Fachhochschule Hannover | Klausur WS0708 | 10.01.08
Fachbereich Maschinenbau | Zeit: 90 min
Fach: Physik 1 (Prof. Schrewe) | Hilfsmittel: Formelsammlung zur Vorlesung

1. Ein Fahrzeug mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 erreicht bei $t = 0$ eine 260 m lange gerade Teststrecke. Während der nächsten 10 s wird es gleichmäßig mit a_0 beschleunigt, fährt anschließend 80 m mit gleichförmiger Geschwindigkeit und wird danach mit konstanter Verzögerung bis zum Stillstand bei $s = 260\,m$ abgebremst. Entlang der Teststrecke werden folgende Weg-Zeit-Werte ermittelt:

s / m	**0**	**55**	**140**	**220**	**260**
t / s	**0**	**5**	**10**	**14**	**18**

a. Skizzieren Sie die *s*-*t*-, *v*-*t*- und *a*-*t*-Diagramme. ....(10)
b. Wie groß ist die Durchschnittsgeschwindigkeit auf der Teststrecke? ....(5)
c. Wie groß ist die Anfangsgeschwindigkeit v_0 und die Beschleunigung a_0? ....(10)
d. Wie groß ist die Höchstgeschwindigkeit v_E des Fahrzeugs? ....(5)
e. Mit welcher Verzögerung a_B wird das Fahrzeug abgebremst? ....(5)
f. Betrachten Sie eine Testfahrt auf einem Kreis mit Umfang von 520 m für die die gleichen Weg-Zeit-Werte gelten, wie auf gerader Teststrecke. Berechnen Sie die Gesamtbeschleunigung zu den in der Tabelle gegebenen Zeiten. ....(10)

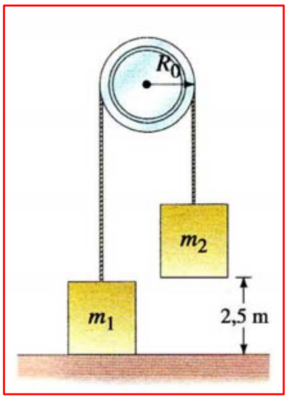


Abb. 1.

2. Eine Masse ($m_1 = 1\,kg$) ist mit einem (masselosen) Seil über eine Umlenkrolle (homogener Zylinder) der Masse $m_R = 0{,}5\,kg$ mit einer zweiten Masse m_2 verbunden (Abb. 1).
a. Wie groß ist muss m_2 sein, um $s = 2{,}5\,m$ in $t = 1\,s$ zu durchfallen? ..(15)
b. Welche Höchstgeschwindigkeit erreichen die Massen? ....(10)
c. Wie groß ist die mittlere Leistung, wie groß die Maximalleistung? ....(10)

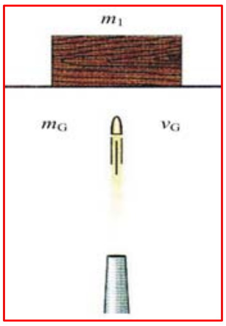


Abb. 2.

3. Ein Geschoss mit Masse $m_G = 20\,g$ wird mit der Geschwindigkeit $v_G = 400\,m\,s^{-1}$ senkrecht von unten in ein Holzstück der Masse $m_1 = 0{,}8\,kg$ geschossen (Abb. 2).
a. Wie hoch fliegt das Holzstück, nachdem das Geschoss eingedrungen und stecken geblieben ist? ....(15)
b. Berechnen Sie die Kraftstöße, die auf m_1 und m_G wirken, und bestimmen Sie die (mittlere) Kraft, die auf m_1 wirkt, wenn das Geschoss $s_B = 5\,cm$ tief in das Holzstück eindringt. ....(10)

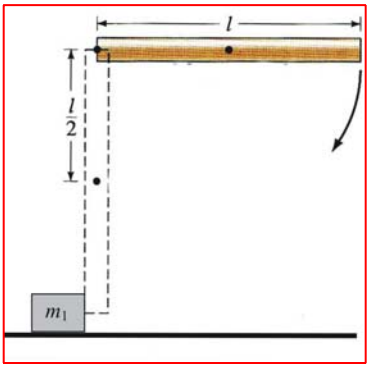


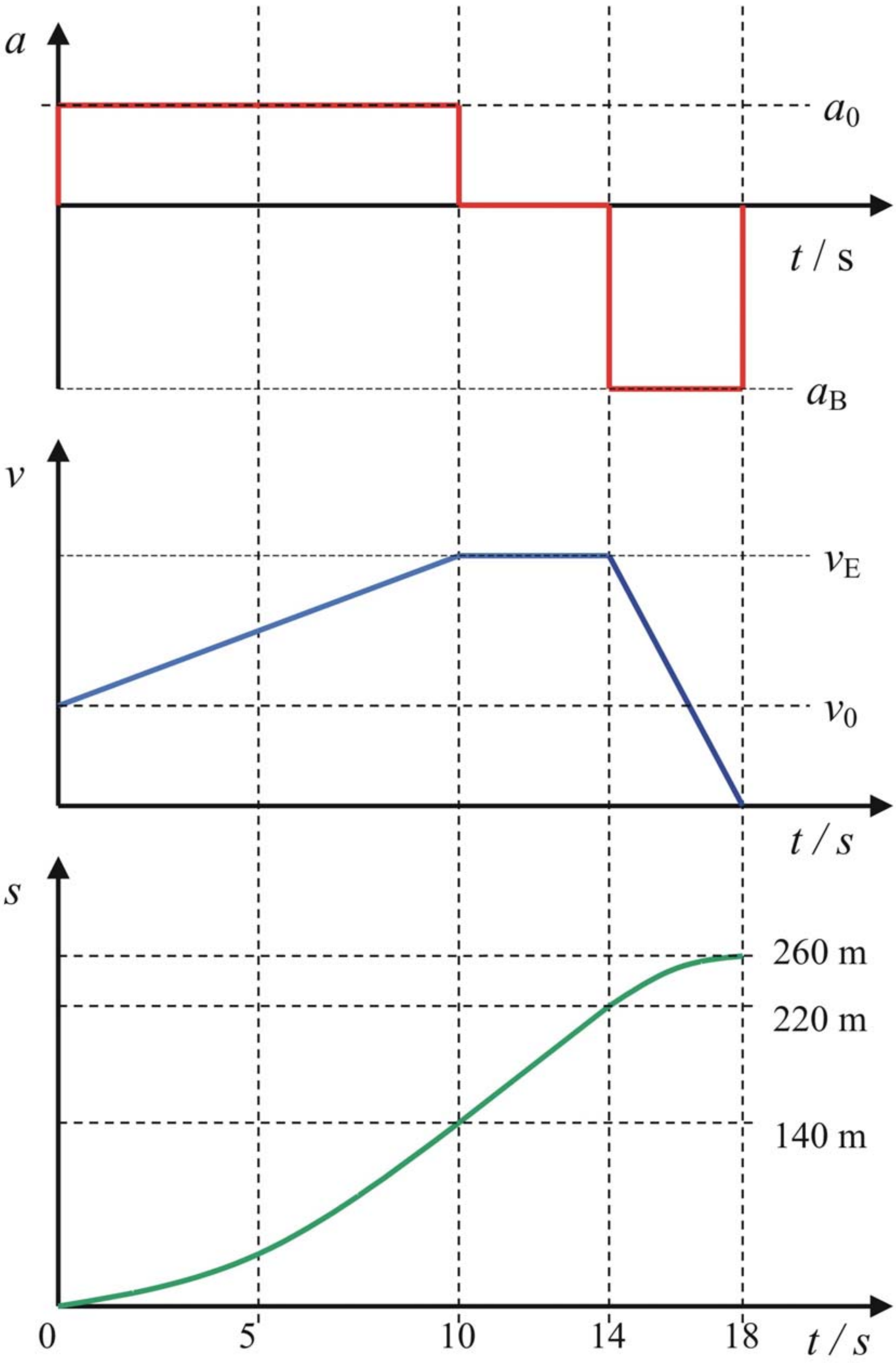
Abb. 3.

4. Eine homogene Stange (Länge $l = 1\,m$, Masse $m_l = 1\,kg$) soll um einen Punkt am Ende drehbar gelagert sein. Aus der waagerechten Lage fallen gelassen, trifft sie bei einem Winkel von 90° auf die ruhende Masse $m_1 = 1\,kg$ (Abb. 3). Der Stoß soll <u>elastisch</u> sein und Reibungskräfte vernachlässigt werden.
a. Welche Geschwindigkeit u_1 hat m_1 nach dem Stoß? ....(20)
b. Auf welchen maximalen Winkel schwingt die Stange nach dem Stoß aus? ....(15)

Verwenden Sie zur Vereinfachung bei allen Aufgaben *g* = 10 m s^{-2}.

Lösungen:

1a. *s*-*t*, *v*-*t*-und *a*-*t*-Diagramm:



1b. Durchschnittsgeschwindigkeit: $\overline{v} = \frac{s_{ges}}{t_{ges}} = \frac{260\,m}{18\,s} = 14,44\ m\,s^{-1}$

1c. Bestimmung von v_0 und a_0:

Allgemeine Gleichung für $s(t)$ bei gleichmäßig beschleunigter Bewegung:

$$s(t) = \frac{1}{2} a_0 t^2 + v_0 t + s_0$$

Laut Tabelle gelten folgende Beziehungen:

$$s(t=0) = 0 = \frac{1}{2} a_0 \, 0^2 + v_0 \, 0 + s_0 = s_0 \qquad (1)$$

$$s(t=5\,s) = 55\,m = \frac{1}{2} a_0 \, 5^2 s^2 + v_0 5\,s + s_0 \qquad (2)$$

$$s(t=10\,s) = 140\,m = \frac{1}{2} a_0 \, 10^2 s^2 + v_0 10\,s + s_0 \qquad (3)$$

Aus Gleichung (1) folgt: $s_0 = 0$

Gleichung (2) $110\,m = a_0 \cdot 25 s^2 + v_0 \cdot 10\,s$

Gleichung (3) $280\,m = a_0 \cdot 100 s^2 + v_0 \cdot 20\,s$

Es folgt: $220\,m = a_0 \cdot 50 s^2 + v_0 \cdot 20\,s$

Subtraktion: $280\,m - 220 m = a_0 \cdot \left(100 s^2 - 50\,s^2\right)$

Lösung für a_0: $a_0 = \frac{(280-220)}{(100-50)} = \frac{60}{50} m\,s^{-2} = 1{,}2\,m\,s^{-2}$

Berechnung von v_0: $55\,m = \frac{1}{2} 1{,}2 \cdot 25\,m + v_0 5\,s = 15\,m + 5\,s \cdot v_0$

Lösung für v_0: $v_0 = \frac{(55-15)\,m}{5\,s} = 8\,m\,s^{-1}$

1d. Höchstgeschwindigkeit: $v(t=10s) = a_0 \cdot 10\,s + v_0$

Lösung: $v(t=10s) = 1{,}2\,m\,s^{-2} \cdot 10\,s + 8\,m\,s^{-1} = 20\,m\,s^{-1}$

1e. Das Fahrzeug wird auf einer Strecke von $s_B = 40\,m$ abgebremst.

Es gilt: $s_B = v_E\, t_B + \frac{1}{2} a_B\, t_B^2$

Für die Geschwindigkeit gilt: $a_B = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0 - v_E}{t_B - 0} = -\frac{v_E}{t_B}$

es folgt: $t_B = -\frac{v_E}{a_B}$

Einsetzen: $s_B = -\frac{v_E^2}{a_B} + \frac{1}{2} a_B \frac{v_E^2}{a_B^2} = -\frac{1}{2} \frac{v_E^2}{a_B}$

es folgt: $a_B = -\frac{1}{2} \frac{v_E^2}{s_B} = -\frac{1}{2} \frac{20^2\, m^2\, s^{-2}}{40\,m} = -5\,m\,s^{-2}$

1f. Für die Gesamtbeschleunigung gilt: $a_{ges} = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$

mit Tangentialbeschleunigung: a_t

und Normalbeschleunigung: a_n

Die Normalbeschleunigung ist bei einer Kreisbahn gleich der Radialbeschleunigung oder Zentripetalbeschleunigung. Es gilt: $a_n = a_r = a_{ZP} = \frac{v_b^2}{R} = \frac{v_t^2}{R}$

wobei $v_b = v_t$ die Bahn- bzw. Tangentialgeschwindigkeit bezeichnet.

Es gilt folgende Tabelle. (Bei Sprungstellen der Beschleunigung wurden Werte für a_{ges} links und rechts der Sprungstelle berechnet.)

t /s	**s / m**	**v_t / ms^{-1}**	**a_t / ms^{-2}**	**a_n / ms^{-2}**	**a_{ges} / ms^{-2}**
0	0	8	0,00	0,77	**0,77**
	0	8	1,20	0,77	**1,43**
5	55	14	1,20	2,37	**2,65**
10	140	20	1,20	4,83	**4,98**
	140	20	0,00	4,83	**4,83**
14	220	20	0,00	4,83	**4,83**
	220	20	-5,00	4,83	**6,95**
18	260	0	-5,00	0,00	**5,00**
	260	0	0,00	0,00	**0,00**

2a. Gleichmäßig beschleunigte Bewegung: $s = \frac{1}{2} a t^2$

Beschleunigung der Massen m_1 und m_2: $a = \frac{2s}{t^2} = \frac{2 \cdot 2{,}5\, m}{1^2\, s^2} = 5\, m\, s^{-2}$

D'Alembertsches Prinzip für m_2: $\left(F_{g2} - F_{S2}\right) - m_2\, a = 0$ (1)

D'Alembertsches Prinzip für m_R: $\left(F_{S2}\, R_0 - F_{S1}\, R_0\right) - J_R\, \alpha = 0$ (2)

D'Alembertsches Prinzip für m_1: $\left(F_{S1} - F_{g1}\right) - m_1\, a = 0$ (3)

Einsetzen von (1) und (3) in (2): $\left(\left(F_{g2} - m_2\, a\right) R_0 - \left(F_{g1} + m_1\, a\right) R_0\right) - J_R\, \alpha = 0$

Es gilt: $J_R = \frac{1}{2} m_R\, R_0^2$

und wenn kein Schlupf auftritt: $\alpha = \frac{a}{R_0}$

Einsetzen: $\left(m_2\, g - m_2\, a - m_1\, g - m_1\, a\right) R_0 - \frac{1}{2} m_R\, R_0^2\, \frac{a}{R_0} = 0$

$$m_2\left(g - a\right) - m_1\left(g + a\right) - \frac{1}{2} m_R\, a = 0$$

Lösung: $m_2 = \frac{m_1\left(g + a\right) + 0{,}5\, m_R\, a}{g - a}$

$$m_2 = \frac{1 \cdot 15 + 0{,}5 \cdot 0{,}5 \cdot 5}{5}\, kg = 3{,}25\, kg$$

2b. Bezeichnung der Energien:

Potentielle Energie von m_1 für $t = 0$: $E_{pot,1}\left(t = 0\right) = 0$

Potentielle Energie von m_1 für $t = t_E$: $E_{pot,1}\left(t = t_E\right) = m_1\, g\, s$

Potentielle Energie von m_2 für $t = 0$: $E_{pot,2}\left(t = 0\right) = m_2\, g\, s$

Potentielle Energie von m_2 für $t = t_E$: $E_{pot,2}\left(t = t_E\right) = 0$

Kinetische Energie für $t = 0$: $E_{kin}\left(t = 0\right) = 0$

Kinetische Energie für $t = t_E$: $E_{kin}\left(t = 0\right) = \frac{1}{2}\left(m_1 + m_2\right) v_E^2 + \frac{1}{2} J_R\, \omega_{RE}^2$

mit: $J_R = \frac{1}{2} m_R R_0^2$ und $\omega_{RE} = \frac{v_E}{R_0}$

Einsetzen: $E_{kin}(t=0) = \frac{1}{2}(m_1+m_2)v_E^2 + \frac{1}{4} m R_0^2 \frac{v_E^2}{R_0^2}$

$$E_{kin}(t=0) = \frac{1}{2}\left(m_1+m_2+\frac{1}{2}m_R\right)v_E^2$$

Energieerhaltungssatz: $E_{ges}(t=0) = E_{ges}(t=t_E)$

Einsetzen: $m_2\,g\,s = m_1\,g\,s + \frac{1}{2}\left(m_1+m_2+\frac{1}{2}m_R\right)v_E^2$

Lösung: $(m_2-m_1)\,g\,s = \frac{1}{2}\left(m_1+m_2+\frac{1}{2}m_R\right)v_E^2$

$$v_E = \sqrt{\frac{2(m_2-m_1)\,g\,s}{m_1+m_2+0{,}5\,m_R}}$$

$$v_E = \sqrt{\frac{2\cdot 2{,}25\cdot 10\cdot 2{,}5}{4{,}5}}\,m\,s^{-1} = 5\,m\,s^{-1}$$

2c. Leistung: $\bar{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = F\cdot v$

Mittlere Leistung: 1. Methode: $\bar{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t}$

$$\bar{P} = \frac{\frac{1}{2}(m_1+m_2+0{,}5\,m_R)v_E^2}{t}$$

$$\bar{P} = \frac{0{,}5\cdot 4{,}5\,kg\cdot 5^2\,m^2\,s^{-2}}{1\,s} = 56{,}25\,W$$

Mittlere Leistung 2. Methode: $\bar{P} = F\cdot\bar{v} = (m_1+m_2)\,a\cdot\bar{v}$

$$\bar{P} = \left(m_1+m_2+\frac{1}{2}m_R\right)a\cdot\bar{v}$$

$$\bar{P} = 4{,}5\,kg\cdot 5\,m\,s^{-2}\cdot\frac{5\,m\,s^{-1}}{2} = 56{,}25\,W$$

Maximalleistung: $P_{\max} = \left(m_1+m_2+\frac{1}{2}m_R\right)a\cdot v_{\max}$

$$P_{\max} = 4{,}5\,kg\cdot 5\,m\,s^{-2}\cdot 5\,m\,s^{-1} = 112{,}5\,W$$

3a. Es handelt sich um einen vollkommen unelastischen Stoß.

Impulserhaltungssatz: $m_G\,v_G = (m_G+m_1)\,u$

Lösung für u: $u = \frac{m_G}{m_G+m_1}v_G = \frac{0{,}02}{0{,}02+0{,}8}\cdot 400\,m\,s^{-1}$

$$u = \frac{0{,}02}{0{,}82}\cdot 400\,m\,s^{-1} = 9{,}756\,m\,s^{-1}$$

Energieerhaltungssatz (<u>nach</u> dem unelastischen Stoß!!):

$$\frac{1}{2}(m_G+m_1)u^2 = (m_G+m_1)\,g\,h$$

Lösung für Höhe h: $$h = \frac{u^2}{2\,g} = \frac{9,756^2\, m^2 s^{-2}}{2\cdot 10\, m\, s^{-2}} = 4,75\, m$$

3b. Kraftstoß: $$\int F\, dt = \bar{F}\,\Delta t = \Delta p$$

Impulsänderung von m_1 $$\Delta p_{m_1} = p_{m_1}^{nachher} - p_{m_1}^{vorher} = m_1\, u - 0$$

$$\Delta p_{m_1} = m_1\, u = +0,8\, kg \cdot 9,756\, m\, s^{-1}$$

$$\Delta p_{m_1} = 7,805\, kg\, m\, s^{-1}$$

Impulsänderung von m_G $$\Delta p_{m_G} = p_{m_G}^{nachher} - p_{m_G}^{vorher} = m_G\, u - m_G\, v_G$$

$$\Delta p_{m_G} = 0,02\, kg \cdot (9,756 - 400)\, m\, s^{-2}$$

$$\Delta p_{m_G} = -7,805\, kg\, m\, s^{-2}$$

Bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung gilt für den Bremsweg:

$$s_B = \frac{1}{2}|a_B|\, t_B^2$$

Für die Beschleunigung gilt: $$|a_B| = \left|\frac{\Delta v}{\Delta t}\right| = \left|\frac{u - v_G}{t_B - 0}\right| = \frac{v_G - u}{t_B}$$

Einsetzen: $$s_B = \frac{1}{2}\frac{v_G - u}{t_B}\, t_B^2 = \frac{1}{2}(v_G - u)\, t_B$$

$$t_B = \frac{2\, s_B}{v_G - u} = \frac{2\cdot 0,05 m}{(400 - 9,576)\, m\, s^{-1}} = 0,256\cdot 10^{-3}\, s$$

$$t_B = 0,256 \cdot ms$$

Kraftstoß auf m_1: $$\int F\, dt = \bar{F}\,\Delta t = \Delta p$$

Kraft auf m_1: $$\bar{F} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m_1\, u - 0}{t_B} = \frac{m_1\, u}{t_B} = \frac{0,8\, kg \cdot 9,576\, m\, s^{-1}}{0,256\cdot 10^{-3}\, s}$$

$$\bar{F} = \frac{0,8\, kg \cdot 9,576\, m\, s^{-1}}{0,256\cdot 10^{-3}\, s} = 29,91\, kN$$

4a. Für den elastischen Stoß der Stange mit der Masse m_1 gilt:

der Drehimpulserhaltungssatz: $$J\,\omega_0 = J\,\omega_1 + m_1\, u_1\, l \qquad (1)$$

und der Energieerhaltungssatz: $$\frac{1}{2}J\,\omega_0^2 = \frac{1}{2}J\,\omega_1^2 + \frac{1}{2}m_1\, u_1^2 \qquad (2)$$

mit Massenträgheitsmoment der Stange m_l mit Drehpunkt am Ende:

$$J = \frac{1}{3}m_l\, l^2 = \frac{1}{3}\, kg\, m^2$$

Winkelgeschwindigkeit vor dem Stoß: ω_0

Winkelgeschwindigkeit nach Stoß: ω_1

Geschwindigkeit von m_1 nach Stoß: u_1

Die Winkelgeschwindigkeit der Stange ω_0 vor dem Stoß ergibt sich aus dem Energieerhaltungssatz, da der Schwerpunkt der Stange wird um $\frac{l}{2}$ gesenkt wird und die frei werdende potentielle Energie $m_l\, g\,\frac{l}{2}$ in kinetische Energie $\frac{1}{2}J\omega_0^2$ verwandelt wird.

Es gilt: $m_l\, g\, \frac{l}{2} = \frac{1}{2} J\, \omega_0^2$

es folgt: $\omega_0^2 = \frac{m_l\, g\, l}{J} = \frac{m_l\, g\, l}{\frac{1}{3} m_l\, l^2} = \frac{3\, g}{l}$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3\, g}{l}} = \sqrt{30}\ s^{-1} = 5{,}48\ s^{-1}$$

Umformung Gleichung (1) liefert: $u_1 = \frac{J}{m_1\, l}(\omega_0 - \omega_1) = \frac{J}{m_1\, l^2} \cdot (l\, \omega_0 - l\, \omega_1)$

Setze zur Vereinfachung: $\hat{J} = \frac{J}{m_1\, l^2} = \frac{\frac{1}{3} m_l\, l^2}{m_1\, l^2} = \frac{1}{3}$

und Bahngeschwindigkeit des Stangenendpunkts im Abstand l vor dem Stoß:

$$v_l = l \cdot \omega_0$$

und Bahngeschwindigkeit des Stangenendpunkts im Abstand l nach dem Stoß:

$$u_l = l \cdot \omega_1$$

damit folgt für Gleichung (1): $u_1 = \hat{J} \cdot (v_l - u_l)$

Umformung der Gleichung (2) liefert: $u_1^2 = \frac{J}{m_1}(\omega_0^2 - \omega_1^2) = \frac{J}{m_1\, l^2}(l^2 \omega_0^2 - l^2 \omega_1^2)$

Einsetzten von $\hat{J}$, v_l und u_l: $u_1^2 = \hat{J}(v_l^2 - u_l^2)$

Lösung des Gleichungssystems:

$$u_1 = \hat{J} \cdot (v_l - u_l) \qquad (3)$$

$$u_1^2 = \hat{J}(v_l^2 - u_l^2) \qquad (4)$$

Umformung von (3) $u_l = v_l - \frac{1}{\hat{J}} u_1$

Einsetzten in (4) $u_1^2 = \hat{J}\, v_l^2 - \hat{J}\, u_l^2 = \hat{J}\, v_l^2 - \hat{J}\left(v_l - \frac{1}{\hat{J}} u_1\right)^2$

$$u_1^2 = \hat{J}\, v_l^2 - \hat{J}\left(v_l^2 - 2\frac{v_l\, u_1}{\hat{J}} + \frac{u_1^2}{\hat{J}^2}\right)$$

$$u_1^2 = \hat{J}\, v_l^2 - \hat{J}\, v_l^2 + 2\, v_l\, u_1 - \frac{u_1^2}{\hat{J}}$$

$$u_1^2\left(1 + \frac{1}{\hat{J}}\right) - 2\, v_l\, u_1 = 0$$

$$u_1^2 - 2\left(\frac{\hat{J}}{\hat{J}+1}\right) v_l\, u_1 = 0 = u_1^2 - 2\alpha\, v_l\, u_1$$

mit: $\alpha = \frac{\hat{J}}{\hat{J}+1} = \frac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{3}+1} = \frac{1}{4}$

folgt: $(u_1 - \alpha\, v_l)^2 = \alpha^2 v_l^2$

$$u_1 = \pm\sqrt{\alpha^2 v_l^2} + \alpha\, v_l$$

$$u_{1+} = +\alpha\, v_l + \alpha\, v_l = 2\alpha\, v_l$$

$u_{1-} = -\alpha\, v_l + \alpha\, v_l = 0$ scheidet aus.

Lösung für u_1:

$$u_1 = 2\alpha\, v_l = \frac{2\hat{J}}{\hat{J}+1} v_l = \frac{1}{2} v_l = \frac{l}{2}\omega_0 = \frac{l}{2}\sqrt{\frac{3g}{l}}$$

$$u_1 = \frac{l}{2}\sqrt{\frac{3g}{l}} = \frac{1m}{2}\cdot\sqrt{\frac{30\,m\,s^{-2}}{1m}} = \frac{\sqrt{30}}{2} m\,s^{-1}$$

$$u_1 = \frac{\sqrt{30}}{2} m\,s^{-1} = 2{,}74\,m\,s^{-1}$$

Alternatives Lösungsverfahren (Es geht auch einfacher, wenn die oben gezeigte allgemeine Form zu umständlich erscheint.)

Lösung des Gleichungssystems:

$$u_1 = \hat{J}\cdot(v_l - u_l) \rightarrow 3x = z - y \quad (5)$$

$$u_1^2 = \hat{J}\left(v_l^2 - u_l^2\right) \rightarrow 3x^2 = z^2 - y^2 \quad (6)$$

Ziel ist die Bestimmung von *x* und *y*:

Bestimme *y*: $y = z - 3x$

Einsetzen in Gl (6): $3x^2 = z^2 - (z-3x)^2 = z^2 - z^2 + 6zx - 9x^2$

Es folgt:

$$12x^2 - 6zx = 0$$

$$x^2 - 2\frac{1}{4}z\,x + \frac{1}{16}z^2 = \frac{1}{16}z^2$$

$$\left(x - \frac{1}{4}z\right)^2 = \frac{1}{16}z^2$$

$$x = \pm\frac{1}{4}z + \frac{1}{4}z$$

$$x_+ = \frac{1}{2}z$$

$x_- = 0$ scheidet aus.

Einsetzen: $u_1 = \frac{1}{2}v_l = \frac{l\cdot\omega_0}{2}$

Bestimmung von $y = z - 3x$

Einsetzen: $u_l = v_l - \frac{3}{2}v_l = -\frac{1}{2}v_l$

mit $u_l = l\cdot\omega_1$: $\omega_1 = -\frac{1}{2\cdot l} l\,\omega_0 = -\frac{\omega_0}{2}$

in Übereinstimmung mit der ersten Lösung.

---

b. Bestimmung von ω_1 aus Gleichung (3):

$$u_1 = \hat{J}\cdot(v_l - u_l) = \hat{J}\,v_l - \hat{J}\,u_l = \hat{J}\,l\,\omega_0 - \hat{J}\,l\,\omega_1$$

$$\hat{J}\,l\,\omega_1 = \hat{J}\,l\,\omega_0 - u_1$$

$$\omega_1 = \omega_0 - \frac{1}{\hat{J}\,l}u_1 = \sqrt{\frac{3g}{l}} - \frac{1}{\frac{1}{3}1m}\frac{\sqrt{30}}{2}m\,s^{-1}$$

$$\omega_1 = \sqrt{30\,s^{-2}} - \frac{3}{2}\sqrt{30}\,s^{-1} = -\frac{1}{2}\sqrt{30}\,s^{-1}$$

$$\omega_1 = -\frac{1}{2}\sqrt{30}\,s^{-1} = -2,74\,s^{-1}$$

Zur Bestimmung des maximalen Auslenkungswinkels dient wieder der Energieerhaltungssatz:

$$\frac{1}{2} J\,\omega_1^2 = m_l\,g\,h_1$$

wobei h_1 die Höhe bezeichnet, um die der Schwerpunkt beim Rückschwingen der Stange gehoben wird.

Es folgt: $$h_1 = \frac{J\omega_1^2}{2\,m_l\,g}$$

$$h_1 = \frac{\frac{1}{3}kg\;m^2 \cdot 30s^{-2}}{2 \cdot 4\,kg \cdot 10\,m\,s^{-2}} = \frac{1}{8}m = 0{,}125\,m$$

Geometrische Betrachtung liefert: $$\cos\varphi_1 = \frac{\frac{l}{2} - h_1}{\frac{l}{2}} = \frac{l - 2\,h_1}{l} = 0{,}75$$

Maximaler Winkelausschlag bei der Rückschwingung:

$$\varphi_1 = \arccos\left(0{,}75\right) = 41{,}41° \cong 41°$$