

**SS2020**

---

**PPA1**

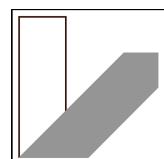
---

# Viskosität

---

Charlotte Geiger - Manuel Lippert - Leonhard Schatt

---



## **INHALT**

## Versuch Vis : Viskosität

Teilnehmer: Leo Schrott, Manuel Cipper, Charlotte Greiger

Gruppe: 2

Datum: 6. August 2020

Versuchsplatz : Fenster

## Gliederung

1. Einführung
  2. Fragen zur Vorbereitung
  3. Auswertung
  4. Fazit

## 1. Einleitung

Im Alltag begegnet man verhältnismäßig Flüssigkeiten mit verschiedenen Viskositäten. Man trinkt Wasser oder tränkt Honig auf ein Brot. Die Ursache dafür ist, dass die Moleküle in einer Flüssigkeit sind und sich gegenseitig unterscheiden. Die dabei auftretenden Reibungskräfte sind proportional zur Geschwindigkeitsabhängigkeit und charakteristisch für die jeweilige Zähigkeit oder Viskosität der jeweiligen Flüssigkeit.

Die Viskosität ist sehr stark von  $T$  abhängig, weshalb wir zuerst die Durchflusszeit  $\tau$  für Wasser ~~nehmen~~ bei  $20^\circ\text{C}$  messen um die Kapillare zu kalibrieren, um dann die Temperaturabhängigkeit der Viskosität zu messen.

Die Messungen werden unter laminaren Strömungsbedingungen durchgeführt, bei der die Reibung für die Form der Strömung verantwortlich ist. In der vom Fluid durchflossenen Kapillare ergibt sich ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil.

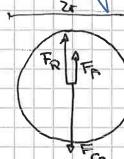
Unser Ziel in diesem Versuch ist es, mit Hilfe des Ubbelohde-Messzylinders die Viskosität von Wasser und zweier unbekannter Flüssigkeiten zu bestimmen. Außerdem soll die Temperatur-abhängigkeit der Viskosität von Wasser bestimmt werden.

## 2. Fragen zur Vorbereitung

1. Alternative Möglichkeiten zur Bestimmung der Viskosität

Mit Hilfe des Stokes'schen Gesetzes kann man die Viskosität über die Sedimentationsgeschwindigkeit bestimmen. OK

Beobachtet man z.B. eine Kugel mit Radius  $r$ , die in einem unendlich ausgedehnten, zähen Medium mit konstanter Geschwindigkeit  $v$  nach unten fällt, so wirken wie in den folgenden Abbildungen Kräfte, wodurch man weiß, dass bei der Bewegung eines Körpers in einer Flüssigkeit die Viskosität eine zentrale Rolle spielt.



1. Gravitationskraft  $F_G = mg$

2. Auftriebskraft:  $F_A = \text{Kugel} \cdot \text{Flüssigkeit} \cdot g$

3. Reibungskraft:  $F_R$ , immer entgegen der Bewegung  
Viskosität

Stokes'sche Formel:  $F_R = 6\pi \cdot r \cdot \eta \cdot \text{Strömungsgeschw. der Kugel}$

Gr. Berechnung der Reibungskraft, sofern laminare Strömung vorliegt.

Das Volumen  $V_k$  und die Dichte der Kugel müssen bekannt sein.

Wir betrachten nun das Fallen der Kugel in einer unendlich ausgedehnten Flüssigkeit mit der Dichte  $\rho_f$  und der Viskosität  $\eta$ . Ist die Kugel wesen, dass drei obengenannten Kräfte, die alle in vertikale Richtung orientiert sind. Deshalb steht die Betrachtung ihrer Beträge.

Die resultierende Kraft  $F$  ist also:

$$F = F_g - F_A - F_R$$

Diese Kraft beschleunigt die Kugel nach unten auf zunächst immer größere werdende Geschwindigkeiten  $v$ . Mit  $v$  nimmt jedoch auch  $F_R$ , so dass  $F$  immer kleiner und schließlich gleich Null wird.

Bei diesem Zeitpunkt an gilt:  $F = F_g - F_A - F_R = 0$

Die Kugel fällt von nun an mit der konstanten Geschwindigkeit  $v_0$ .

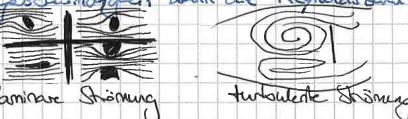
Eine weitere Methode ist die Bestimmung der Viskosität mit einem Kapillarviskosimeter nach UBBELOHDE.

Durch eine senkrecht stehende Kapillare vom Radius  $r_0$  strömt eine Flüssigkeit. Die Zeit  $t_0$ , die ein Flüssigkeitsvolumen  $V$  benötigt, um durch die Kapillare zu fließen, wird durch die Viskosität  $\eta$  der Flüssigkeit bestimmt. Je größer  $\eta$ , desto größer  $t_0$ . Dies ist das Prinzip, nach dem Kapillarviskosimeter arbeiten und ist auch die Methode, die wir für unsern Versuch benutzen.

## 2. Unterschied zwischen laminarer und turbulenter Strömung

Wenn die Flüssigkeitsschichten gleichmäßig aneinander vorbeigleiten, so spricht man von einer laminaren Strömung oder auch Schichtströmung. Turbulente Strömungen entstehen an nicht Stromlinienförmigen Körpern, oder wenn die Flussgeschwindigkeit zu groß wird. Sie zeichnen sich durch das Auftreten von Stromlinien und des Brüten von Verwirbelungen aus.

Als Kriterium für die Geschwindigkeitsverteilung die Reynolds-Zahl verwendet werden.



$$Re = \frac{L \cdot \rho_f \cdot v_{\text{mittl}}}{\eta}$$

mit  $L$  als charakteristische Länge des Systems. Für die Rohrströmung ist  $L = d = 2r$  der Innendurchmesser.

Am Beispiel einer Rohrströmung ist bei einer Reynolds-Zahl  $Re < 1160$  mit Sicherheit eine laminare Strömung zu finden. Im Bereich  $1160 < Re < 2300$  können Einlaufstörungen zu Verwirbelungen führen. Einlaufstörungen erhöhen den Strömungswiderstand beträchtlich.

Bei größeren Reynolds-Zahlen herrscht turbulente Strömung im Rohr.

**Neh** Der Versuch wird unter laminaren Bedingungen durchgeführt, da turbulente Strömung sehr unvorhersehbar ist und die Meßzeiten sehr leicht beeinflusst kann. Zusätzlich kann man die Viskosität durch das Stokes'sche Gesetz nur bei laminarer Strömung berechnen. wird hier nicht genutzt, aber die entsprechenden Werte gehen in die folgende Rechnung

## 3. Diskussion des Hagen-Poiseuille-Gesetzes

Mit dem Gesetz von Hagen-Poiseuille wird der Volumenstrom  $V$  - d.h. das geflossene Volumen  $b$  pro Zeiteinheit bei einer laminaren stationären Strömung eines Fluids durch ein Rohr mit Radius  $r$  und der Länge  $l$  beschrieben.

$$V = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot r^4 \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l} = \frac{\pi r^4}{8 \cdot \eta} \frac{\Delta p}{l} \leftarrow \text{Gesetz von H.-P.}$$

Die Bedeutung der Variablen:

$V \hat{=} \text{Volumenstrom durch das Rohr in } \frac{m^3}{s} \hat{=} \text{Strömstärke}$

$r \hat{=} \text{Innendurchmesser des Rohres in m}$

$l \hat{=} \text{Länge des Rohres in m}$

$\eta \hat{=} \text{dynamische Viskosität der strömenden Flüssigkeit in Pa s}$

$\Delta p \hat{=} \text{die Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende des Rohrs in Pa}$

$\vec{s} \hat{=} \text{Flussrichtung}$

Die Strömstärke: ist gleich der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\text{mittl}}$  multipliziert mit dem Querschnitt des Rohres  $A = \pi r^2$ . Man erkennt an der Formel, dass der Volumenstrom proportional zur Viskosität  $\eta$  und zur Länge  $l$  ist und direkt proportional zur Druckdifferenz  $\Delta p = p_1 - p_2$  an den Rohrenden und zur vierten Potenz des Rohrdurchmessers  $r$ . Im Allgemeinen ist das Hagen-Poiseuille-Gesetz nur eine Näherung, da es nur unter den folgenden idealisierten Bedingungen gilt:

a, stationärer Strom - die Flüssigkeitsteilchen werden nicht beschleunigt, d.h. nur Reibungskräfte treten auf, jedoch keine Trägheitskräfte

b, Randgeschwindigkeit  $v=0$

c, inkompressibles Medium, d.h.  $\rho_F = \text{const}$ ,  $P_{\text{angul}} = \text{const}$

d, konstanter Rohrradius  $r = \text{const}$ .

e, laminare Strömung

f, es wirken keine äußeren Kräfte

Besonders auffällig ist, dass der Innendurchmesser des Rohres mit der vierten Potenz in die Formel eingetragen wird.

Dies kann man sich auch bei der Überlegung zum Wasserstrahl des Gartens verwenden. Je größer der Radius  $r$ , desto deutlich größer ist der Volumenstrom. Bei der Möglichkeit, die Wassermenge durch den Wasserhahn wesentlich zu erhöhen, kann man durch Vergrößerung des Rohrdurchmessers auch den Volumenstrom mit der vierten Potenz erhöhen. Dadurch kann man den großen Gartenteich sehr schnell füllen bzw. unter Wasser bringen. Ein Faktor auf den man jedoch zusätzlich zum Radius achten sollte ist die Länge des Schlauches, da diese Variable ungebremst proportional in die Formel eingetragen wird.

Anwendungsbspiele:

- Medizin: Versengung der menschlichen Kapillare z.B. durch Verkalbung  $\rightarrow$  Durchsatzminderung  $\rightarrow$  Blutdruckabfall

- Wasserversorgung: Änderung des Rohrdurchmessers  
 $\rightarrow$  Beschleunigung des Rohres  $\rightarrow$  Folge: Röhrentrennung durch zu hohen Druck

#### 4. Andere Gesetze mit Parametern mit 4. Potenz

A Das Vierter-Potenz-Gesetz besagt, dass die Beanspruchung einer Stange durch ein Kraftanliegen umso größer ist, je größer die Achslast des betreffenden Fahrzeugs ist. Die Beanspruchung der Stange steigt proportional zur vierten Potenz der Achslast des die Stange befahrenden Fahrzeugs.

B Das Stephan-Boltzmann-Gesetz gibt die emittierte Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers der Fläche  $A$  bei absoluter Temperatur  $T$  an. Die Temperatur fließt mit der vierten Potenz in das Gesetz ein. ( $G$  ist die S-B-Konstante)

$$P = G A T^4$$

C Die Rayleigh-Strömung beschreibt den Wärmeübergangsfaktor  $G$  der Strömung als Grenzfall niedriger Frequenzen im Vergleich zur Eigenfrequenz  $\omega \ll \omega_0$ . ( $G_{\text{th}}$  ist der Thomson-Grenzwärmeübergangsfaktor,  $\omega$  die Frequenz und  $\omega_0$  die Eigenfrequenz)

$$G(\omega) \approx G_{\text{th}} \frac{\omega^4}{\omega^4 + \omega_0^4}$$

#### 5. Unterschied zwischen der dynamischen und der kinematischen Viskosität

Die dynamische Viskosität  $\eta$  ist ein Maß für die Zähligkeit oder Schleifflüssigkeit eines Fluids. Je größer die Viskosität, desto schleifflüssiger/wichtiger fließfähig ist das Fluid. Je niedriger die Viskosität, desto dünnflüssiger/fließfähiger ist es.

SI-Einheiten:  $[\eta] = \text{Pa} \cdot \text{s} = \text{N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$

Einflussfaktoren:

Die dynamische Viskosität  $\eta$  ist abhängig von Stoff und Temperatur und wird in der Dimension  $\text{Paschal Sekunde}$  angegeben. Sie nimmt bei Flüssigkeiten mit steigender Temperatur sehr stark ab, bei Gasen mit steigender Temperatur zu.

Die kinematische Viskosität ( $\nu$ ) bezeichnet den Quotienten aus der dynamischen Viskosität des Mediums und seiner Dichte.

Die St-Einheit ist  $\frac{m^2}{s}$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \text{mit } \nu = \text{kin. Viskosität}, \eta = \text{dyn. Viskosität}, \rho = \text{Dichte des Fluides},$$

der beschreibt durch?

Die kinematische Viskosität ist ein Maß für die innere Reibung der Flüssigkeit. Sie gibt an, wie lange eine bewegte Flüssigkeit braucht, um sich wieder zu beruhigen.<sup>de</sup>

Wichtig bei beiden Viskositäten ist, dass die Viskosität temperatur-abhängig ist. Daraus wird vorer schon erahnt unterschieden werden, ob es sich um eine Flüssigkeit oder ein Gas handelt.

Ein Beispiel für das Temperaturabhängigkeits von Flüssigkeiten ist Öl. kaltes Olivenöl aus dem Kühlschrank ist extrem dick und zähflüssig. Bei Raumtemperatur ist es schon deutlich flüssiger und leichter hinunter in der Pfanne. Erhöht die Viskosität aber von Wasser.

Bei diesem Verhältnis wird die kinematische Viskosität genannt!

## 6. Diskussion von $\nu = D \cdot e^{\frac{T^*}{T}}$ als Funktion von $\frac{1}{T}$

Das Arrhenius-Gesetz gibt die Temperaturabhängigkeit der Viskosität an.

$$\nu = D \cdot e^{\frac{T^*}{T}}$$

$T^*$  ist die Aktivierungsenergie, die nötig ist, um die Wechselwirkung zwischen den Teilchen, die in Form von Reibung erfolgen, aufzuheben.

$T$  ist die absolute Temperatur

$\nu$  ist die Geschwindigkeit, die mit zunehmendem  $T$  sinkt.

Kann man  $T$  gegen Null gehen, so wird unendlich groß.

Gibt  $T$  dagegen gegen sehr  $\infty$ , so nähert sich  $\nu$  asymptotisch an  $D$  an.

Daran kann man erkennen, dass  $D$  ein Maß für die kleinste kinematische Viskosität ist.

$D = \nu_0 (T \rightarrow \infty)$  ist ein Häufigkeitsfaktor.

$D$  und  $T^*$  sind also empirische Konstanten. Deswegen lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen  $\nu$  und  $T$  herstellen:

$$\ln \nu = \ln [D \cdot e^{\frac{T^*}{T}}]$$

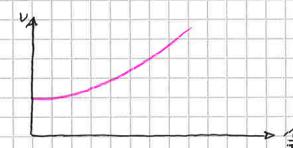
$$\ln \nu = \ln D + T^* \cdot \frac{1}{T}$$

$$\Rightarrow \ln \nu \sim \frac{1}{T}$$



↑ Bestätigung aus Graph!

Kunendokument verbausungs würdig (NST, extreme, ...)



## F. Differenzialgleichung für $h(t)$

$$(Gl. 4) \Delta p = \rho \cdot g \cdot h(t) \quad I$$

$$(Gl. 5) \frac{dh}{dt} = -\frac{1}{\rho g} \frac{dV}{dt} \quad II$$

$$(Gl. 2) \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi r^2 h^4}{8 \rho g} \quad III$$

$$III \text{ in } II: \frac{dh}{dt} \stackrel{!}{=} -\frac{\pi r^2 h^4}{8 \rho g} \quad \textcircled{4}$$

$$II \text{ in } \textcircled{4}: \frac{dh}{dt} \stackrel{!}{=} -\frac{\pi r^2 g h(t)}{8 \rho g} \cdot h^4$$

Trennung der Variablen:

$$\int \frac{1}{h^4} dh = \frac{\pi r^2 g r^4}{8 \rho g A^2} \int dt$$

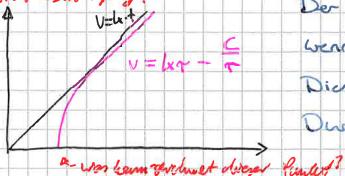
$$\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \frac{\pi r^2 g r^4}{8 \rho g A^2} \approx \quad \text{mit } v = \frac{r^2}{A}$$

$$\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \frac{\pi g r^4}{8 \rho A v} \approx$$

$$v = \frac{\pi g r^4}{8 \rho A^2 \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)} \quad \text{K} \quad \rightarrow v = k \cdot \text{K} \quad k: \text{Apparaturkonstante}$$

## G. Skizze von $v(r)$

↑ Adhäsionbenennung!



Der Einfluss des Kontaktwinkelkoeffizienten  $\frac{c}{r}$

wenn  $-\frac{c}{r}$  gegen 0 geht.

Dies ist der Fall für sehr große Durchmesser  $R$ .

$c$

Für die Auswahl des Umschmelzers gilt deshalb:

je größer der kapillären Durchmesser gewählt wird, desto größer wird die Durchflussszeit  $t$  und desto geringer der Einfluss des Kontaktwinkelkoeffizienten.

## G. Reihenfolge der Mengen

✓

### 3 Auswertung

#### 1. Bestimmung der Konstanten K der Kapillare

Damit die gemessenen Werte eine Aussagekraft bekommen, muss man erst die Konstante K, welche von Gerät zu Gerät unterschiedlich ist wissen. Diese sind normalerweise bekannt - in diesem Fall jedoch leider nicht. Diese konnte man theoretisch über die Geometrie der Kapillare herleiten, was jedoch sehr Fehleranfällig ist.

Leichter ist es eine Flüssigkeit mit bekannter Viskosität zu beobachten und hieraus die Apparatekonstante K zu bestimmen

Hierfür wird folgender Ansatz verwendet:

$$v = K \bar{t} - \frac{E}{E}$$

$$\Rightarrow K = \frac{1}{\bar{t}} (v + \frac{E}{E}) = \frac{v}{\bar{t}} + \frac{E}{\bar{t}^2} \quad (1)$$

Dabei ist die kinematische Viskosität  $v = \frac{\eta}{\rho}$  des abgezweigten Wassers, wie C gegeben.  $\bar{t}$  wurde in Messung 1 gemessen

Mit klassischer statistischer Fehlerrechnung ergeben sich folgende Werte:

0,3mm-Kapillare

Werte siehe Messung 1 - Spalte 0,3mm

$$\text{Mittelwert: } \bar{t} = 186,2680 \text{ s} \quad (\text{Formel: } \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i)$$

$$\text{Varianz: } \sigma^2 = 1,5136 \text{ s}^2 \quad (\text{Formel: } \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2)$$

$$\text{Fehler des Mittelwertes: } s = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}$$

$$\therefore \Rightarrow s_{0,3} = 0,383058 \text{ s}$$

$s_{0,3}$  ist deutlich größer als der ablesefehler und somit nicht zu vernachlässigen

Restfehler der Zeitnahme: Aus Mess: Die Varianz der Reaktionszeit beträgt circa  $0,15 \text{ s}^2$ . Da hier ein anderer Stoppt nehmen wir als Fehler der Zeitnahme einen ein wenig größeren Wert von  $0,2 \text{ s}$  der Ablesefehler vernachlässigbar, da  $s_h \ll \sigma$ .

$$\Rightarrow s_r = 0,2s + 5 \cdot 10^{-4} s \cdot \bar{t}$$

$$s_r = 0,209314 \text{ s}$$

Den Fehler der Durchlaufzeit erhalten wir mit

$$u_T = \sqrt{s_r^2 + s_r^2}$$

$$u_{T,0,3} = 0,4417 \text{ s}$$

Angenommen der Ableseproblematic aufgrund des Meßstabs erscheint nur dieser Wert um ca. 1 Größenordnung zu klein?

$\Rightarrow$  Durchlaufzeit für die Kapillare 0,3m:

$$\bar{t} = (186,2 \pm 0,4) \text{ s}$$

Berechne K mit Gleichung (1) wobei

$$C = 0,12 \text{ mm}^2 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2, \eta_w = 10,019 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \text{ und}$$

$$\rho_w = 0,9982 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} = 998,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ gegeben sind. (Bei } 20^\circ \text{C)}$$

$$K = \frac{v}{\bar{t}^2} + \frac{E}{\bar{t}^2} = \frac{v \eta_w}{\rho_w \bar{t}^2} + \frac{E}{\bar{t}^2} = \frac{1,0019 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}}{998,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 186,2680} + \frac{1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{(186,2680)^2} = 5,83136638 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Fehlerfortpflanzung:

$$u_K = \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial v} u_v\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial \bar{t}} u_{\bar{t}}\right)^2} = \left(\eta_w g \text{ und } C \text{ waren ohne Fehler gegeben und werden deshalb als fehlerfrei angenommen, da die Fehler im Vergleich zu dem Fehler von } \bar{t} \text{ vernachlässigbar sind.}\right)$$

$$= \sqrt{\frac{\partial K}{\partial \bar{t}} u_{\bar{t}}}$$

$$= \left| \left( -\frac{v}{\bar{t}^2} - 2 \frac{E}{\bar{t}^3} \right) u_{\bar{t}} \right| = \left( \frac{v}{\bar{t}^2} + 2 \frac{E}{\bar{t}^3} \right) u_{\bar{t}} = 1,27968 \cdot 10^{-1} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Für die Kapillare 0,3mm erhalten wir somit

$$K_{0,3} = (5,831 \pm 0,012) \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Das Vorgehen bei den Kapillaren mit den anderen Durchmessern ist identisch. Deswegen werden nur die Ergebnisse rotiert.

### 0,4mm - Kapillare

$$\text{Durchlaufzeit: } \bar{\tau} = 96,55\text{s}$$

$$s = 0,27640\text{s}$$

$$s_f = 0,2048275\text{s}$$

$$u_s = 0,3440\text{s}$$

$$\Rightarrow \bar{\tau}_{0,4} = (96,5 \pm 0,3)\text{s}$$

Und die Apparatekonstante ist:

$$K = 1,040859 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$u_K = 3,7113 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$K_{0,4} = (1,0408 \pm 0,3) \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

### 0,5mm - Kapillare

$$\text{Durchlaufzeit: } \bar{\tau} = 24,876\text{s}$$

$$s = 0,08377589\text{s}$$

$$s_f = 0,2012488\text{s}$$

$$u_s = 0,2179896\text{s}$$

$$\Rightarrow \bar{\tau}_{0,5} = (25,0 \pm 0,2)\text{s}$$

Und die Apparatekonstante ist:

$$K = 4,03782154 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$u_K = 3,54107 \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$K_{0,5} = (4,04 \pm 0,04) \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

### 0,6mm - Kapillare

$$\text{Durchlaufzeit: } \bar{\tau} = 12,818\text{s}$$

$$s = 0,05390261\text{s}$$

$$s_f = 0,200640\text{s}$$

$$u_s = 0,2077555\text{s}$$

$$\Rightarrow \bar{\tau} = (12,8 \pm 0,2)\text{s}$$

Apparatekonstante:

$$K = 7,9024884 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$u_K = 1,23284 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$K_{0,6} = (7,90 \pm 0,13) \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Vergleich mit theoretischem Wert aus den Fragen zur Vorbereitung

Aus Frage 7:

$$K = \underbrace{\frac{\pi g}{8C A' \ln(\frac{r_2}{r_1})}}_{\approx c} r^4 = c \cdot r^4 \quad (2)$$

Die Endbeschleunigung  $g$ , die Kapillarlänge  $l$  und deren Querschnitt  $A'$  seien und der Abstand der Messmarken werden als konstant angenommen.

Aus (2) folgt:

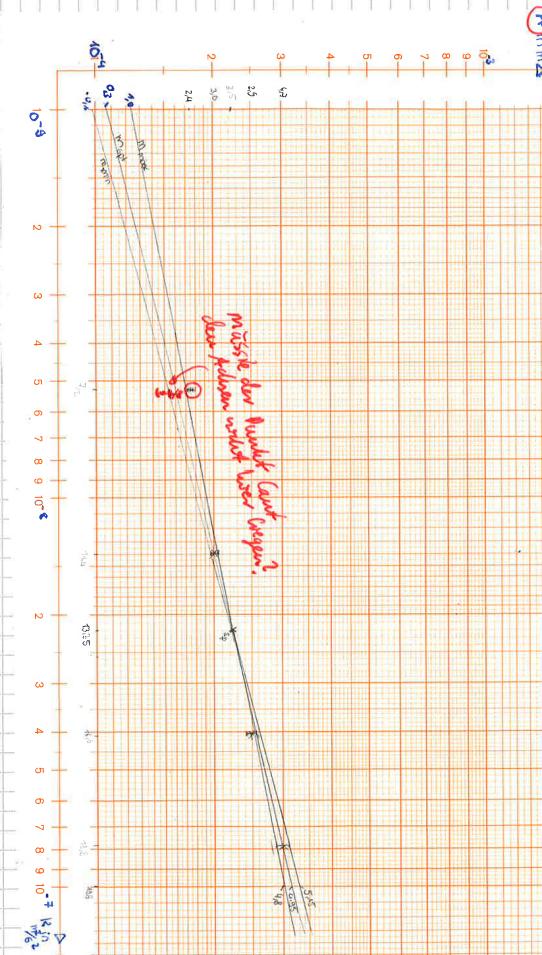
$$\ln K = \ln(c \cdot r^4) = \ln(c) + 4 \ln(r)$$

Es ergibt sich also Logarithmus eine Geradengleichung mit der Steigung 4. Trage nun  $\ln(K)$  gegen  $\ln(r)$  aufgrund der verschiedenen Größenordnungen auf. Die Steigung wird jedoch wieder umgerechnet auf die Steigung  $\ln(K)$  gegen  $\ln(r)$ .

### Wertetabelle für Diagramm 1

Kapillare	$K$ in $(\frac{m}{s}) \cdot 10^3$	$u_k$ in $(\frac{m}{s}) \cdot 10^{-3}$	$r = \frac{d}{2}$ in mm	$u_r = \frac{u_k}{2}$ in mm
0,3mm	5,391	0,012	0,150	0,005
0,4mm	19,408	0,03	0,200	0,005
0,5mm	40,4	0,4	0,250	0,005
0,6mm	79,0	1,3	0,300	0,005

### Diagramm 1:



Für die Ausgleichsgerade ergibt sich folgende Steigung

$$m(\text{optimal}) = \frac{18,8 \text{ cm}}{4,65 \text{ cm}} = 4,2581$$

Die minimale Steigung ist 3

$$m(\min) = \frac{18,8 \text{ cm}}{5,25 \text{ cm}} = 3,7714$$

und die maximale Steigung ist

$$m(\max) = \frac{18,8 \text{ cm}}{3,8 \text{ cm}} = 5,2105$$

Setzte als Unschärfe die größere Abweichung von der Optimalen Geraden

$$\Rightarrow u_g = \max\{|m(\text{opt}) - m(\min)|; |m(\text{opt}) - m(\max)|\} = \underline{\underline{0,9524}}$$

$$\Rightarrow m = 4,2 \pm 0,9$$

Die Unschärfe ist im Vergleich zum Messergebnis sehr groß. Dies ist unter anderem mit einem relativ großen Fehler in dem Durchmesser der Kapillare zu erklären, welcher vor allem bei der 0,3mm Kapillare auffällt. Deswegen sieht man sehr schön, wie die Varianz in der Reaktionszeit bei den kürzeren Messungen, also besonders bei der Kapillare mit 0,3mm, stärker ins Gewicht fällt. Ich schreibe Fehlerballon in K-Wichtung?  
Insgesamt kommt man, trotz der großen Messungenauigkeit dem theoretischen Ergebnis erstaunlich nahe.

$$\left| \frac{m_{\text{exp}} - m_{\text{theor}}}{m_{\text{theor}}} \right| = 6,45\%$$

Die Abweichung von 6,45% ist angesichts der unregelmäßigkeiten und Fällen bei der Produktion der Kapillaren hinnehmbar.

7. Was liegt hier auf?

## 2. Temperaturabhängigkeit der Viskosität

### 2.1 Bestimmung der mittleren Durchfluszeiten $\bar{t}$ mit Fehler

Um die kinematische Viskosität aus Gl. 6

$$V = k \cdot r - \frac{C}{t}$$

zu berechnen, muss zuerst jeweils der Mittelwert und dessen Fehler der gemessenen Durchfluszeiten  $t_i$  für die verschiedenen Temperaturen bestimmt werden.

$T_i$	$t_i$	$G_i$	$S_i$	$\Delta x_{ch}$	$\bar{t}_i \pm \Delta x_{ch}$	$u_{\bar{t}_i}$
25	85,84	0,9571	0,4072	1,9144	[83,826; 87,754]	0,4557
35	68,51	2,3505	0,9596	4,5132	[63,997; 73,022]	0,9812
45	57,83	0,222	0,0907	0,9262	[57,403; 58,256]	0,2240
55	49,81	1,1318	0,4866	2,2883	[47,521; 52,083]	0,5289
65	41,98	0,2608	0,10647	0,5007	[41,423; 42,480]	0,3316
70	39,16	0,7124	0,2308	1,3678	[37,734; 40,527]	0,7413

▷ Fehler für  $\bar{t}$ : Ablesefehler:  $0,055 \rightarrow S_0$

Rostfehler:  $S_p = 0,20482755$  ( $\rightarrow$  siehe S.14)

▷ Mittelwert  $\bar{t} : \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ ; mit  $n=6$

$$\text{▷ Standardabweichung } G \text{ der Einzelmessungen } G = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{▷ Standardabweichung } s \text{ des Mittelwerts } s = \frac{G}{\sqrt{n}}$$

$$\text{▷ Messunsicherheit des Mittelwerts: } u_{\bar{t}} = \left[ (s + (\bar{t}))^2 + S_0^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{▷ Aussondern von Messwerten, das Chauvenetische Kriterium } \frac{\Delta x_{ch}}{G} = 1,92 \text{ für } n=6 \\ \rightarrow \Delta x_{ch} = G \cdot 1,92$$

Die dritte Messung (45,405) bei der Temperatur 65°C fällt deutlich raus. Man sieht dies auch deutlich am Chauvenetischen Kriterium.

Der Wert liegt außerhalb des Intervalls  $\bar{t}_i \pm \Delta x_{ch}$ , wodurch eine Aussondung des Werts ~~gesetzlichlich~~ ~~gesetzlichlich~~ ist.

Die berechneten Werte auf der linken Seite sind ohne den Wert 45,405 berechnet worden, jedoch stimmt die Aussage auch für die Menge der Werte 65° mit allen Messwerten.

$$\bar{t} = 42,4686 \quad G = 1,4398 \quad \Delta x_{ch} = 2,7645 \quad \bar{t}_i \pm \Delta x_{ch} = 39,704; 45,233$$

Weiterhin ist stets  $G_i > S_0 = 0,055$  (Ablesefehler), das heißt die statistische Betrachtung ist sinnvoll

### 2.2 Berechnung der kinematischen Viskosität

$$V = k \cdot r - \frac{C}{t} \quad (\text{Gl. 6})$$

• Mit gegebenen Werten:

$$\text{▷ } k \text{ für Kapillar mit } 0,4 \text{ mm } \varnothing \quad k_{0,4} = (104,08 \pm 0,3) \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} \\ (\rightarrow \text{siehe S.14})$$

$$\text{▷ } C : C = 0,12 \text{ mm}^2 = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 = 0,000000012$$

▷  $t_i$ : gemessene Durchfluszeiten

• Fehlerfortpflanzung:

$$\text{▷ } \bar{t}_i = k \bar{t}_i - \frac{C}{\bar{t}_i} \text{ bei Temperatur } T_i$$

$$\text{▷ } u_{\bar{t}_i} = \left[ \left( \frac{\partial \bar{t}_i}{\partial k} u_k \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{t}_i}{\partial C} u_C \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \left( \bar{t}_i \cdot u_k \right)^2 + \left( k + \frac{C}{\bar{t}_i^2} u_C \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

mit  $u_k$  ( $\rightarrow$  siehe S.14)

$$\cdot u_{\bar{t}_i} = u_k \text{ bei Temperatur } T_i \rightarrow (\text{siehe S.18})$$

$[T_i] = ^\circ C$	$[\frac{1}{T_i}] = K$	$[\bar{V}] = \frac{m^2}{s}$	$[(U_v)_{im}] = \frac{m^2}{s}$	$[\frac{1}{T}] = \frac{1}{K}$	$[U_f] = K$	$[U_{\frac{1}{T}}] = \frac{1}{K}$
25	298,15	$8,9202 \cdot 10^{-3}$	$5,7137 \cdot 10^{-3}$	$3,3540 \cdot 10^{-3}$	1,895	$0,0213 \cdot 10^{-3}$
35	308,15	$7,1130 \cdot 10^{-3}$	$4,0548 \cdot 10^{-3}$	$3,2452 \cdot 10^{-3}$	1,925	$0,0203 \cdot 10^{-3}$
45	318,15	$5,9382 \cdot 10^{-3}$	$3,1748 \cdot 10^{-3}$	$3,1432 \cdot 10^{-3}$	1,955	$0,0193 \cdot 10^{-3}$
55	328,15	$5,1601 \cdot 10^{-3}$	$5,8222 \cdot 10^{-3}$	$3,0474 \cdot 10^{-3}$	1,985	$0,0186 \cdot 10^{-3}$
65	338,15	$4,3407 \cdot 10^{-3}$	$3,8073 \cdot 10^{-3}$	$2,9573 \cdot 10^{-3}$	2,015	$0,0176 \cdot 10^{-3}$
70	343,15	$4,0451 \cdot 10^{-3}$	$7,9082 \cdot 10^{-3}$	$2,9142 \cdot 10^{-3}$	2,030	$0,0172 \cdot 10^{-3}$

Für die Werte der absoluten Temperaturen muss die Celsius-Temperatur-Skala um  $-273,15^\circ C$  zum absoluten Nullpunkt verschoben werden

$$\tilde{T}_i = (T_i + 273,15^\circ C) \frac{K}{^\circ C}$$

$$\frac{1}{\tilde{T}_i} = \frac{1}{(T_i + 273,15^\circ C)} \frac{K}{^\circ C}$$

$$U_{\frac{1}{T}} = \sqrt{s_a^2 + s_r^2} \quad (\text{d}f: s_a = 0,1^\circ C \quad s_r = (0,002T + 14) = (0,37 \cdot T + 14))$$

$$U_{\frac{1}{T}} = \frac{U_f}{(\frac{1}{T_i + 273,15^\circ C})^2} = \frac{U_f}{\tilde{T}_i^2}$$

$$\begin{aligned} V_{25} &= (8,92 \pm 0,06) \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s} \\ V_{35} &= (7,11 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s} \\ V_{45} &= (6,00 \pm 0,03) \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s} \\ V_{55} &= (5,16 \pm 0,06) \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s} \\ V_{65} &= (4,34 \pm 0,04) \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s} \\ V_{70} &= (4,05 \pm 0,08) \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{25}} &= (3,35 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \\ \frac{1}{T_{35}} &= (3,25 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \\ \frac{1}{T_{45}} &= (3,14 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \\ \frac{1}{T_{55}} &= (3,05 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \\ \frac{1}{T_{65}} &= (2,96 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \\ \frac{1}{T_{70}} &= (2,91 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \end{aligned}$$

Man erkennt, dass die Viskosität mit steigender Temperatur abnimmt. Das stützt die These aus dem Skript Vis-2, dass für viele Flüssigkeiten näherungsweise das Arrhenius-Gesetz  $V = D \cdot e^{\frac{T}{T_0}}$  gilt. Mit dieser Formel werden wir uns nun beschäftigen

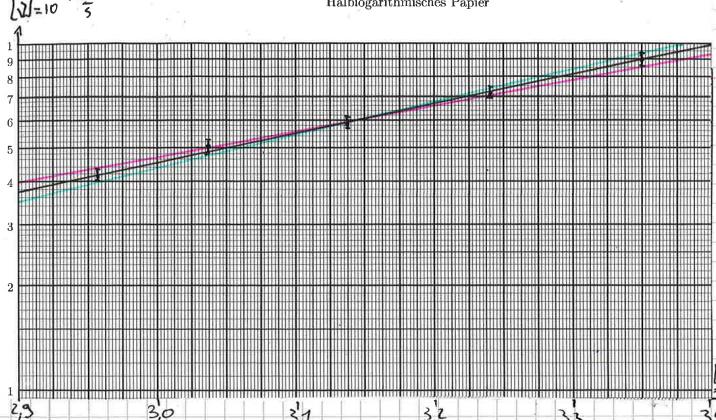
### 2.3 Zeichnung des Graphen $v(\frac{1}{T})$ auf halblogarithmisches Papier

$$(A13): V = D \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \Leftrightarrow \ln V = \ln D + \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

Mehr Auftragen der Messwerte auf halblogarithmisches Papier sollte sich eine Gerade mit der Steigung  $\frac{E}{R}$  ergeben.

Dies kann man sehr gut an den folgenden Diagramm erkennen.

Halblogarithmisches Papier



Bei dieser Abbildung sieht man gut die Linearität von  $\frac{1}{T}$  bzw. deren lineare Abhängigkeit. Der Fehler von  $\frac{1}{T}$  ist ein klein, man vernachlässigt ihn in den folgenden (nicht exakt dargestellten) Rechnungen.

Um die Steigung  $T^*$  aus dem Diagramm zu erhalten nutzen wir die Formel:

$$T^* = \frac{\Delta \ln V}{\Delta \frac{1}{T}} = \frac{\ln(\frac{V_E}{V_A})}{\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_A}}$$

mit den Punkten am Rand des Graphen  $P_A(\frac{1}{T_A}; V_A); P_E(\frac{1}{T_E}; V_E) = P_E$ .

$$P_{\text{mittel}} = (2,5 \cdot 10^{-3} | 3,5 \cdot 10^{-3}) \quad P_{\text{2. Mittel}} = (3,4 \cdot 10^{-3} | 10 \cdot 10^{-3}) \Rightarrow T^*_{\text{mittel}} = 1883,22 K$$

$$P_{\text{1. Mittel}} = (2,3 \cdot 10^{-3} | 3,2 \cdot 10^{-3}) \quad P_{\text{2. Mittel}} = (3,7 \cdot 10^{-3} | 10 \cdot 10^{-3}) \Rightarrow T^*_{\text{mittel}} = 2053,16 K$$

$$P_{\text{min}} = (2,3 \cdot 10^{-3} | 4 \cdot 10^{-3}) \quad P_{\text{2. min}} = (3,4 \cdot 10^{-3} | 9,5 \cdot 10^{-3}) \Rightarrow T^*_{\text{min}} = 1729,99 K$$

Der Fehler  $U_{T^*}$  ist die maximale Differenz zwischen den Temperaturwerten:

$$U_{T^*} = \max \{ |T_{\text{min}} - T_{\text{mittel}}|, |T_{\text{mehr}} - T_{\text{mittel}}| \} = \max \{ 153,23 |, 209,93 \} = 209,93$$

## 2.4 Lineare Regression - Bestimmung von $T^*$ → siehe Nachtrag

## 2.5 Graphische Darstellung der Durchlaufzeit und der Zeit der Temperaturänderung vergangener Zeit

Zwischen den Messungen bei der durchgängigen Messung der Temperaturänderung von  $45^\circ\text{C}$  bis  $55^\circ\text{C}$  sind jeweils 1 Minute vergangen.

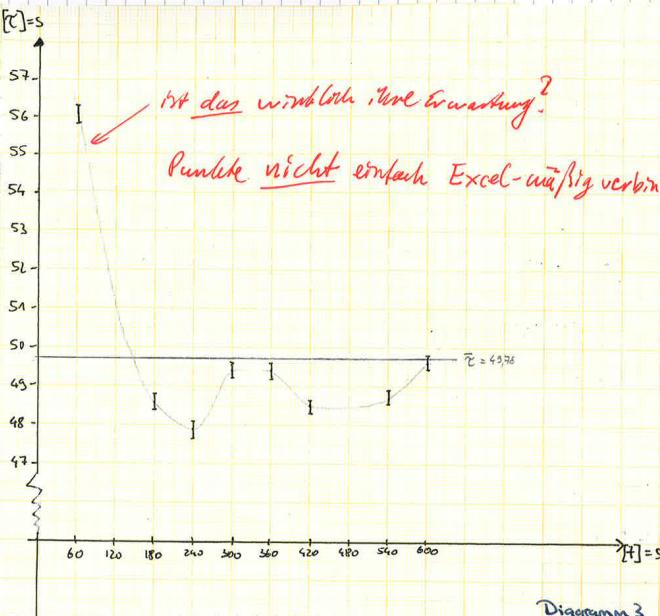
$$\text{Vergangene Zeit } \xrightarrow{T=1\text{ min}} \text{Durchlaufzeit } [s] = s \quad u_s = [(0,05)^2 + (0,2 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot t)^2]^{\frac{1}{2}} \quad [u_s] = s$$

60	56,11	0,2335
120	/	/
180	48,59	0,2298
240	47,91	0,2295
300	49,41	0,2302
360	49,41	0,2302
420	48,48	0,2297
480	/	/
540	48,74	0,2299
600	49,61	0,2303

→ bei 120s und 480 wurde die Durchlaufzeit nicht gemessen

Abgesehen von punktuellen Messungen wird nun auch gemessen, wie sich die Viskosität während des Erhitzens ändert. Als Temperaturdifferenz wird die Änderung zwischen  $45^\circ$  und  $55^\circ$  gewählt.

Zu Fazit ist ein "Eindenden" der Temperatur um den Faktor von  $55^\circ\text{C}$ , da das Thermoelement mit Überprüfung und Reaktion reagiert. Dieser Vorgang von Anheizen und Abkühlen nach ungewolltem Überheizen besitzt ~~die~~ den Graph, bei dem man das "Eindenden" sehr gut erkennen kann. (siehe S. 24) Dieser Vorgang muss abgezweigt werden, bevor man die punktuellen Messungen wie in den vorliegenden Kapiteln gemacht machen kann. Dafür sind die 10 Minuten Wartezeit berechtigt.



Ihre Rechen Schwerpunkten (~~Rechtfertigung~~ laut Horst  
Unschärfebereichsschätzung) bis zu letzte ergriffen.  
Sollte man dennoch weiter warten als 10 min  
warten?

(Wie können Sie überhaupt die genutzte Fehlerbalken  
Signifikanzentfernung erläutern?)

Sorry, schaut auf der Seite vorher...

Nachtrag zu 2.4.

$y = T^* \cdot x + \ln(D)$   $T^*$  ist die Grundsteigung  $x_i = \frac{1}{T_i}$   $y_i = \ln(v_i)$

Nach Skript S.F.-19:

$$D = n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2$$

$$a = T^* = \frac{1}{D} (n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i)$$

$$\Rightarrow D = 8,5435 \cdot 10^{-7} \frac{1}{K}$$

$$\Rightarrow a = T^* = 1 + 0,421437 K$$

Nun wird der Faktor von  $T^*$  berechnet:

$$U_{T^*} = b \cdot \sqrt{\frac{1}{D}} = \sqrt{\frac{1}{8,5435 \cdot 10^{-7}}} (\sum y_i^2 - a \sum x_i y_i - b \sum x_i^2) \cdot \sqrt{\frac{1}{D}}$$

$$= 121,14746 \text{ k}$$

$$T^* = (1746 \pm 121,1) K$$

Bei dieser Berechnung von  $T^*$  wird vorausgesetzt, dass der Fehler  $u_i$  für alle  $y_i$  gleich ist und nur die  $y$ -Werte fehlerbehaftet sind. \*

$$V := \frac{u_{T^*}}{0,5481 u} = \frac{T^*}{0,5481 \cdot 121,14746} \quad \text{mit } u_{T^*} = 1,58 \cdot 10^{-23} \frac{1}{K} \quad T_0 = 293,154 \text{ (Raumtemp)}$$

$$= 11,918$$

$$u_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial T^*} \cdot u_{T^*}\right)^2} = \frac{1}{0,5481} \cdot 121,14746 = 9,8259$$

$$\Rightarrow V = (12,4 \pm 0,8)$$

† Diskussion des Verhältnisses  $V$ !

\* Die auf diese Weise bestimmte Gerade geht immer durch den Schwerpunkt der Messwerte.

Da die Vorgehensweise der Berechnung von  $T^*$  auf der vorliegenden Seite oft zu massiv überschätzten Unsicherheiten kommt, wird nun die gewichtete Mittelwertberechnung und deren Lineare Regression genutzt um  $T^*$  zu bestimmen.

$$\ln(\gamma) = T^* \cdot \frac{1}{T} + \ln D$$

$$\gamma = T^* \cdot x + \ln D$$

Annahme:  $\gamma$  fehlerbehaftet,  $x$  fehlerfrei, da Fehler von  $\frac{1}{T}$  vernachlässigt werden kann.

$$u_i = \sqrt{\left( \frac{\partial \gamma_i}{\partial x_i} \cdot u_x \right)^2} = \frac{u_{x_i}}{v_i}$$

$$D = \sum \frac{x_i^2}{s_i^2} - \sum \frac{1}{s_i^2} - \left( \sum \frac{x_i}{s_i^2} \right)^2 = 154,49514$$

$$a = T^* = \frac{1}{D} \left( \sum \frac{x_i s_i}{s_i^2} \sum \frac{1}{s_i^2} - \sum \frac{x_i}{s_i^2} \sum \frac{s_i}{s_i^2} \right) = 1774,3084$$

$$u_a = u_{T^*} = \sqrt{\frac{1}{D} \sum \frac{1}{u_i^2}} = 24,057562$$

$$\Rightarrow T^* = (1774 \pm 24) K$$

$$V := \frac{k_B T^*}{k_B 0,576} = \frac{T^*}{0,576} = 12,1$$

$$u_V = \sqrt{\left( \frac{\partial V}{\partial T^*} \cdot u_{T^*} \right)^2} = \frac{1}{0,576} \cdot u_a = 0,164$$

$$\Rightarrow V = (12,1 \pm 0,2)$$

Der Fehler von  $T^*$  auf der vorliegenden Seite ist extrem groß. Man sieht, dass es zu immensen Unsicherheiten kommt, wenn man die Unterschiedlichkeiten der Fehler von  $\gamma$  ausreicht lässt. Dafür sollte man bei verschiedenen Beobachtungen die zweite Unikate vornehmen.

**Nemo:** Sie sehen hier, dass die von Ihnen angenommenen Unsicherheiten (insbesondere der Fettierung) zu klein sind, um die beobachtete Streuung Ihrer Messwerte zu akzeptieren.

## 4. Fazit

Nachdem die Durchflächenzeiten für vier verschiedene Kapillaren (0,3mm, 0,5mm, 0,5mm und 0,6mm) im Viskosimeter nach Ostwald anhand von einer Temperatur ( $20^\circ C$ ) im Wasserbad gemessen wurden konnte die Apparaturkonstante  $k$  für die jeweilige Kapillare bestimmt werden.

Dabei haben wir bestätigt, dass die Konstante  $k$  tatsächlich wie in den Fragen zur Vorbereitung bereits erwartet, direkt proportional zum vierten Potenz des Kapillarradius ist.

Zusätzlich haben wir die Durchflächenzeiten bei konstanter Kapillare gemessen und eine Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität bei Berechnung eben dieser berechnet. Die Viskosität nimmt exponentiell ab, wenn die Temperatur steigt.  $\nu \propto e^{-T}$ ...

Interessant lieber: wäre auch, wenn man als Vorgehens das Verhältnis der Viskosität bei Gross untersucht würde, da wobei die Viskosität bei steigender Temperatur zunimmt.

Zusätzlich zu den beiden obengenannten Punkten haben wir überprüft, ob die bestimmte Zeit nach jeder Konfiguration des Viskosimeters gerechtfertigt ist. Dies erwies sich als sinnvoll, da sich die Flüssigkeit entweder an die erhöhte bzw. niedrige Temperatur anpassen muss.

$\Rightarrow$  Entweder sollte darüber nachgedacht werden, ob das Arrhenius-Gesetz zu verwenden ist, oder die Viskositätsabsättigung kritisch hinterfragt werden (vgl. physikalisch-thölle Problematik!)

# Versuch Vis

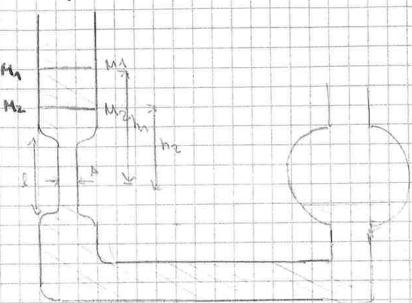
Datum: 6.8.2020

Platz: Fensterplatte Raum 2202.632

Teilnehmer: Charlotte Feiger, Manuela Lippert, Leonhard Scherf

Ther

## Versuchsaufbau



M<sub>1/2</sub> : Messmarke 1/2

## Versuchsdurchführung:

- Spülle das Viskosimeter mithilfe der Wasserstrahlpumpe: 1 mit Ethanol, dann mit VE Wasser
- 3 cm<sup>3</sup> Flüssigkeit anfüllen
- luftdicht verschlossenes Viskosimeter ins Wasserbad geben  
→ Wasser auf gewünschte Temperatur bringen
- Mit gummiball Flüssigkeit über die erste Messmarke bringen  
→ Durchlaufzeit stoppen mind. 6s

Obiges wird für alle Teilstücke des Versuches genutzt

## Kalibrierung des Viskosimeters

Messende Person: Manuela Charlotte  
pumpe

• Wasserbad auf 20°C einstellen

⇒ Durchlaufzeit für verschiedene Kapillaren messen (mind. 6 Mat)

Dicke in mm	0,3	0,4	0,5	0,6
Zeit in s	129,63; 10,04	137,61	25,02	12,90
z	129,63; 0,90			
↑ ↓	1: 36,41	24,74	12,37	
min	3: 05,81	1: 37,82	24,92	12,89
s				
	3: 03,81	1: 36,90	24,68	12,83
	3: 07,69	1: 35,77	24,83	13,00
	3: 06,22	1: 36,49	26,84 <small>mitte auf</small>	12,81
	3: 06,60	1: 35,37	24,89	13,02
	3: 08,15	1: 35,59	25,63	12,73
	3: 05,06	1: 35,85	25,04	12,81
	3: 06,03	1: 37,55	25,22	12,72
				14,77

## Temperaturabhängigkeit der Viskosität

Verschiedene Kapillare mit 0,4 mm bei folgenden Temperaturen

[T] = °C	25	35	45	55	65	70
Zeit in Sekund	1:24,48	1:08,23	58,11	49,61	42,11	39,81
Vor dem : in Min	1:26,12	1:08,98	57,53	51,83	49,73	38,93
	1:24,77	1:11,02	57,60	50,38	41,65	32,84
	1:26,64	1:03,88	57,86	54,915	41,93	33,85
	1:26,83	1:04,18	57,80	49,01	45,40	33,81
	1:26,00	1:03,06	57,89	48,47	42,34	34,73
					42,12	39,91
						39,63

großer Fehler  
Gleichholzen  
zw. M<sub>1</sub> und  
M<sub>2</sub>

## Meinungsunterschiede:

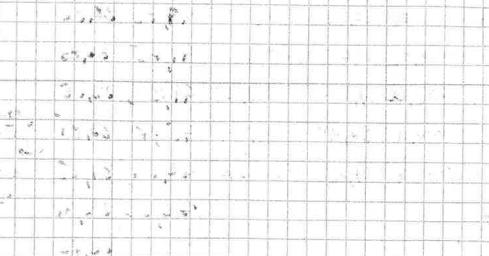
- Radius der Kapillare → Fehler  $\pm$
- Adhäsionsengangigkeit → Membran durch Flüssigkeit schwer entfernen
- Höhenunterschied → Ungezähmt durch 1. Ungerades Kapillare 2. Stablaufschub
- Variation der Realisationszeit  $\rightarrow$  Werte?

Durchwegmessung bei Temperaturänderung

Messen 25°C → 28°C → 30°C → 35°C → 45°C → 55°C

Zeit	Temperatur in °C	Durchlaufzeit in Sekunden
16:05	28,8	1:20,21
16:06	47,1	56,11
16:07	51,7	
16:08	55,2	48,59
16:09	55,0	47,91
16:10	54,59	49,41
16:11	54,1	48,41
16:12	55,8	48,48
16:13	55,0	
16:14	55,2	55,2
	48,74	48,74
	55,01	49,61

Die Temperatur wird von dem Messgerät im Zylinder abgelesen.



Messen von m/h mit dem Stahlkineal. Messung schwierig

10dm und 12,00 cm für Kapillare 0,6 mm

10,0cm und 12,0cm für Kapillare mit 0,5mm

10, cm 12, cm " für 0,3 mm

9,5cm 11,5cm für 0,4 mm

### Messunsicherheit:

Stopfrühr: 0,015 Ablesefehler: 0,01

Metallkineal:

Kapillardurchmesser:  $d = \sqrt{0,01} \text{ mm}$

Thermometer: Ablesefehler:  $0,015^\circ\text{C}$

Fehler: nicht genaues Ablesen und Variation

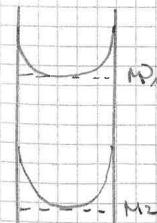
Gerätznummer:

Thermometer: 72989 - Inventarnummer

Thermostat: 58118/N:061108046

Rohr 2302

Gemessen wird so:



Es wird immer deutlich über die  
Messung M1 gedrückt, damit sich das  
Geschwindigkeitsprofil entstellt.

Messunsicherheit Thermometer

-200°C bis +200°C  $\pm (0,3\% + 1\text{K})$  0,1°C

Messbereich  
Genauigkeit  
Anwendung