PHYSIK

Gekoppelte Bewegungen 2

Gekoppelte Bewegungen auf schiefer Ebene

Noch ohne Korrekturlesung !

Datei Nr. 91132

Friedrich W. Buckel

Oktober 2002

Internatsgymnasium Schloß Torgelow

Inhalt

Bemerkung

Die allgemeine quadratische Gleichung $ax^2 + bx + c = 0$ hat die Lösungsformel

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Diese Formel (im Volksmund auch „Mitternachtsformel“ genannt, wird von mir ausschließlich verwendet. In nicht wenigen Aufgaben ist sie der leider zu oft eingesetzten p-q-Formel deutlich überlegen.

1. Grundlagen

VORAUSGESETZTES WISSEN:

(1) Das **Newtonsche Kraftgesetz** beschreibt den Zusammenhang zwischen einer Kraft, die auf eine Masse wirkt und die daraus resultierende Beschleunigung (die auch als Bremsverzögerung wirken kann, wenn sie der Bewegungsrichtung entgegen wirkt).

$$\boxed{F = m \cdot a \Leftrightarrow a = \frac{F}{m}}$$

(2) Wenn Reibung im Spiel ist, wirkt die **Reibungskraft** stets bremsend. Man berechnet sie durch die Formel

$$\boxed{F_R = f \cdot N}$$

wobei N die Normalkraft ist. Darunter versteht man die Kraft, die den Körper senkrecht gegen die Unterlage drückt.

Man berechnet sie mit $\boxed{N = G \cdot \cos\alpha = m \cdot g \cdot \cos\alpha}$

Auf einer horizontalen Ebene wird somit die Reibungskraft durch diese Gleichung berechnet:

$$\boxed{F_R = f \cdot N = f \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha}$$

(3) Auf einer schiefen Ebene wirkt die Hangabtriebskraft als Antriebs- oder Bremskraft, je nach Situation:

$$\boxed{H = G \cdot \sin\alpha = m \cdot g \cdot \sin\alpha}$$

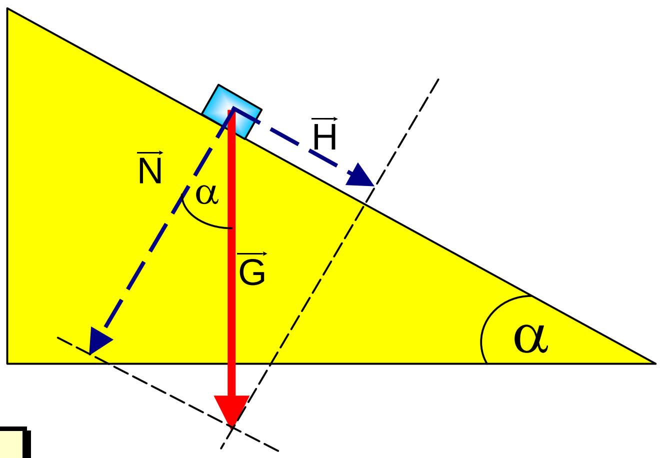
(4) Für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung gelten diese Gleichungen

$$\boxed{\begin{gathered} v(t) = v(0) \pm a \cdot t \\ s(t) = v(0) \cdot t \pm \tfrac{1}{2} a t^2 \end{gathered}}$$

Das Minuszeichen gilt bei einer verzögerten Bewegung.

(5) Wird nichts anderes gesagt, rechnen wir immer mit $g = 10 \frac{m}{s^2}$.

2. Bewegung ohne äußeren Antrieb



Nehmen wir an, ein Körper liegt auf einer schiefen Ebene und beginnt, hinab zu gleiten. Dann wirkt die Hangabtriebskraft antreibend, die Gleitreibungskraft bremst.

Sie wird durch die Normalkraft erzeugt, die den Körper senkrecht gegen die Oberfläche drückt.

Hangabtriebskraft:

$$\boxed{\sin\alpha = \frac{H}{G} \Rightarrow H = G \cdot \sin\alpha}$$

Normalkraft:

$$\boxed{\cos\alpha = \frac{N}{G} \Rightarrow N = G \cdot \cos\alpha}$$

Gleitreibungskraft:

$$\boxed{R = f \cdot N = f \cdot G \cdot \cos\alpha = f \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha}$$

Beschleunigung:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{H - R}{m} = \frac{m \cdot g \cdot \sin\alpha - f \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha}{m} = \frac{\cancel{m} \cdot g \cdot (\sin\alpha - f \cdot \cos\alpha)}{\cancel{m}} = g \cdot (\sin\alpha - f \cdot \cos\alpha)$$

Wenn die Bewegung reibungslos verlaufen soll, setze man einfach $f = 0$, das ergibt dann $a = g \cdot \sin\alpha$.

BEISPIEL 1:

Eine schiefe Ebene hat eine Neigung von 40^O. Der Haftreibungskoeffizient beträgt $f = 0,3$.

a) Wie lange braucht der Körper, bis er nach 0,60 m unten angekommen ist. Welche Endgeschwindigkeit hat er unten ?

b) Wie lange benötigt er, bis er die halbe Strecke zurückgelegt hat. Welche Geschwindigkeit hat er dann ?

c) Wo hat er die halbe Geschwindigkeit ? Und wann erreicht er diese Stelle ?

LÖSUNG:

Für diese schiefe Ebene errechnet man dies Beschleunigung:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{H-R}{m} = \frac{m \cdot g \cdot \sin\alpha - f \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha}{m} = \frac{m \cdot g \cdot (\sin\alpha - f \cdot \cos\alpha)}{m} = g \cdot (\sin\alpha - f \cdot \cos\alpha)$$

Dies ergibt den Zahlenwert: $a = 4{,}1\frac{m}{s^2}$.

a) Die Wegstrecke s = 0,60 m legt dieser Körper in der Zeit t_1 zurück:

$$s = \tfrac{1}{2}at^2 \;\Rightarrow\; t_1 = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{1{,}2\text{ m}}{4{,}1\frac{m}{s^2}}} = 0{,}54\text{ s}$$

Dann hat er diese Geschwindigkeit: $v = a \cdot t = 4{,}1\frac{m}{s^2} \cdot 0{,}54\text{ s} = 2{,}2\frac{m}{s}$.

b) Für die halbe Strecke benötigt er

$$s = \tfrac{1}{2}at^2 \;\Rightarrow\; t_2 = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{0{,}6\text{ m}}{4{,}1\frac{m}{s^2}}} = 0{,}38\text{ s}$$

Dies ist mehr als die halbe Zeit !

Dann hat er diese Geschwindigkeit: $v = a \cdot t = 4{,}1\frac{m}{s^2} \cdot 0{,}38\text{ s} = 1{,}6\frac{m}{s}$

c) Die halbe Geschwindigkeit hat er nach der Zeit

$$v = a \cdot t \;\Rightarrow\; t_3 = \frac{v}{a} = \frac{1{,}1\frac{m}{s}}{4{,}1\frac{m}{s^2}} = 0{,}27\text{ s}$$

Dann hat er die Strecke s_3 zurückgelegt:

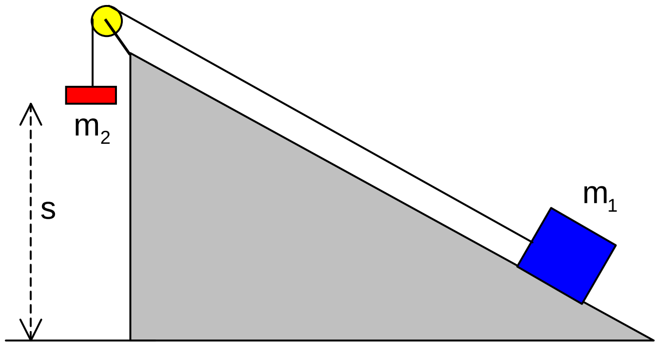
$$s_3 = \tfrac{1}{2}a{t_3}^2 = \tfrac{1}{2} \cdot 4{,}1\frac{m}{s^2} \cdot 0{,}27^2\text{ s}^2 = 0{,}15\text{ m}$$

2. Bewegung mit äußerem Antrieb

BEISPIEL 2:

m_1 und m_2 seien durch eine nahezu masseloses Seil und eine Rolle miteinander verbunden.

Die schiefe Ebene habe einen Neigungswinkel von $\alpha = 30^\circ$.
Der Gleitreibungskoeffizient sei f = 0,2.



a) Welches Vielfache von m_1 muß m_2 sein, damit die Bewegung so abläuft, daß m_1 die Ebene hinaufgezogen wird.

b) Es sei nun $m_2 = m_1$. Bereche dazu die Beschleunigung a_1.
Nach welcher Zeit hat die Anordnung die Strecke $s_1 = 0{,}5$ m zurückgelegt.

c) Der Körper mit der Masse m_2 setzt nach diesen 0,5 m auf dem Boden auf.
Ab diesem Moment gleitet m_1 alleine und gebremst den Hang hinauf.
Wie weit kommt er dann noch ? (Die Schnur denken wir uns dann nicht vorhanden)

d) Anschließend gleitet er wieder den Hang hinab so lange, bis die Schnur wieder gespannt ist. Dann gibt es einen Ruck und m_1 wird angehoben.
Mit welcher Geschwindigkeit erreicht m_2 den Punkt, an dem m_2 wieder in Bewegung kommt?

e) Zeichne ein v-t-Diagramm für diesen Bewegungsablauf.

LÖSUNG:

a) Die Gewichtskraft G_2 von m_2 zieht. Die Hangabtriebskraft H_1 von m_1 und die Gleitreibungskraft bremsen. Die Aufwärtsbewegung kommt dann zustande, wenn gilt:

$$G_2 > H_1 + R_1$$
$$m_2 g > m_1 \cdot g \cdot \sin\alpha + f \cdot m_1 \cdot g \cdot \cos\alpha$$
$$m_2 > m_1 \cdot 0{,}5 + 0{,}2 \cdot m_1 \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{3}$$
$$m_2 > 0{,}5\, m_1 + 0{,}17\, m_1 = 0{,}67\, m_1$$

b) Für $m_1 = m_2$ folgt:

$$a_1 = \frac{G_2 - H_1 - R_1}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 g - m_1 g \cdot \sin\alpha - f \cdot m_1 g \cdot \cos\alpha}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 g - m_1 g \cdot \sin\alpha - f \cdot m_1 g \cdot \cos\alpha}{2m_1} =$$
$$a_1 = \frac{m_1 g(1 - \sin\alpha - f \cdot \cos\alpha)}{2m_1} = \frac{g(1 - \sin\alpha - f \cdot \cos\alpha)}{2} = 5\tfrac{m}{s^2} \cdot \left(1 - \sin 30^\circ - 0{,}2 \cdot \cos 30^\circ\right)$$
$$a_1 = 1{,}6\tfrac{m}{s^2}$$

$s_1 = 0{,}5$ m wird dann in der Zeit t_1 zurückgelegt:

$$s = \tfrac{1}{2}at^2 \;\Rightarrow\; t_1 = \sqrt{\frac{2s_1}{a_1}} = \sqrt{\frac{1}{1{,}6}}\,s = 0{,}79\ s$$

Dann haben die beiden Massen die Geschwindigkeit v_1 :

$$v_1 = a_1 \cdot t_1 = 1{,}6\,\tfrac{m}{s^2} \cdot 0{,}79\ s \approx 1{,}26\,\tfrac{m}{s}.$$

c) Nachdem m_1 unten aufgesetzt hat, vollzieht m_2 eine gleichmäßig verzögerte Bewegung. Berechnung der Bremsverzögerung:

$$a_2 = \frac{H_2 + R_2}{m_2} = \frac{m_2 \cdot g \cdot \sin\alpha + f \cdot m_2 \cdot g \cdot \cos\alpha}{m_2} = \frac{m_2 \cdot g \cdot (\sin\alpha + f \cdot \cos\alpha)}{m_2}$$

$$a_2 = g \cdot (\sin\alpha + f \cdot \cos\alpha) = 6{,}73\,\tfrac{m}{s^2}$$

m_2 beginnt die Bremsbewegung mit der Geschwindigkeit $v_2 = 1{,}26\,\tfrac{m}{s}$
und gleitet dann bis zum Halten.

Die umgekehrte Bewegung ist dann eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung aus dem Haltepunkt heraus nach unten. Für sie gilt diese Gleichung:

$$v = \sqrt{2as} \;\Rightarrow\; s_2 = \frac{{v_2}^2}{2a_2} = \frac{1{,}26^2}{2 \cdot 6{,}73}\,m = 0{,}12\ m$$

m_2 gleitet also nur noch etwa 12 cm weiter und hält dann.
Dazu benötigt m_2 die Zeit t_2 :

$$v_2 = a_2 \cdot t_2 \;\Rightarrow\; t_2 = \frac{v_2}{a_2} = \frac{1{,}26}{6{,}73}\,s = 0{,}18\ s$$

d) Bei der Abwärtsbewegung wird die Hangabtriebskraft zur alleinigen Zugkraft, während nur die Reibung bremst:

$$a_3 = \frac{H_2 - R_2}{m_2} = \frac{m_2 \cdot g \cdot \sin\alpha - f \cdot m_2 \cdot g \cdot \cos\alpha}{m_2} = \frac{m_2 \cdot g \cdot (\sin\alpha - f \cdot \cos\alpha)}{m_2}$$

$$a_3 = g \cdot (\sin\alpha - f \cdot \cos\alpha) = 3{,}3\,\tfrac{m}{s^2}$$

Die Beschleunigung beginnt aus der Ruhe heraus, also gilt:

$$v_3 = \sqrt{2a_3 s_2} = \sqrt{2 \cdot 3{,}3\,\tfrac{m}{s^2} \cdot 0{,}12\ m} = 0{,}89\,\tfrac{m}{s}$$

Dazu braucht m_2 die Zeit t_3 :

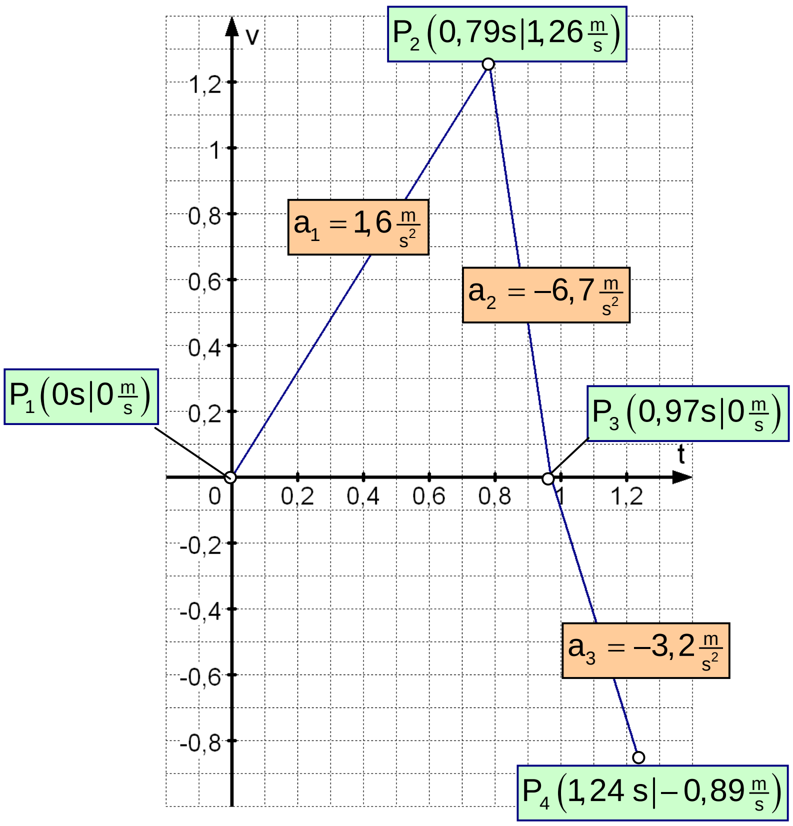
$$v_3 = a_3 \cdot t_3 \;\Rightarrow\; t_3 = \frac{v_3}{a_3} = \frac{0{,}89\,\tfrac{m}{s}}{3{,}3\,\tfrac{m}{s^2}} = 0{,}27\ s$$

e) Für das v-t-Diagramm machen wir eine Tabelle:

Zeit	0s	0,79 s	0,79s+0,18s = 0,97s	0,97s+0,27s = 1,24s
v	$0\,\frac{m}{s}$	$1{,}26\,\frac{m}{s}$	$0\,\frac{m}{s}$	$-0{,}89\,\frac{m}{s}$

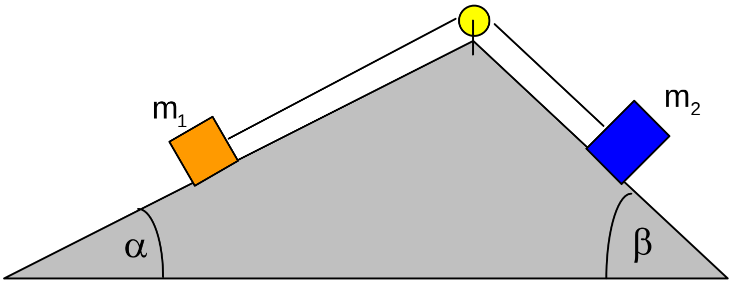
Die Verbindungslinien im v-t-Diagramm sind Geraden bzw. Strecken.
Wegen v = at gibt a die Steigungszahl an.

Wir übertragen nun einfach diese 4 Wertepaare als Punkte in ein v-t-Diagramm:



BEISPIEL 3:

Nebenstehende Anordnung hat die Winkel $\alpha = 30^O$ und $\beta = 45^O$.



a) Zunächst nehmen wir an, daß die Bewegung reibungsfrei ausgeführt werden kann. Wir wollen errechnen, wie groß die Masse m_2 sein muß, damit die Anordnung eine Beschleunigung nach rechts erfahren kann.

b) Nun lassen wir Gleitreibung mit f = 0,25 zu. Und es sei wieder $m_2 = k\, m_1$. Untersuche, für welche Werte von k sich die Anordnung nach links bzw. rechts in Bewegung setzt. Zeige ausführlich, warum für k = 1 keine Bewegung entstehen kann.

c) Nun sei k = 2. Berechne die Beschleunigung, gib die Bewegungsrichtung an.

LÖSUNG:

a) Wenn sich die Anordnung nach rechts bewegen soll, muß gelten: $H_2 > H_1$,

$$m_2 g \cdot \sin 45^O > m_1 \cdot g \cdot \sin 30^O \quad \Big| : g$$

mit dem Ansatz $m_2 = k \cdot m_1$ folgt:

$$k m_1 \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{2} > m_1 \cdot \tfrac{1}{2} \quad \Big| \cdot 2$$

also

$$k \cdot \sqrt{2} > 1 \quad \Big| : \sqrt{2}$$

$$k > \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2}\sqrt{2} = 0{,}707\,.$$

Ergebnis: Wenn die Masse $m_2 > 0{,}707 \cdot m_1$ ist, gleiten die Massen nach rechts. Ist $m_2 < 0{,}707\, m_1$, dann gleiten die Massen nach links.

b) Bewegung nach rechts: Bedingung: $H_2 > H_1 + R_1 + R_2$

d.h. $m_2 g \cdot \sin 45^O > m_1 g \cdot \sin 30^O + f \cdot m_1 g \cdot \cos 30^O + f \cdot m_2 g \cdot \cos 45^O \quad \Big| : g$

d.h. $k m_1 \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{2} > m_1 \cdot \tfrac{1}{2} + 0{,}25 \cdot m_1 \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{3} + 0{,}25 \cdot k m_1 \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{2} \quad \Big| .m_1$

d.h. $0{,}707 \cdot k > 0{,}5 + 0{,}217 + 0{,}177 \cdot k$

d.h. $0{,}53 \cdot k \cdot m_1 > 0{,}717 \cdot m_1$

d.h. $k > \dfrac{0{,}717}{0{,}53} = 1{,}35$

Ergebnis: Wenn $m_2 > 1{,}35\, m_1$ ist, dann setzt sich die Anordnung nach rechts in Bewegung.

Bewegung nach links unter der Bedingung: $H_1 > H_2 + R_1 + R_2$

d.h. $m_1 g \cdot \sin 30^O > m_2 g \cdot \sin 45^O + f \cdot m_1 g \cdot \cos 30^O + f \cdot m_2 g \cdot \cos 45^O \quad | : g$

Mit $m_2 = k \cdot m_1$:

d.h. $m_1 \cdot \frac{1}{2} > k \cdot m_1 \cdot \frac{1}{2}\sqrt{2} + 0{,}25 \cdot m_1 \cdot \frac{1}{2}\sqrt{3} + 0{,}25 \cdot k \cdot m_1 \cdot \frac{1}{2}\sqrt{2} \quad | : m_1$

d.h. $\frac{1}{2} > 0{,}707 \cdot k + 0{,}217 + 0{,}177 \cdot k$

d.h. $0{,}238 > 0{,}884 \cdot k$

d.h. $k < \dfrac{0{,}238}{0{,}884} = 0{,}32$

Ergebnis: Wenn $m_2 < 0{,}28\ m_1$ ist, dann setzt sich die Anordnung nach links in Bewegung.

Mit anderen Worten: Für alle Werte von k mit $0{,}32 \le k \le 1{,}35$ ist keine beschleunigende Kraft vorhanden, weil die bremsenden Kräfte in ihrer Summe größer sind als die Antriebskraft, die ja nur eine der beiden Hangabtriebskräfte sein kann.

Im Beispiel: $k = 1$, also $m_2 = m_1$.

Der Versuch, eine Bewegung nach links zu erzeugen, ergibt die Bescheunigungskraft:

$$F_{rechts} = H_2 - H_1 - R_1 - R_2 = m_2 g \cdot \sin 45^O - m_1 g \cdot \sin 30^O - f \cdot m_1 g \cdot \cos 30^O - f \cdot m_2 g \cdot \cos 45^O$$

$$F_{rechts} = m_1 g\left(\tfrac{1}{2}\sqrt{2} - \tfrac{1}{2} - 0{,}25 \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{3} - 0{,}25 \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{2}\right) = m_1 \cdot g \cdot (-0{,}186) < 0$$

Diese negative Kraft zeigt, daß die Beschleunigungskraft zu klein ist, so daß dieser Ansatz keinen Sinn macht.

Der Versuch, eine Bewegung nach links zu erzeugen ergibt die Bescheunigungskraft:

$$F_{links} = H_1 - H_2 - R_1 - R_2 = m_1 g \cdot \sin 30^O - m_2 g \cdot \sin 45^O - f \cdot m_1 g \cdot \cos 30^O - f \cdot m_2 g \cdot \cos 45^O$$

$$F_{links} = m_1 g\left(\tfrac{1}{2} - \tfrac{1}{2}\sqrt{2} - 0{,}25 \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{3} - 0{,}25 \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{2}\right) = m_1 \cdot g \cdot (-0{,}6) < 0$$

Diese negative Kraft zeigt, daß die Beschleunigungskraft zu klein ist, so daß dieser Ansatz keinen Sinn macht.

Ergebnis: Für $k = 1$, also $m_2 = m_1$ erhält man keine Bewegung.

c) Für $k = 2$ gilt $m_2 = 2 \cdot m_1$.

Berechnung der Beschleunigung:

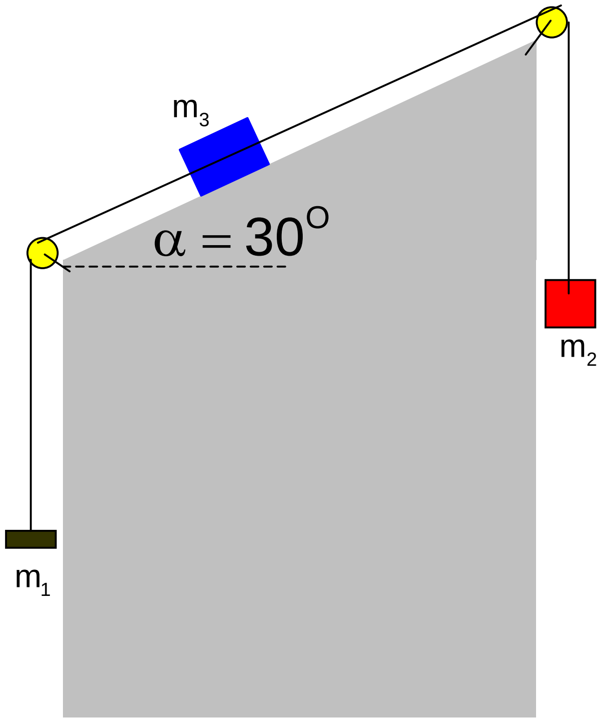
$$a = \frac{H_2 - H_1 - R_1 - R_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 \cdot g \cdot \sin 45^O - m_1 \cdot g \cdot \sin 30^O - f \cdot m_1 g \cdot \cos 45^O - f \cdot m_2 g \cdot \cos 30^O}{m_1 + m_2}$$

$$a = \frac{2m_1 \cdot g \cdot \frac{1}{2}\sqrt{2} - m_1 \cdot g \cdot \frac{1}{2} - 0{,}25 \cdot m_1 g \cdot \frac{1}{2}\sqrt{2} - 0{,}25 \cdot 2m_1 g \cdot \frac{1}{2}\sqrt{3}}{m_1 + 2m_1}$$

$$a = \frac{\cancel{m_1} g \cdot \left(\sqrt{2} - \frac{1}{2} - 0{,}25 \cdot \frac{1}{2}\sqrt{2} - 0{,}25 \cdot \sqrt{3}\right)}{3\cancel{m_1}} = \frac{10\,\frac{m}{s^2} \cdot 0{,}304}{3} \approx 1\,\frac{m}{s^2}$$

BEISPIEL 4

In dieser Aufgabe wollen wir drei Konstellationen untersuchen.



Je nach Größe der Massen kann sich die Anordnung nach links oder nach rechts in Bewegung setzen. oder auch gar nicht. Dabei wollen wir die Haftreibung ganz außer acht lassen, jedoch berücksichtigen wir die Gleitreibung mit $f = 0{,}25$.

a) **<u>Konstellation 1</u>**:

Es sei $m_1 = m$, $m_3 = 4\,m$ und $m_2 = k \cdot m$.

Untersuche, für welches k eine Bewegung nach rechts entsteht.

Welches k folgt aus der Beschleunigung $a = 1{,}13\,\frac{m}{s^2}$ bei der Rechtsbewegung ?

b) Finde eine Zahl k, so daß die sich Anordnung nach links bewegt.

c) Gib ein k an, das zu keiner Bewegung führt.
Was passiert bei $k = 2{,}13$ und $k = 3{,}87$?

Lösung:

Bedingung für die Bewegung nach rechts:

$$G_2 > H_3 + R_3 + G_1$$
$$k \cdot mg > 4mg \cdot \sin 30^O + f \cdot 4mg \cdot \cos 30^O + mg \quad |: mg$$
$$k > 4 \cdot \tfrac{1}{2} + 0{,}25 \cdot 4 \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{3} + 1$$
$$k > 3{,}866$$

Nun sei $a = 1{,}13\,\frac{m}{s^2}$ und die Anordnung fahre nach rechts. Dann gilt:

$$a = \frac{G_2 - H_3 - R_3 - G_1}{m_1 + m_2 + m_3} = \frac{k \cdot mg - 4mg \cdot \sin 30^O - f \cdot 4mg \cdot \cos 30^O - mg}{m + km + 4m}$$

$$a = \frac{\left(k - 4 \cdot \frac{1}{2} - 0{,}25 \cdot 4 \cdot \frac{1}{2}\sqrt{3} - 1\right)\cancel{m}g}{(5+k)\cancel{m}} = \frac{\left(k - 2 - \frac{1}{2}\sqrt{3} - 1\right)g}{(5+k)}$$

$$(5+k)a = \left(k \underbrace{-2 - \tfrac{1}{2}\sqrt{3} - 1}_{-3{,}87}\right)g$$

Jetzt setzen wir $a = 1{,}13\,\frac{m}{s^2}$ ein und lösen die Gleichung nach k auf:

$$5 \cdot 1{,}13\,\tfrac{m}{s^2} + k \cdot 1{,}13\,\tfrac{m}{s^2} = k \cdot 10\,\tfrac{m}{s^2} - 38{,}7\,\tfrac{m}{s^2} \quad \Big| : \tfrac{m}{s^2}$$

$$5 \cdot 1{,}13 + 38{,}7 = k \cdot 10 - k \cdot 1{,}13$$

$$8{,}87 \cdot k = 44{,}35$$

$$k = 5.$$

b) Bei einer Bewegung nach links haben wir zwei Antriebskräfte: G_1 und H_3 , während R_3 und G_2 bremsen. Es gilt die Bedingung:

$$G_1 + H_3 > R_3 + G_2$$

$$m_1 g + m_3 g \cdot \sin 30^O > f \cdot m_3 g \cdot \cos 30^O + m_2 g$$

$$mg + 4mg \cdot \tfrac{1}{2} > 0{,}25 \cdot 4mg \cdot \tfrac{1}{2}\sqrt{3} + kmg \quad \Big| : mg$$

$$1 + 2 > \tfrac{1}{2}\sqrt{3} + k$$

$$k < 3 - \tfrac{1}{2}\sqrt{3} = 2{,}13$$

Also bewegen sich beispielsweise die Körper nach links, wenn k = 2 ist.

c) Nach a) und b) beweg sich die Anordnung gar nicht, wenn gilt: 2,13 < k < 3,866, also zum Beispiel für k = 3.

Für k = 2,13 haben wir nach links Kräftegleichgewicht, und für k = 3,866 nach rechts. Das bedeutet, daß die Körper ihren Bewegungszustand nicht ändern. Sind sie in Ruhe, bleiben sie es, erhalten sie einen Anstoß, so daß die Haftreibungskraft überwunden wird, dann bewegen sie sich anschließend mit der so erreichten Geschwindigkeit gleichförmig weter. !