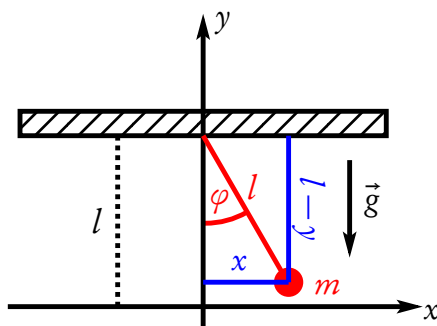


## Übungen zur Theoretischen Physik 1 für das Lehramt L3 Lösungen zu Blatt 4

### Aufgabe 1 (10 Punkte): Fadenpendel

Wir betrachten einen Massenpunkt, der an einem masselosen Faden der Länge  $l$  an der Decke im homogenen Schwerfeld der Erde befestigt ist.



- (a) Zeigen Sie, dass  $V = mgy$  das Potential der Schwerkraft ist.

**Lösung:** Die Schwerkraft ist  $\vec{F} = -mg\vec{e}_y$ . Es ist

$$\underline{F} = -\underline{\nabla}V = -\begin{pmatrix} \partial_x V \\ \partial_y V \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} 0 \\ mg \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Offensichtlich ist also  $V = V(y)$  mit  $V'(y) = mg$ . Damit ist bis auf eine physikalisch irrelevante Integrationskonstante  $V = mgy$ .

- (b) Parametrisieren Sie nun den Ortsvektor des Massenpunktes mit dem in der obigen Zeichnung eingezeichneten Winkel  $\varphi$  und zeigen Sie, dass

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = l \begin{pmatrix} \sin \varphi \\ 1 - \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (2)$$

ist.

**Lösung:** Aus der Skizze liest man sofort ab, dass  $x = l \sin \varphi$  und  $l - y = l \cos \varphi$  und folglich  $y = l(1 - \cos \varphi)$  ist, und das war zu zeigen.

- (c) Berechnen Sie die kinetische Energie  $T = m\dot{\underline{x}}^2/2$ .

**Lösung:** Wir leiten (2) nach  $t$  ab. Mit der Kettenregel erhalten wir

$$\underline{\dot{x}} = l\dot{\varphi} \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Daraus folgt für die kinetische Energie

$$T = \frac{m}{2}\dot{\underline{x}}^2 = \frac{m}{2}l^2\dot{\varphi}^2(\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = \frac{ml^2}{2}\dot{\varphi}^2. \quad (4)$$

(d) Mit dem Energiesatz

$$E = \frac{m}{2} \dot{x}^2 + V(y) = \text{const} \quad (5)$$

folgt  $\dot{E} = 0$ . Zeigen Sie damit, dass die Bewegungsgleichung

$$\ddot{\varphi} = -\frac{g}{l} \sin \varphi \quad (6)$$

gilt.

**Lösung:** Es ist mit (4)  $V = mgy = mgl(1 - \cos \varphi)$

$$E = \frac{ml^2}{2} \dot{\varphi}^2 + mgl(1 - \cos \varphi). \quad (7)$$

Leiten wir dies nach der Zeit ab, erhalten wir mit dem Energiesatz

$$\dot{E} = ml^2 \dot{\varphi} \ddot{\varphi} + mgl \sin \varphi = ml^2 \dot{\varphi} \left( \ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \sin \varphi \right) = 0. \quad (8)$$

Von der trivialen Lösung  $\dot{\varphi} = 0$ , wo sich das Pendel nicht bewegt sondern einfach in der Gleichgewichtslage bei  $\varphi = 0$  verharrt, abgesehen, muss die Klammer verschwinden, und das führt auf (6).

(e) Lösen Sie die Bewegungsgleichung für kleine Auslenkungen um die Ruhelage, indem Sie die Näherung  $\sin \varphi \simeq \varphi$  für  $|\varphi| \ll 1$  verwenden.

**Lösung:** Für  $|\varphi| \ll 1$  können wir die Näherung  $\sin \varphi \simeq \varphi$  in (8) einsetzen. Dann vereinfacht sich die Bewegungsgleichung zur Gleichung für einen harmonischen Oszillator

$$\ddot{\varphi} = -\omega^2 \varphi \quad \text{mit} \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (9)$$

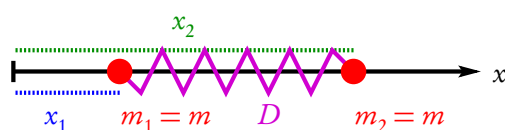
Die allgemeine Lösung lautet

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cos(\omega t) + \frac{\Omega}{\omega} \sin(\omega t). \quad (10)$$

Dabei sind  $\varphi_0 = \varphi(0)$  die Anfangsauslenkung und  $\Omega = \dot{\varphi}(0)$  die Anfangswinkelgeschwindigkeit des Pendels.

## Aufgabe 2: Zwei durch eine Feder verbundene Massen

Zwei Massenpunkte mit Massen  $m_1 = m_2 = m$  gleiten auf einer in  $x$ -Richtung orientierten Stange reibungsfrei (d.h. die Bewegung jedes Massenpunktes ist eindimensional und kann durch die Komponenten der diversen Vektoren in  $x$ -Richtung ausgedrückt werden) und sind durch eine Feder mit der Federkonstanten  $D$  verbunden. Die Länge der ungespannten Feder sei  $L_0$ .



- (a) Berechnen Sie die auf die Massenpunkte jeweils wirkende Federkraft, die proportional zur Längenänderung der Feder relativ zur Länge  $L_0$  ist (Federkonstante  $D$ ).

**Hinweis:** Bedenken Sie dabei genau die Richtung der Kraft!

**Lösung:** Aus der Skizze liest man ab, dass die Wechselwirkungskräfte  $\propto (x_2 - x_1 - L_0)$  sind. Die Kraft auf Teilchen 1 ist dabei für  $(x_2 - x_1 - L_0)$  in die positive  $x$ -Richtung gerichtet, denn die Feder bewirkt immer eine Kraft, die der Änderung ihre Länge gegenüber  $L_0$  *entgegengerichtet* ist. Damit haben wir

$$F_{12} = D(x_2 - x_1 - L_0) = -F_{21}. \quad (11)$$

- (b) Stellen Sie die Bewegungsgleichungen auf und rechnen Sie in Schwerpunkts- und Relativkoordinaten um und lösen Sie die entsprechenden Bewegungsgleichungen für allgemeine Anfangsbedingungen  $x_j(0) = x_{j0}$ ,  $\dot{x}_j(0) = v_{j0}$  ( $j \in \{1, 2\}$ ).

**Lösung:** Die Bewegungsgleichungen lauten gemäß Newtons 2. Axiom

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_1 &= F_{12} = D(x_2 - x_1 - L_0), \\ m\ddot{x}_2 &= F_{21} = -D(x_2 - x_1 - L_0). \end{aligned} \quad (12)$$

Die Schwerpunkts- und Relativkoordinaten sind per Definition

$$R = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad r = x_1 - x_2. \quad (13)$$

Umgekehrt folgt

$$x_1 = R + \frac{r}{2}, \quad x_2 = R - \frac{r}{2}. \quad (14)$$

Setzen wir dies in die Bewegungsgleichungen (12) ein, folgt durch Addition der Bewegungsgleichungen (12) nach einigen einfachen Umformungen

$$2m\ddot{R} = 0 \Rightarrow R(t) = R_0 + V_0 t \quad \text{mit} \quad R_0 = \frac{1}{2}(x_{10} + x_{20}), \quad V_0 = \frac{1}{2}(v_{10} + v_{20}) \quad (15)$$

und durch Subtraktion

$$\mu \ddot{r} = -D(r + L_0) \quad \text{mit} \quad \mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = \frac{m}{2}. \quad (16)$$

Die allgemeine Lösung der Bewegungsgleichung ergibt sich aus der Superposition der allgemeinen Lösung der homogenen Differentialgleichung

$$\mu \ddot{r} + Dr = 0 \quad (17)$$

und einer speziellen Lösung  $r(t) = L_0 = \text{const}$  der inhomogenen Differentialgleichung zu

$$r(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) - L_0 \quad \text{mit} \quad \omega = \sqrt{\frac{D}{\mu}}. \quad (18)$$

Die Zeitableitung ist

$$\dot{r}(t) = -A\omega \sin(\omega t) + B\omega \cos(\omega t). \quad (19)$$

Setzt man dies in die Anfangsbedingungen  $r(0) = r_0$  und  $\dot{r}(0) = v_0$  mit  $r_0 = r_{10} - r_{20}$  und  $v_0 = v_{10} - v_{20}$  ein, folgt nach kurzer Rechnung

$$A = r_0 + L_0, \quad B = \frac{v_0}{\omega} = v_0 \sqrt{\frac{\mu}{D}}. \quad (20)$$

(c) Berechnen Sie das Potential  $V(x_1 - x_2) = V(r)$  der Wechselwirkungskräfte.

**Lösung:** Definitionsgemäß gilt

$$F_{12} = -\frac{\partial}{\partial x_1} V(x_1 - x_2) = -V'(x_1 - x_2) = -V'(r) = D(x_2 - x_1 - L_0) = -D(r + L_0) \quad (21)$$
$$\Rightarrow V'(r) = D(r + L_0).$$

Durch Integration erhält man bis auf eine physikalisch irrelevante (*warum?*) Konstante

$$V(r) = \frac{D}{2}(r + L_0)^2. \quad (22)$$

(d) Welche Erhaltungssätze gelten für dieses System? Überprüfen Sie diese explizit anhand der Lösungen.

**Lösung:** Es gilt der Schwerpunktssatz bzw. die Gesamtimpulserhaltung, denn mit der Lösung der Bewegungsgleichung für den Schwerpunkt (13) folgt

$$P = m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2 = m(\dot{x}_1 + \dot{x}_2) = M\dot{R} = MV_0 = \text{const.} \quad (23)$$

Da die Wechselwirkungskraft ein Potential besitzt, gilt auch der Energiesatz. Dies rechnet man auch aus der Lösung der Bewegungsgleichung explizit nach. Die Definition der Gesamtenergie ist

$$E = T + V = \frac{m_1}{2} \dot{x}_1^2 + \frac{m_2}{2} \dot{x}_2^2 + V(r) = \frac{m}{2} (\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2) + V(r). \quad (24)$$

Rechnet man dies in Schwerpunkts- und Relativkoordinaten um, folgt nach einigen einfachen Umformungen

$$E = \frac{M}{2} V_0^2 + \frac{\mu}{2} \dot{r}^2 + \frac{D}{2} (r + L_0)^2 \quad (25)$$

Setzt man darin die Lösung für die Relativbewegung (18), folgt nach längeren aber einfachen Umformungen

$$E = \frac{M}{2} V_0^2 + \frac{\mu}{2} v_0^2 + \frac{D}{2} (r_0 + L_0)^2 = E_0 = \text{const.} \quad (26)$$

Der Energiesatz ist also, wie zu erwarten, erfüllt.