
50	0,125
75	0,042
100	0,0169

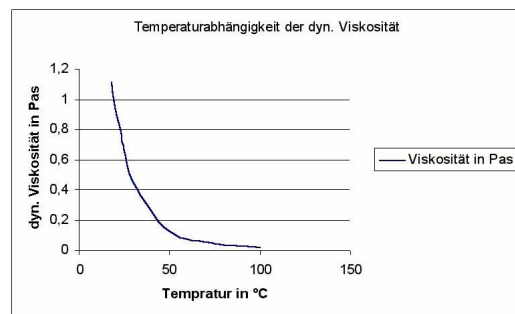


ABB I: Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Rizinusöl.

Erwarteter Wert bei Zimmertemperatur (21 °C) :  $0,95 \text{ Pas} \geq \eta \geq 0,82 \text{ Pas}$

### Mögliche systematische Fehler:

Da wir kein unendlich großes Fallgefäß benutzen, sind die Werte von  $\eta$  systematisch „nach oben“ verfälscht. Ebenso ist für jeden Versuchsdurchgang zu prüfen, ob die Reynoldssche Zahl nicht überschritten wird. Die Markierungen sind evtl. zu weit oben, so dass die Kugel noch beschleunigt, während die Geschwindigkeit gemessen wird. Weiterhin wirken sich Abweichungen von Konstanten aus Tabellen ( $g$ ,  $\rho_{\text{Öl}}$ ) ebenso systematisch auf das Ergebnis aus.

### Versuchsablauf:

- Aufnehmen der Umweltbedingungen (Temperatur des Öls  $T_{\text{Öl}}$ , Weglänge  $s$ )
- Aufnehmen der charakteristischen Größen der Kugeln ( $d_K$  und  $m_K$ )
- Aufnehmen der Messwertserien (Fallzeiten  $t$  über  $s$ ), Überprüfen der Umweltbedingungen.
- Korrektur von  $\eta$
- Überprüfen der Reynoldsschen Zahl zur Ergebnisverifizierung

## Versuchsprotokolle

### Fehlerabschätzung:

*Kugelcharakteristik:*

$$\Delta r = \frac{\Delta d}{2}$$

$$\Delta \rho = \left| \frac{\partial \rho}{\partial m_K} \Delta m_K \right| + \left| \frac{\partial \rho}{\partial d} \Delta d \right|$$

$$= \frac{6}{\Pi \cdot d^3} \left( \Delta m_K + 3 \frac{\Delta d}{d} \right)$$

*Geschwindigkeit:*

$$\Delta v = \left| \frac{\partial v}{\partial s} \cdot \Delta s \right| + \left| \frac{\partial v}{\partial t} \cdot \Delta t \right|$$

$$= \frac{\Delta s}{t} + \frac{s \cdot \Delta t}{t^2}$$

*dynamische Viskosität:*

$$\Delta \eta = \left| \frac{\partial \eta}{\partial d} \cdot \Delta d \right| + \left| \frac{\partial \eta}{\partial \rho_K} \cdot \Delta \rho_K \right| + \left| \frac{\partial \eta}{\partial v} \cdot \Delta v \right|$$

$$= \frac{2 \cdot d \cdot g}{18 \cdot v} \cdot (\rho_K - \rho_{Fl}) \cdot \Delta d + \frac{d^2 \cdot g}{18 \cdot v} \cdot \Delta \rho_K + \frac{d^2 \cdot g}{18 \cdot v^2} \cdot (\rho_K - \rho_{Fl}) \cdot \Delta v$$

*kinematische Viskosität:*

$$\Delta \nu = \frac{\Delta \eta}{\rho}$$

*Überprüfen der Laminarität:*

$$\Delta R_E = \left| \frac{\partial R}{\partial v} \cdot \Delta v \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial d} \cdot \Delta d \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial \eta} \cdot \Delta \eta \right|$$

$$= \frac{\rho_{\text{Öl}}}{\eta} \cdot d \cdot \Delta v + \frac{\rho_{\text{Öl}}}{\eta} \cdot \Delta d \cdot v + \frac{\rho_{\text{Öl}}}{\eta^2} \cdot d \cdot v \cdot \Delta \eta$$

## Messwerte

### Vormessungen

Umgebungstemperatur zu Messbeginn:  $T_{\text{Umf}} = 21,5^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$

Fallstreckenlänge:  $s = 60 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$

Reaktionszeitexperiment:  $\Delta t = \pm 0,3 \text{ s}$

### Messwerte

Bez.	$n_{\text{Pos}}$	$m$ in g	$d$ in cm	$t$ in s	$T$ in $^\circ\text{C}$
A1	5	$0,8813 \pm 0,0005$	$0,6 \pm 0,0005$	$5,2 \pm 0,3$	$21,8 \pm 0,1$
A2	3	$0,5105 \pm 0,0005$	$0,5 \pm 0,0005$	$7,2 \pm 0,3$	$21,8 \pm 0,1$
A3	1	$0,2614 \pm 0,0005$	$0,399 \pm 0,0005$	$10,7 \pm 0,3$	$21,7 \pm 0,1$
B3	4	$0,2613 \pm 0,0005$	$0,399 \pm 0,0005$	$10,8 \pm 0,3$	$21,8 \pm 0,1$
C3	6	$0,2613 \pm 0,0005$	$0,4 \pm 0,0005$	$10,8 \pm 0,3$	$21,8 \pm 0,1$
D3	7	$0,2613 \pm 0,0005$	$0,399 \pm 0,0005$	$10,7 \pm 0,3$	$21,9 \pm 0,1$
A4	8	$0,0636 \pm 0,0005$	$0,249 \pm 0,0005$	$26 \pm 0,3$	$21,9 \pm 0,1$
A5	2	$0,0323 \pm 0,0005$	$0,199 \pm 0,0005$	$40,2 \pm 0,3$	$21,7 \pm 0,1$
A6	9	$0,0141 \pm 0,0005$	$0,15 \pm 0,0005$	$67,8 \pm 0,3$	$22 \pm 0,1$

## Versuchsprotokolle

### Auswertung

Berechnungen und Formeln:

Konstanten:

$$\rho = 0,96 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$$

$$s = 0,6 \text{cm}$$

$$R_{\text{Röhre}} = 74 \text{cm}$$

Berechnen der Kugelcharakteristik, Dichte:

$$\rho_K = \frac{m_K}{V_K} = \frac{3m_K}{4\pi \cdot r^3} = \frac{6mk}{\pi \cdot d^3}$$

Berechnen der Geschwindigkeit:

$$v = \frac{s}{t}$$

Berechnen der dynamischen und der kinematischen Viskosität:

$$\eta = \frac{d^2 \cdot g}{18 \cdot v} \cdot (\rho_K - \rho_{\text{Fl}}), \quad \nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Überprüfen der Laminarität:

$$0,4 > R_E = \frac{\rho}{\eta} \cdot d \cdot v = \frac{d \cdot v}{\nu}$$

### Korrektur von $\eta$

Es gilt:

$$F_R^{\text{korrektur}} = F_R \cdot \left( 1 + p \frac{r_{\text{Kugel}}}{R_{\text{Röhre}}} \right)$$

wobei  $F_R^{\text{korrektur}}$  nur von einem korrigierten  $\eta^{\text{korrektur}}$  abhängt, gilt weiterhin:

$$3 \cdot \pi \cdot d \cdot \eta^{\text{korrektur}} \cdot v = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \eta \cdot v \cdot \left( 1 + p \frac{d}{2 \cdot R_{\text{Röhre}}} \right)$$

$$\eta^{\text{korrektur}} = \eta \cdot \left( 1 + p \frac{d}{2 \cdot R_{\text{Röhre}}} \right)$$

wobei für zwei Wertepaare  $(\eta, d)$  sich  $p$  ermitteln lässt zu:

$$p = -2 \cdot R_{\text{Röhre}} \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 d_1 - \eta_2 d_2}$$

Fehlerrechnung für die Korrektur:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \left| \frac{\partial p}{\partial \eta_1} \Delta \eta_1 \right| + \left| \frac{\partial p}{\partial \eta_2} \Delta \eta_2 \right| + \left| \frac{\partial p}{\partial d_1} \Delta d_1 \right| + \left| \frac{\partial p}{\partial d_2} \Delta d_2 \right| \\ &= 2R_{\text{Röhre}} \cdot \left( \left| \frac{\eta_2 \cdot (d_1 - d_2)}{(\eta_1 d_1 - \eta_2 d_2)^2} \Delta \eta_1 \right| + \left| \frac{\eta_1 \cdot (d_2 - d_1)}{(\eta_1 d_1 - \eta_2 d_2)^2} \Delta \eta_2 \right| + \left| \frac{\eta_1 \cdot (\eta_2 - \eta_1)}{(\eta_1 d_1 - \eta_2 d_2)^2} \Delta d_1 \right| + \left| \frac{\eta_2 \cdot (\eta_1 - \eta_2)}{(\eta_1 d_1 - \eta_2 d_2)^2} \Delta d_2 \right| \right) \\ &= 2R_{\text{Röhre}} \cdot \left( \frac{(\eta_1 \Delta \eta_2 + \eta_2 \Delta \eta_1) \cdot |d_1 - d_2|}{(\eta_1 d_1 - \eta_2 d_2)^2} + \frac{(\eta_1 \Delta d_2 + \eta_2 \Delta d_1) \cdot |\eta_1 - \eta_2|}{(\eta_1 d_1 - \eta_2 d_2)^2} \right) \\ \Delta \eta^{\text{korrektur}} &= \left| \frac{\partial \eta^{\text{korrektur}}}{\partial \eta} \cdot \Delta \eta \right| + \left| \frac{\partial \eta^{\text{korrektur}}}{\partial p} \cdot \Delta p \right| + \left| \frac{\partial \eta^{\text{korrektur}}}{\partial d} \cdot \Delta d \right| \\ &= \left( 1 + p \frac{d}{2R_{\text{Röhre}}} \right) \Delta \eta + \eta \frac{d}{2R_{\text{Röhre}}} \Delta p + \eta \frac{p}{2R_{\text{Röhre}}} \Delta d \end{aligned}$$

**Versuchsprotokolle**

**Ergebnisse**

*Kugelcharakteristik, Dichte:*

		Messwerte		Ergebnisse
Bez.	$n_{Pos}$	$m$ in g	$d$ in cm	$\rho_K$ in $g/cm^3$
A1	5	0,8813±0,0005	0,6±0,0005	7,792±0,024
A2	3	0,5105±0,0005	0,5±0,0005	7,800±0,030
A3	1	0,2614±0,0005	0,399±0,0005	7,859±0,045
B3	4	0,2613±0,0005	0,399±0,0005	7,856±0,045
C3	6	0,2613±0,0005	0,4±0,0005	7,798±0,045
D3	7	0,2613±0,0005	0,399±0,0005	7,856±0,045
A4	8	0,0636±0,0005	0,249±0,0005	7,868±0,109
A5	2	0,0323±0,0005	0,199±0,0005	7,828±0,180
A6	9	0,0141±0,0005	0,15±0,0005	7,979±0,362

$$\bar{\rho}_K = 7,8485 \pm 0,0983 \frac{g}{cm^3}$$

*Geschwindigkeit:*

		Messwerte	Ergebnisse
Bez.	$n_{Pos}$	$t$ in s	$v$ in cm/s
A1	5	5,2±0,1	11,54±0,22
A2	3	7,2±0,1	8,33±0,12
A3	1	10,7±0,1	5,61±0,05
B3	4	10,8±0,1	5,55±0,05
C3	6	10,8±0,1	5,55±0,05
D3	7	10,7±0,1	5,61±0,05
A4	8	26±0,1	2,31±0,01
A5	2	40,2±0,1	1,49±0,01
A6	9	67,8±0,1	0,89±0,01

*Dynamische Viskosität (unkorrigiert):*

		Messwerte		Ergebnisse		
Bez.	$n_{Pos}$	$d$ in cm	$T$ in °C	$\rho_K$ in $g/cm^3$	$v$ in cm/s	$\eta$ in Pa s
A1	5	0,6±0,0005	21,8±0,1	7,792±0,024	11,54±0,22	1,1618±0,2834
A2	3	0,5±0,0005	21,8±0,1	7,800±0,030	8,33±0,12	1,1183±0,2283
A3	1	0,399±0,0005	21,7±0,1	7,859±0,045	5,61±0,05	1,0675±0,1955
B3	4	0,399±0,0005	21,8±0,1	7,856±0,045	5,55±0,05	1,077±0,1963
C3	6	0,4±0,0005	21,8±0,1	7,798±0,045	5,55±0,05	1,0732±0,1955
D3	7	0,399±0,0005	21,9±0,1	7,856±0,045	5,61±0,05	1,0671±0,1955
A4	8	0,249±0,0005	21,9±0,1	7,868±0,109	2,31±0,01	1,0115±0,2397
A5	2	0,199±0,0005	21,7±0,1	7,828±0,180	1,49±0,01	0,9931±0,3351
A6	9	0,15±0,0005	22±0,1	7,979±0,362	0,89±0,01	0,9725±0,5817

*Dynamische Viskosität (korrigiert):*

nach der gemessenen Temperatur geordnet:

$T$ in °C	Bez.	$\eta$ in Pa s	$d$ in cm	P	$\eta_{korrektur}$ in Pa s
21,7	A3	1,0675±0,1955	0,399±0,0005	± 41,251	0,9287±0,2807
	A5	0,9931±0,3351	0,199±0,0005	-48,230± 41,251	0,9287±0,3686
21,8	A2	1,1183±0,2283	0,5±0,0005	± 7,053	0,9241±0,2144
	C3	1,0732±0,1955	0,4±0,0005	-51,396± 7,053	0,9241±0,1890
	A1	1,1618±0,2834	0,6±0,0005	± 7,053	0,9241±0,2553
	B3	1,077±0,1963	0,399±0,0005	± 7,053	0,9278±0,1898
21,9	D3	1,0671±0,1955	0,399±0,0005	± 21,826	0,9310±0,2303
	A4	1,0115±0,2397	0,249±0,0005	-47,317± 21,826	0,9310±0,2579
22	A6	0,9725±0,5817	0,15±0,0005	± 21,826	0,9310±0,5761

**Versuchsprotokolle**

Zur Überprüfung der mathematischen Ergebnisse (die wider Erwarten sehr nah bei einander liegen, siehe dazu Diskussion) wird über alle Temperaturen der Kurvenverlauf auf  $d=0\text{cm}$  extrapoliert.

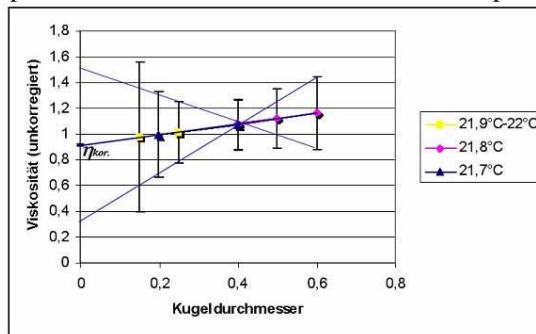


ABB II.1: Extrapolation über alle Temperaturen auf  $\eta_{\text{korrektur}}$

*kinematische Viskosität und Reynoldszahl:*

Bez.	$n_{\text{Pos}}$	$\eta_{\text{korrektur}}$ in Pa s	$\vartheta$ in $\text{m}^2/\text{s}$	$R_E$
A1	5	$0,9241 \pm 0,2553$	$0,00096260 \pm 0,00026594$	$0,7192 \pm 0,2131$
A2	3	$0,9241 \pm 0,2144$	$0,00096260 \pm 0,00022333$	$0,4329 \pm 0,1069$
A3	1	$0,9287 \pm 0,2807$	$0,00096740 \pm 0,00029240$	$0,2313 \pm 0,0724$
B3	4	$0,9278 \pm 0,1898$	$0,00096646 \pm 0,00019771$	$0,2294 \pm 0,0493$
C3	6	$0,9241 \pm 0,1890$	$0,00096260 \pm 0,00019688$	$0,2309 \pm 0,0496$
D3	7	$0,9310 \pm 0,2303$	$0,00096979 \pm 0,00023990$	$0,2307 \pm 0,0595$
A4	8	$0,9310 \pm 0,2579$	$0,00096979 \pm 0,00026865$	$0,0593 \pm 0,0168$
A5	2	$0,9287 \pm 0,3686$	$0,00096740 \pm 0,00038396$	$0,0307 \pm 0,0123$
A6	9	$0,9310 \pm 0,5761$	$0,00096979 \pm 0,00060010$	$0,0137 \pm 0,0085$

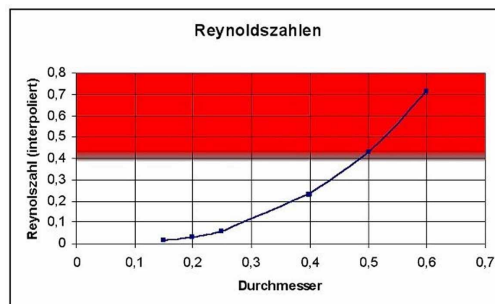


ABB. II.2: Die Kugeln A1 und A2 liegen mit ihren Reynoldszahlen oberhalb der 0,4- Grenze. Damit ist die Bewegung kritisch außerhalb einer laminaren Umströmung und es treten Verwirbelungen auf, welche das Messergebnis verfälschen.

**Diskussion**

Trotz gewissenhafter Versuchsarbeit konnten wir den vermuteten Wert ( $\sim 0,85$ ) für die Viskosität nicht ohne die Betrachtung des Fehlerintervalls bestätigen. Grund dafür könnte ein systematischer Fehler bei der Temperaturmessung sein. Das Thermometer reichte z.B. nur in eine äußere Schicht des Öles hinein und maß nicht die Temperatur des Öles *innerhalb* der Bewegungsbahn der Kugel. Somit ist es möglich, dass bei einer Temperaturänderung der Umgebung (z.B. durch meine Anwesenheit) die äußeren Schichten des Öles erwärmt (was gemessen wurde), aber die inneren rel. Konstanter Temperatur geblieben sind (nach den Messwerten zu urteilen: ca.  $20,1^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$ ). Dadurch ließe sich die ermittelte  $\eta$ - Verteilung erklären:

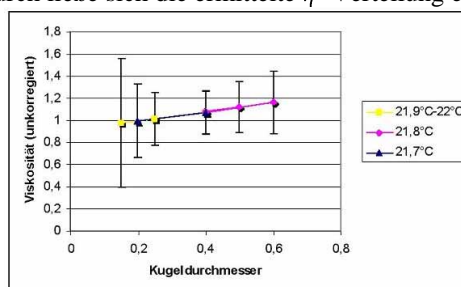


ABB III: Anordnung der Viskositäten bei verschiedenen Temperaturen und Durchmessern. Selbst auf Grund der gemessenen geringen Temperaturschwankungen müssten sich „Sprünge“ und „Knicke“ in der Kurve ergeben, jedoch ergibt sich fast eine gleichmäßige Gerade.

## Versuchsprotokolle

---

Ein weiterer systematischer Fehler, auf dem die Ergebnisabweichungen gründen könnte, ist die Tatsache, dass evtl. Konstanten mit nicht hinreichender Genauigkeit behandelt wurden. Ich denke dabei an die Dichte des Öles, welche sich bei einer Temperaturänderung ebenfalls auf Grund des Volumenausdehnungskoeffizienten ändert. Zur Überprüfung dieser These wäre es ratsam, in einem Nachversuch die Wärmeleitfähigkeit von Rizinusöl zu bestimmen, sowie des Verhalten der Dichte bei verschiedenen Temperaturen zu ermitteln.

Weiterhin wäre zu diskutieren, warum die Abweichungen der berechneten Viskositäten  $\eta$  von Kugel A2 und besonders von Kugel A1 sich so geringfügig (noch im Fehlerbereich der restlichen Werte) von den restlichen Werten unterscheidet.

Tatsächlich aber traten genau bei diesen beiden Kugeln Luftblasen an der Kugeloberfläche auf, welche das Ergebnis nicht abschätzbar verfälschen. So bleiben diese zwei Kugeln, trotz der Tatsache, das ihre Strömungsbewegungen oberhalb der kritischen Grenze liegt, innerhalb der normalen Ergebnisparameter.

Was konnte ich also zeigen?

Ich konnte bestätigen, dass die Viskosität innerhalb des mir selbst gesteckten Intervalls liegt (zw. 20°C und 22°C). Auf Grund der Tabellenwerte kann ich zurück schlussfolgern, dass im inneren der Ölsäule sich eine Temperatur von ca. 18°C bis 23 °C befunden haben musste (auf Grund des Fehlerintervalls). Die gemessenen Temperaturen liegen in diesem Bereich.

Nicht bestätigen konnte ich wegen zu großen Fehlerintervallen, dass die Viskosität stark Temperaturabhängig sei, da wie bereits erläutert, das Verhältnis gemessene Temperatur zu tatsächlicher Temperatur nicht stimmte. Auch kann ich mit diesen Messergebnissen nicht nachweisen, dass die Messungen an Kugel A1, deren Reynoldszahl signifikant größer als 0,4 ist, eine andere Viskosität zurückliefert, als bei den anderen Probekörpern.

In sofern sind die gestellten Aufgaben erfüllt, jedoch ohne die Thesen der Vorbetrachtung bestätigen zu können. (Es erfordert also ein wenig blindes Vertrauen in die Behauptungen der Temperaturabhängigkeit von  $\eta$  sowie der Reynoldszahl).

Die abgezeichneten Messergebnisse sind im Anhang zum Protokoll zu finden.

Jena, 15.12.2001

