

**Lösungen zum 10. Übungsblatt  
Dynamik der Teilchen und Felder**

**1. Aufgabe:** a) Die verallgemeinerten Impulse  $p_j$  sind definiert durch

$$p_j := \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \quad (1)$$

Mit der Lagrange-Funktion

$$L = \frac{m}{2} \dot{\vec{x}}^2 = \frac{m}{2} \left\{ \dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta + r^2 \dot{\theta}^2 \right\} \quad (2)$$

erhalten wir dann also:

$$\begin{aligned} p_r &= \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} = m \dot{r} \\ p_\varphi &= \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} = m r^2 \sin^2 \theta \dot{\varphi} \\ p_\theta &= \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m r^2 \dot{\theta} \end{aligned} \quad (3)$$

b) Nach Definition ist

$$H = \sum_{i=1}^f p_i \dot{q}_i - L$$

In unserem Fall haben wir also

$$\begin{aligned} H &= p_r \dot{r} + p_\varphi \dot{\varphi} + p_\theta \dot{\theta} - \frac{m}{2} \left\{ \dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta + r^2 \dot{\theta}^2 \right\} \\ &= m \dot{r}^2 + m r^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta + m r^2 \dot{\theta}^2 - \frac{m}{2} \left\{ \dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta + r^2 \dot{\theta}^2 \right\} \\ &= \frac{m}{2} \left\{ \dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta + r^2 \dot{\theta}^2 \right\} \\ &= \frac{p_r^2}{2m} + \frac{p_\varphi^2}{2m r^2 \sin^2 \theta} + \frac{p_\theta^2}{2m r^2} \\ &= \frac{1}{2m} \left\{ p_r^2 + \frac{p_\varphi^2}{r^2 \sin^2 \theta} + \frac{p_\theta^2}{r^2} \right\} = H(r, \varphi, \theta, p_r, p_\varphi, p_\theta) \end{aligned}$$

c) Die Hamiltonschen Gleichungen lauten

$$\dot{q}_j = \frac{\partial H}{\partial p_j} \quad (4)$$

$$\dot{p}_j = - \frac{\partial H}{\partial q_j} \quad (5)$$

Wir haben

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial p_r} &= \frac{p_r}{m} \\ \frac{\partial H}{\partial p_\varphi} &= \frac{p_\varphi}{m r^2 \sin^2 \theta} \\ \frac{\partial H}{\partial p_\theta} &= \frac{p_\theta}{m r^2} \end{aligned} \quad (6)$$

und

$$\begin{aligned}\frac{\partial H}{\partial r} &= -\frac{1}{mr^3} \left\{ \frac{p_\varphi^2}{\sin^2 \theta} + p_\theta^2 \right\} \\ \frac{\partial H}{\partial \varphi} &= 0 \\ \frac{\partial H}{\partial \theta} &= -\frac{p_\varphi^2 \cos \theta}{mr^2 \sin^3 \theta}\end{aligned}\tag{7}$$

Also bekommen wir die Gleichungen

$$\begin{aligned}\dot{r} &= \frac{p_r}{m} \\ \dot{\varphi} &= \frac{p_\varphi}{mr^2 \sin^2 \theta} \\ \dot{\theta} &= \frac{p_\theta}{mr^2}\end{aligned}\tag{8}$$

und

$$\begin{aligned}\dot{p}_r &= +\frac{1}{mr^3} \left\{ \frac{p_\varphi^2}{\sin^2 \theta} + p_\theta^2 \right\} \\ \dot{p}_\varphi &= 0 \\ \dot{p}_\theta &= +\frac{p_\varphi^2 \cos \theta}{mr^2 \sin^3 \theta}\end{aligned}\tag{9}$$

d) Die Gleichungen (8) sind äquivalent zu den Definitionen der verallgemeinerten Impulse in (3). Diese Definitionen setzen wir auf der linken und der rechten Seite von (9) ein und wir sollten dann die Bewegungsgleichungen

$$\begin{aligned}\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta - r\dot{\theta}^2 &= 0 \\ \frac{d}{dt} \{ r^2 \dot{\varphi} \sin^2 \theta \} &= 0 \\ \frac{d}{dt} \{ r^2 \dot{\theta} \} - r^2 \dot{\varphi}^2 \sin \theta \cos \theta &= 0.\end{aligned}\tag{10}$$

bekommen. Aus der ersten Gleichung von (9) erhalten wir

$$\begin{aligned}m\ddot{r} &= +\frac{1}{mr^3} \left\{ \frac{p_\varphi^2}{\sin^2 \theta} + p_\theta^2 \right\} \\ &= +\frac{1}{mr^3} \left\{ \frac{(mr^2 \sin^2 \theta \dot{\varphi})^2}{\sin^2 \theta} + (mr^2 \dot{\theta})^2 \right\} \\ &= +mr \left\{ \frac{(\sin^2 \theta \dot{\varphi})^2}{\sin^2 \theta} + \dot{\theta}^2 \right\}\end{aligned}$$

oder

$$\ddot{r} - r \{ \sin^2 \theta \dot{\varphi}^2 + \dot{\theta}^2 \} = 0\tag{11}$$

und das ist äquivalent zur ersten Gleichung in (10). Die zweite Gleichung von (9) ist

$$\frac{d}{dt} \{ mr^2 \sin^2 \theta \dot{\varphi} \} = 0\tag{12}$$

und das ist offensichtlich äquivalent zur zweiten Gleichung in (10). Und die dritte Gleichung von (9) ist

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \{ mr^2 \dot{\theta} \} &= +\frac{\cos \theta}{mr^2 \sin^3 \theta} p_\varphi^2 \\ &= +\frac{\cos \theta}{mr^2 \sin^3 \theta} (mr^2 \sin^2 \theta \dot{\varphi})^2 \\ &= mr^2 \cos \theta \sin \theta \dot{\varphi}^2\end{aligned}\tag{13}$$

und das ist offensichtlich äquivalent zur letzten Gleichung in (10).

**2.Aufgabe:** Die verallgemeinerten Impulse  $p_k$  sind gegeben durch

$$\begin{aligned} p_i &= \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \left\{ \sum_{j,k=1}^f \dot{q}_j \dot{q}_k t_{jk}(q) - V(q) \right\} \\ &= \sum_{k=1}^f \dot{q}_k t_{ik}(q) + \sum_{j=1}^f \dot{q}_j t_{ji}(q) - 0 \stackrel{t_{ji}(q)=t_{ij}(q)}{=} 2 \sum_{k=1}^f \dot{q}_k t_{ik}(q) \end{aligned}$$

Damit bekommen wir

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^f p_i \dot{q}_i &= \sum_{i=1}^f \left\{ 2 \sum_{k=1}^f \dot{q}_k t_{ik}(q) \right\} \dot{q}_i \\ &= 2 \sum_{i,k=1}^f \dot{q}_i \dot{q}_k t_{ik}(q) = 2T \end{aligned}$$

Also:

$$H = \sum_{i=1}^f p_i \dot{q}_i - L = 2T - (T - V) = T + V$$

und das Theorem ist bewiesen.