Lösungen Experimentalphysik – SS02

<u>Lösung zu Aufgabe 1 (FZ, MB, VU/VT):</u>

a) Für die Bremszeit t_B gilt bei konstantem $\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{0-\omega_o}{t_B}$

mit der Anfangswinkelgeschwindigkeit $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot n = 100 \cdot \pi \cdot rad \cdot s^{-2}$

$$t_B = \frac{100 \cdot \pi \cdot rad \cdot s^{-1}}{80 \cdot \pi \cdot rad \cdot s^{-2}} = 1{,}25\ s$$

Den Drehwinkel nach 0,5 s erhält man über

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_o \cdot t + \frac{1}{2}\alpha \cdot t^2$$

$$\varphi(t = 0{,}5\,s) = 0 + 100 \cdot \pi \cdot 0{,}5 - \frac{1}{2} \cdot 80 \cdot \pi \cdot 0{,}5^2 = 40 \cdot \pi \cdot rad$$

dies entspricht 20 Umdrehungen.

b) Gleichsetzen von $|a_{zp}|$ und $|a_t|$ liefert:

$$\omega_1^2 \cdot r = r \cdot \alpha$$

$$\omega_1 = \sqrt{\alpha} = \sqrt{80 \cdot \pi} = 15{,}85\ rad \cdot s^{-1}$$

weiter gilt $\omega_1 = \omega_0 + \alpha \cdot t_1$

$$15{,}85 = 100 \cdot \pi - 80 \cdot \pi \cdot t_1$$

$$t_1 = 1{,}187\,s$$

c) Für die mittlere Leistung $\overline{P}$ gilt $\overline{P} = M \cdot \frac{\omega_0}{2}$

Daraus folgt für das Bremsmoment $M = \frac{2 \cdot \overline{P}}{\omega_0} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^4}{100 \cdot \pi} = 318{,}3\ N \cdot m$

d) Aus $M = J \cdot \alpha$ erhält man das Massenträgheitsmoment J

$$J = \frac{M}{\alpha} = 1{,}267\ kg \cdot m^2$$

und damit der Drehimpuls L nach halber Bremszeit

$$L = J \cdot \frac{\omega_0}{2} = 198{,}9\ kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$$

Lösungen Experimentalphysik – SS02

Lösung zu Aufgabe 2 (FZ, MB, VU/VT):

a) Der Gesamtimpuls des Systems von Wagen (Masse M) und Mann (Masse m) in horizontaler Richtung ist wegen der vernachlässigten Rollreibung des Wagens zeitlich konstant und es gilt daher

$$mv_0 = (m+M)V$$

$$V = \frac{mv_0}{(m+M)} = \frac{80\text{kg}}{180\text{kg}} \cdot \frac{6\text{m}}{\text{s}} = 2\frac{2}{3}\frac{\text{m}}{\text{s}} = 2{,}667\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) Auf Grund der Gleitreibung zwischen den Schuhsohlen des Mannes und der Wagenfläche wirkt auf den Mann die (in Richtung von $-\vec{v}_0$ zeigende) Reibungskraft $F_R = -\mu mg$, welche den Mann von der anfänglichen Geschwindigkeit v_0 auf die kleinere Geschwindigkeit V abbremst. Die Gegenkraft $F_W = -F_R = \mu mg$ beschleunigt den anfänglich stehenden Wagen auf die Geschwindigkeit V. Es gilt daher

$$a_M = \frac{+F_R}{m} = -\frac{\mu mg}{m} = -\mu g$$

$$a_M = -0{,}3 \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = -2{,}943\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_W = \frac{-F_R}{M} = \mu \cdot \frac{m}{M} \cdot g = 0{,}3 \cdot \frac{80}{100} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2{,}354\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

c) Für $a_M = \text{const.}$ gilt:

$$V = a_M t + v_0 \qquad \Rightarrow \qquad t = \frac{V - v_0}{a_M} = \frac{V - v_0}{-\mu g} = \frac{v_0 - V}{\mu g}$$

$$t = \frac{6\text{ms}^{-1} - 2{,}667\text{ms}^{-1}}{0{,}3 \cdot 9{,}81\text{ms}^{-2}} = 1{,}133\text{s}$$

oder: $$t = \frac{v_0 - \dfrac{mv_0}{m+M}}{\mu g} = \frac{v_0 M}{(m+M)\mu g} = 1{,}133\text{s}$$

d) Für $a_W = \text{const.}$ gilt

$$S_W = \frac{a_W}{2}t^2 \qquad \Rightarrow \qquad S_W = \frac{2{,}354\text{ms}^{-2}}{2} \cdot (1{,}133\text{s})^2 = 1{,}511\,\text{m}$$

e) Wenn der Wagen zum Stehen kommt, muss wegen der Gültigkeit des Impulserhaltungssatzes der Gesamtimpuls mv_0 des Systems von Mann und Wagen vom Mann allein übernommen werden. Daher muss der Mann von dem sich mit der Geschwindigkeit V bewegenden Wagen nach vorne in Richtung $\vec{V} \uparrow\uparrow \vec{v}_0$ mit der Geschwindigkeit $v_M = v_0$ relativ zum Gleis abspringen. Die dabei auf den Wagen wirkende Rückstoßkraft bringt den Wagen zum Stehen:

$$v_M \cdot m = v_0 m \Rightarrow v_M = v_0$$

Lösungen Experimentalphysik – SS02

Lösung zu Aufgabe 3 (FZ, MB, VU/VT):

a) Aus der Bewegungsgleichung $\varphi(t) = \varphi_m \, e^{-\delta t} \cos(\omega_d \, t + \phi)$ erhält man

$$\frac{\varphi(0)}{\varphi(5\,T_d)} = \frac{\varphi_m \cos\phi}{\varphi_m \, e^{-\delta\,(5\,T_d)} \cos\phi} = \frac{2}{1} = 2 \text{ bzw. } \delta = \frac{\ln(2)}{5\,T_d}.$$

Mit der Näherung $T_0 \approx T_d$ für schwache Dämpfung und

$$T_0 = 2\pi\sqrt{d_1/g} = 2\pi\sqrt{(2\,\mathrm{m})/(9.81\,\mathrm{m/s^2})} = 2.84\ \mathrm{s} \text{ folgt } \delta = \frac{\ln(2)}{5\,(2.84\ \mathrm{s})} = 0.0489\ 1/\mathrm{s}.$$

Der Dämpfungsgrad D ist dann $D = \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{\delta}{2\pi} T_0 = \frac{(0.0489\ 1/\mathrm{s})}{2\pi}(2.84\ \mathrm{s}) = 0.0221$ was die Annahme $D < 0.1$ bestätigt.

b) Zum Zeitpunkt t = 0 besitzt das System nur potentielle Energie. Mit der Definition $E_{pot}(\varphi = 0) = 0$ folgt

$$E_{pot}(\varphi = \varphi(0)) = m\,g\,d_1\,[1 - \cos\varphi_0] = (25\ \mathrm{kg})(9.81\ \mathrm{m/s^2})(2\ \mathrm{m})[1 - \cos 10°] = 7.45\ \mathrm{J}.$$

Am Ende der ersten Schwingungsperiode beträgt der Winkel dann

$$\varphi(T_d) = \varphi(0)\,e^{-\delta T_d} = (10°)\,e^{-(0.0489\ 1/\mathrm{s})(2.84\ \mathrm{s})} = 8.71\,°.$$

Somit ergibt sich ein Energieverlust von

$$\Delta E = E_{pot}(\varphi = \varphi_0) - E_{pot}(\varphi = \varphi(T_d)) = 7.45\ \mathrm{J} - 5.65\ \mathrm{J} = 1.80\ \mathrm{J}$$

und der prozentuale Energieverlust ist dann $\Delta E/E_{pot,0}$ = (1.80 J)/(7.45 J) = 24.2 %.

c) Da im Tiefpunkt der Schaukel die Wirkungslinie der Gewichtskraft durch den Drehpunkt geht (d.h. es gibt kein äußeres Drehmoment) gilt für die kurze Zeitspanne des Aufrichtens der Drehimpulserhaltungssatz $L_1 = L_2$, bzw. $J_1\,\omega_1 = J_2\,\omega_2$. Ohne Reibungsverluste berechnet sich die Winkelgeschwindigkeit ω_1 aus dem Energieerhaltungssatz $\frac{1}{2} J_1\,\omega_1^2 = E_{pot,0}$. Somit erhält man

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{2\,E_{pot,0}}{J_1}} = \sqrt{\frac{2\,E_{pot,0}}{m\,d_1^2}} = \sqrt{\frac{2\,(7.45\ \mathrm{J})}{(25\ \mathrm{kg})(2\ \mathrm{m})^2}} = 0.386\ \mathrm{rad/s},$$

und

$$\omega_2 = \frac{J_1}{J_2}\omega_1 = \frac{m\,d_1^2}{m\,d_2^2}\omega_1 = \frac{(2.0\ \mathrm{m})^2}{(1.6\ \mathrm{m})^2}(0.386\ \mathrm{rad/s}) = 0.603\ \mathrm{rad/s}.$$

Da nun $E_{kin,2} = \frac{1}{2} J_2\,\omega_2^2$ = 11.6 J um ΔE = 4.15 J größer ist als $E_{kin,1}$ ergibt sich wiederum aus dem Energieerhaltungssatz $E_{kin,2} = m\,g\,d_2\,(1 - \cos\varphi_E)$ der maximale Steigwinkel nach dem Aufrichten

zu $\varphi_E = \arccos\left(1 - \frac{E_{kin,2}}{m\,g\,d_2}\right) = \arccos\left(1 - \frac{11.6\ \mathrm{J}}{(25\ \mathrm{kg})(9.81\ \mathrm{m/s^2})(1.6\ \mathrm{m})^2}\right) = 14.0°.$

Lösungen Experimentalphysik – SS02

Lösung zu Aufgabe 4 (FZ):

a) Aus den Messwerten errechnet man für den Mittelwert der Beschleunigungszeit $\bar{t} = 2{,}333\ \text{s}$, die Standardabweichung $s = 0{,}0130\,\text{s}$ und den mittleren Fehler des Mittelwertes $\Delta\bar{t} = 0{,}00533\ \text{s}$.

Das Ergebnis lautet damit sinnvoll gerundet: $\bar{t} = (2{,}333 + 0{,}005)\,\text{s}$.

b) Die kinematisch ermittelte Beschleunigung hat den Wert: $a_1 = \frac{2s}{t^2} = 0{,}255\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Bei der Gleichung für die Beschleunigung handelt es sich um ein reines Potenzgesetz.

Für N = 6 kann der Größtfehler abgeschätzt werden, mit $\Delta s = 0{,}1\ \text{cm}$ sowie $\Delta\bar{t} = 0{,}00533\ \text{s}$ erhält man

$$\frac{\Delta a_1}{a_1} = \left|\frac{\Delta s}{s}\right| + 2\left|\frac{\Delta\bar{t}}{\bar{t}}\right| = \left|\frac{0{,}1\,\text{cm}}{99{,}7\,\text{cm}}\right| + 2\cdot\left|\frac{0{,}00533\ \text{s}}{2{,}333\ \text{s}}\right| = 0{,}00557$$

damit wird $\Delta a_1 = (5{,}57\cdot 10^{-3})\cdot a_1 = (5{,}57\cdot 10^{-3})\,(0{,}255\ \text{m/s}^2) = 0.00142\ \text{m/s}^2$.

Ein sinnvoll gerundetes Ergebnis lautet somit $a_1 = (0{,}255\ \pm\ 0{,}001)\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

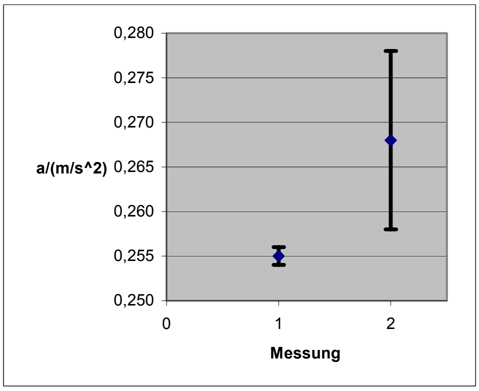
c) Die Beschleunigung kann auch berechnet werden als: $a_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}\cdot g$.

Mit $g = 9{,}806\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ erhält man daraus $a_2 = 0{,}268\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Der Größtfehler lautet $\frac{\Delta a_2}{a_2} = \left|\frac{\Delta m_2}{m_2}\right| + \left|\frac{\Delta(m_1 + m_2)}{(m_1 + m_2)}\right|$. Mit $\Delta(m_1 + m_2) = \Delta m_1 + \Delta m_2 = 0{,}2\ \text{g}$

wird $\Delta a_2 = \left(\left|\frac{\Delta m_2}{m_2}\right| + \left|\frac{\Delta(m_1 + m_2)}{(m_1 + m_2)}\right|\right)\cdot a_2 = \left(\frac{0{,}1\,\text{g}}{2{,}8\ \text{g}} + \frac{0{,}2\ \text{g}}{102{,}5\ \text{g}}\right)\cdot 0{,}268\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und

$\Delta a_2 = (0{,}0357 + 0{,}00195)\cdot 0{,}268\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0{,}01\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$



Damit lautet das gerundete Ergebnis $a_2 = (0{,}27\ \pm\ 0{,}01)\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

c) Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass sich die Fehlerbalken zunächst nicht überlappen. Da der wahre Wert aber nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb des einfachen Intervalls liegt und sich die Fehlerbalken bei einer Verdoppelung überschneiden, liefern beide Messmethoden im Rahmen der Statistik immer noch das gleiche Ergebnis.

Zur Beurteilung der Genauigkeit wird der relative Fehler $\frac{\Delta a}{a}\cdot 100\%$ ausgerechnet. Nach

Messmethode 1 ist $a_1 = 0{,}255\,(1\pm\ 0{,}4\%)\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und nach Methode 2 ist $a_2 = 0{,}27\,(1\pm\ 4\%)\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Die Messung 1 liefert mit den gleichen Eingangsmesswerten eine höhere Genauigkeit für die Beschleunigung als die Messung 2. Daher ist die Messmethode 1 nach Teilaufgabe a die bessere.

Lösungen Experimentalphysik – SS02

Lösung zu Aufgabe 5 (Wellenlehre):

a) Über die bekannte Schallintensität I_H

$I_H = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \hat{y}^2 \cdot \omega^2 \cdot c$ und Frequenz f = 1 kHz erhält man bei gegebener Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c die Amplitude $\hat{y}$, Kreisfrequenz ω und Wellenzahl k:

$$\hat{y} = 1{,}09 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m},\ \omega = 2000 \cdot \pi \cdot \mathrm{rad} \cdot \mathrm{s}^{-1},\ k = 20{,}9\ \mathrm{m}^{-1}$$

damit gilt für die Wellenfunktion:

$$y(x,t) = 1{,}09 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m} \cdot \cos(2000 \cdot \pi \cdot \mathrm{s}^{-1} \cdot t - 20{,}9\ \mathrm{m}^{-1} \cdot x)$$

b) Da das Intensitätsverhältnis

$\frac{I_H}{I_s} = \frac{10^{-12}}{10^0}$ ist, ergibt sich für das Amplitudenverhältnis $\frac{y_H}{y_s} = 10^{-6}$

c) Entsprechend dem Dopplereffekt für einen bewegten Sender ist die vom Empfänger gemessene Frequenz f_E

$$f_2 = f_E = f_S \cdot \frac{1}{1 + \frac{v_S}{c}} = 10^3\,\mathrm{Hz} \cdot \frac{1}{1 + \frac{20\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}}{330\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}}} = 943\,\mathrm{Hz}$$

d) Bei einer punktförmigen Quelle nimmt I quadratisch mit dem Abstand ab:

$$I_2 = I_1 \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

der gemessene Intensitätspegel $L_1 = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_H} = 120\,\mathrm{dB}$ im Abstand d_1 = 2 m entspricht einer Intensität I_1 = 1 $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$.

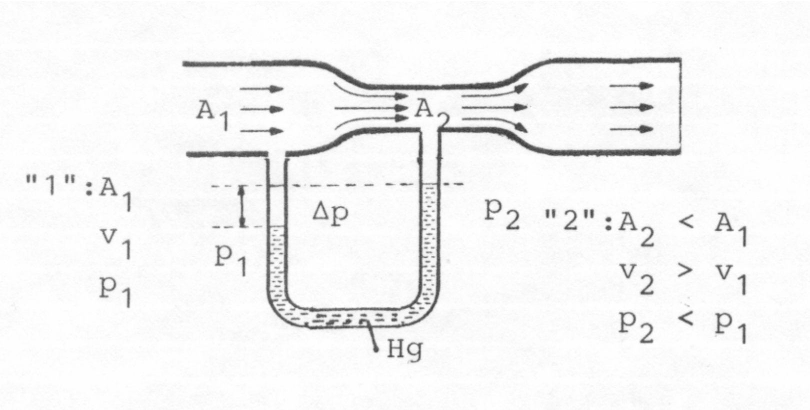
Desgleichen folgt für den Pegel L_2 = 50 dB die Intensität $I_2 = I_H \cdot 10^5 = 10^{-7}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$
der gesuchte Abstand d_2 ist dann:

$$d_2 = d_1 \cdot \sqrt{\frac{I_1}{I_2}} = 6325\ \mathrm{m}$$

Lösungen Experimentalphysik – SS02

<u>Lösung zu Aufgabe 6 (nur VU, CI):</u>

Analogie zur Anordnung einer VENTURI Düse



(a) Der Massenstrom $\frac{dm}{dt}$ einer Flüssigkeit der Dichte ρ, die mit der konstanten Geschwindigkeit v durch einen Querschnitt '1' fließt, ist gegeben durch

$$\frac{dm}{dt} = \rho A v$$

mit $dm = \rho dV$ erhält man für den Volumenstrom

$$\frac{dV}{dt} = \dot{V} = A v$$

Unter der Annahme einer inkompressiblen Flüssigkeit ist der Volumenstrom $\dot{V}$ in beiden Rohrnetzen gleich; also gilt die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{dV}{dt} = \dot{V} = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Für den Zusammenhang zwischen den Rohrquerschnitten und den zugehörigen Stömungsgeschwindigkeiten gilt also die Beziehung

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \qquad v_2 = \frac{A_1}{A_2} \cdot v_1$$

Die BERNOULLI Gleichung für eine reibungsfreie Flüssigkeit lautet

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho {v_1}^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho {v_2}^2$$

für die beobachtete Differenz der statischen Drucke in den beiden Netzen ergibt sich also zusammen mit der Kontinuitätsgleichung

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho\,[{v_2}^2 - {v_1}^2] = \frac{1}{2}\rho\,[\frac{{A_1}^2}{{A_2}^2} \cdot {v_1}^2 - {v_1}^2] = \frac{1}{2}\rho\,[\frac{{A_1}^2}{{A_2}^2} - 1]\,{v_1}^2$$

Die Querschnittsfläche eines Rohres ist gegeben durch

$$A = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \qquad \frac{A_1}{A_2} = \frac{\pi \cdot R^2}{\pi \cdot (\frac{R}{2})^2} = 4$$

Lösungen Experimentalphysik – SS02

Eine Reduzierung des Rohrradius R (bzw. Rohrdurchmessers D) auf die Hälfte bedeutet eine Reduzierung der kreisrunden Querschnittsfläche auf ein Viertel. Es sind

$$\text{Querschnitt } A_1 = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot (0.20\text{m})^2 = 1 = 1.26 \cdot 10^{-1}\ \text{m}^2$$

$$\text{Querschnitt } A_2 = \frac{1}{4} A_1 = \frac{1}{4} \cdot 1.26 \cdot 10^{-1}\text{m}^2 = 3.14 \cdot 10^{-2}\ \text{m}^2$$

Die Druckdifferenz Δp zwischen den beiden Netzen ist bekannt, das Verhältnis der Rohrquerschnitte ist bekannt. Damit kann die Geschwindigkeit v_1 bestimmt werden.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho \left[\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1\right] v_1^2$$

$$v_1^2 = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \left[\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1\right]} = \frac{2 \cdot 1.3\ \text{bar}}{1.0 \cdot 10^3\ \text{kgm}^{-3}[4^2 - 1]} = \frac{2.6 \cdot 10^5\ \text{kgms}^{-2}\text{m}^{-2}}{15 \cdot 10^3 \text{kgm}^{-3}} = 17.33\ \text{m}^2\text{s}^{-2} \quad v_1 = 4.16\ \text{m}^1\text{s}^{-1}$$

(b) Volumenstrom oder Durchflussrate

$$\frac{dV}{dt} = \dot{V} = A\, v$$

$$\dot{V} = A_1 v_1 = 1.273 \cdot 10^{-2}\text{m}^2 \cdot 4.16 \cdot \text{ms}^{-1} = 5.23 \cdot 10^{-1}\text{m}^3\text{s}^{-1}$$

(c) Die Kontinuitätsgleichung

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

liefert für die Geschwindigkeit v_2 des Wasser in Netz '2' (Querschnitt A_2)

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = 4 \cdot 4.16\ \text{m}^1\text{s}^{-1} = 16.64\ \text{m}\,\text{s}^{-1}$$

Die dynamischen Drucke in den beiden Leitungsnetzen bestimmen sich aus

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

also für das Leitungsnetz '1'

$$p_{dyn1} = \frac{1}{2} \rho v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^3\ \text{kgm}^{-3} \cdot 4.16^2 \cdot \text{m}^2\text{s}^{-2} = 8.65 \cdot 10^3\ \text{kgmm}^{-2}\text{s}^{-2} = 8.65 \cdot 10^{-2}\text{bar}$$

für das Leitungsnetz '2'

$$p_{dyn2} = \frac{1}{2} \rho v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^3\ \text{kgm}^{-3} \cdot 16.64^2\ \text{m}^2\text{s}^{-2} = 138.4 \cdot 10^3\ \text{kgmm}^{-2}\text{s}^{-2} = 1.38\ \text{bar}$$

(d) Der Gesamtdruck p_{ges} setzt sich zusammen aus dem statischen Druck p_{stat} und dem dynamischen Druck p_{dyn}

$$p_{ges} = p_{stat} + p_{dyn}$$

daraus ergeben sich die statischen Drucke in den beiden Leitungsnetzen zu

$$p_{stat} = p_{ges} - p_{dyn}$$

Rohrnetz '1'

$$p_{stat1} = p_{ges} - p_{dyn1} = (2.00 - 0.087)\,\text{bar} = 1.91\,\text{bar}$$

Rohrnetz '2'

$$p_{stat2} = p_{ges} - p_{dyn2} = (2.00 - 1.38)\,\text{bar} = 0.62\,\text{bar}$$

Probe

$$\Delta p = p_{stat1} - p_{stat2} = (1.91 - 0.62)\,\text{bar} = 1.29\,\text{bar}$$

Lösungen Experimentalphysik – SS02

<u>Lösung zu Aufgabe 7 (nur VU/VT, CI):</u>

(a) Zustandsgleichung idealer Gase liefert für den Anfangszustand 'A'

mit $p_A = p_L$ und $T_A = (273 + \frac{\vartheta_A}{^\circ C})K = (273 + \frac{20^\circ C}{^\circ C})K = 293\,K$

$$p_L \cdot V_A = n \cdot R_m \cdot T_A$$

$$n = \frac{p_L \cdot V_A}{R_m \cdot T_A} = \frac{980 \cdot 10^2 Nm^{-2} \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} m^3}{8.31\,Nm\,mol^{-1}K^{-1} \cdot 293\,K}$$

$$= 2.01 \cdot 10^{-2}\ mol$$

und $\qquad N = n \cdot N_A = 1.21 \cdot 10^{22}$ Moleküle

(b) Der **Druck** p_E im Zustand 'E' ist gegen p_A um Δp erhöht, die Druck-Differenz ergibt sich aus der Höhe der Flüssigkeitssäule zu

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot 2x = 1.60 \cdot 10^3 kgm^{-3} \cdot 9.81\,ms^{-2} \cdot 2 \cdot 15 \cdot 10^{-2} m$$

$$= 47.1 \cdot 10^2 Nm^{-2} = 47\ hPa$$

damit wird

$$p_E = p_L + \Delta p = (980 + 47)\,hPa = 1027\ hPa$$

Das **Volumen** V_E im Zustand 'E' ist gegen V_A um ΔV vergrößert, die Volumen-Differenz ergibt sich aus der Geometrie zu

$$\Delta V = \pi \cdot (\frac{D}{2})^2 x = \pi \cdot (\frac{1.00 \cdot 10^{-2} m}{2})^2 \cdot 15 \cdot 10^{-2}\ m$$

$$= 11.8 \cdot 10^{-6}\ m^{-3} = 0.012 \cdot 10^{-3}\ m^{\dagger 3}$$

damit wird das Volumen im Zustand 'E'

$$V_E = V_A + \Delta V = (0.500 + 0.012) \cdot 10^{\dagger 3} m^{-3} = 0.512 \cdot 10^{-3} m^{\dagger 3}$$

Damit wird die **KELVIN-Temperatur** im Zustand 'E'

$$T_E = \frac{p_E \cdot V_E}{p_A \cdot V_A} T_A = \frac{1027\ hPa \cdot 0.512 \cdot 10^{-3} m^3}{980\ hPa \cdot 0.500 \cdot 10^{-3} m^3} \cdot 293\,K$$

$$= 314\,K$$

Die zugehörige CELSIUS-Temperatur ist $\vartheta_E = 41\ ^\circ C$.

Die **mittlere Bewegungsenergie** eines Moleküls ist:

E = f/2 kT.

Die Anzahl der Freiheitsgrade für ein starres zweiatomiges Moleküls ist

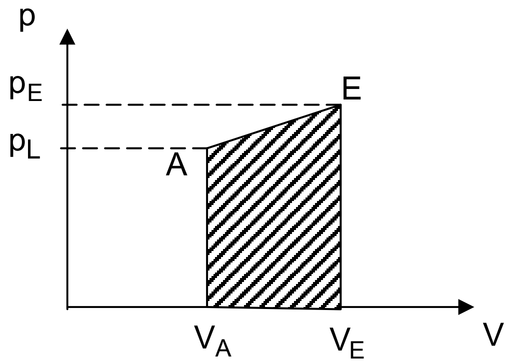
$$f_{ges} = f_{trans} + f_{rot} = 3 + 2 = 5$$

Mit f = 5, T = 341 K und der Boltzmannkonstante k wird die mittlere Energie eines Moleküls

Lösungen Experimentalphysik – SS02

$$\bar{\varepsilon}_{kin}(T_E) = \frac{5}{2}\,k\,T_E = \frac{5}{2}\,(1.38\cdot 10^{-23}\ \mathrm{J/K})\,(341\,\mathrm{K}) = 1.18\cdot 10^{-20}\ \mathrm{J}$$

(c) und (d): Die umgesetzte Arbeit wird durch die Fläche unter der Kurve $\overline{AE}$ (vereinfachend eine Gerade) repräsentiert; dies ist die Fläche eines Trapezes,



$$W_{AE} = -\int_{'A'}^{'E'} p\cdot dV$$
$$= -\frac{(p_L + p_E)}{2}(V_E - V_A) = -\frac{(980+1027)\cdot 10^2\mathrm{Nm}^{-2}}{2}\cdot(0.512-0.500)\cdot 10^{-3}\mathrm{m}^3$$
$$= -12.0\cdot 10^{-1}\ \mathrm{J} = -1.20\ \mathrm{J}$$

Das Minus-Vorzeichen sagt aus: bei der Expansion wird Arbeit wird vom System abgegeben.

(e) die dem System durch den Stromstoß zugeführte JOULEsche Wärme dient

- der Erhöhung der Inneren Energie U des Gases um ΔU
- der bei Expansion des Gases abgegebenen Arbeit W_{AE}
- der Abgabe von Verlustwärme an die Umgebung $Q_{ab}^{verlust}$

Die dem Gas zugeführte Wärme erhält man aus dem 1. Hauptsatz

$$\Delta U_{Gas} = U_E - U_A = Q_{zu}^{Gas} + W_{AE}$$

Zur Berechnung der Änderung der Inneren Energie braucht man die molare isochore Wärmekapazität C_{mv}; diese ergibt sich aus der Anzahl der Freiheitsgrade

$$f_{ges} = 5 \text{ zu}$$

$$C_{mv} = \frac{f_{ges}}{2}R_m = \frac{5}{2}\cdot 8{,}31\,\mathrm{Jmol^{-1}K^{-1}} = 20.78\ \mathrm{Jmol^{-1}K^{-1}}$$

Damit wird die Änderung der inneren Energie

$$\Delta U_{Gas} = n\cdot C_{mv}\cdot(T_E - T_A)$$
$$= 2.01\cdot 10^{-2}\mathrm{mol}\cdot 20.78\ \mathrm{Jmol^{-1}K^{-1}}(314-293)\mathrm{K}$$
$$= 877\cdot 10^{-2}\ \mathrm{J} = 8.77\ \mathrm{J}$$

und die dem Gas zugeführte Wärme wird nach dem 1. Hauptsatz

$$\begin{aligned} Q_{zu}^{Gas} &= \Delta U_{Gas} - W_{AE} \\ &= 8.77\ \mathrm{J} - (-)1.20\ \mathrm{J} = 9.97\ \mathrm{J} \end{aligned}$$

Für die Bilanz der umgesetzten Wärmen gilt

$$Q_{Joule} = \left|Q_{zu}^{Gas}\right| + \left|Q_{ab}^{Verlust}\right|$$

damit folgt für die an die Umgebung abgebene Wärmeverluste
schließlich

$$Q_{ab}^{Verlust} = (12.0 - 9.97)\ \mathrm{J} = 2.0\ \mathrm{J}$$