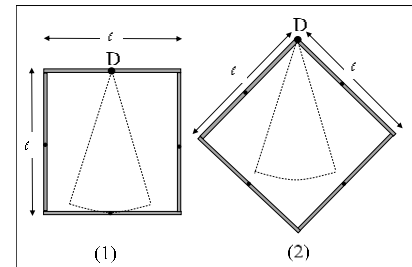


1. Der tiefste Punkt der Weltmeere liegt im Mariannengraben und hat eine Tiefe von 11.034 m. Prüfen Sie, ob man diesen Punkt durch Herablassen von Stahlseilen erreichen kann, ohne dass diese unter ihrer eigenen Gewichtskraft zerreißen. Die maximale Zugspannung der Seile soll  $\sigma_{\max} = 800 \text{ MN} / \text{m}^2$  betragen, die Dichte des Stahls  $7,86 \text{ g cm}^{-3}$ , die Dichte des Meerwassers  $1,05 \text{ g cm}^{-3}$ .

25 Punkte

2. Vier dünne homogene Stäbe mit gleicher Masse bilden quadratisch angeordnet die beiden rechts abgebildete physikalische Schwebpendel (1) und (2), die jeweils um den Drehpunkt D Drehschwingungen mit kleinen Winkelauslenkungen ausführen. Um wieviel Prozent unterscheidet sich die Schwingungsdauer des Pendels (2) von der des Pendels (1)?

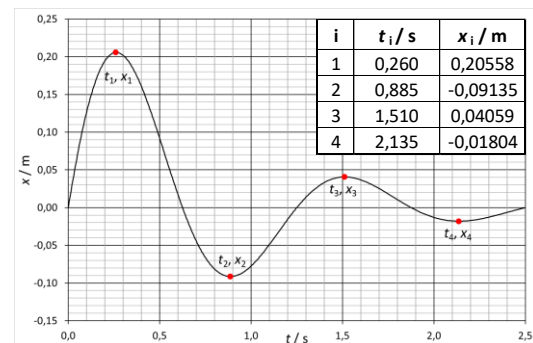


30 Punkte

3. Die Abbildung zeigt das Oszillogramm der viskos gedämpften Schwingung eines Federpendels mit der Masse  $m = 1 \text{ kg}$  und der Federkonstante  $D$ . Die Tabelle enthält die Koordinaten der lokalen Maxima und Minima.

Bestimmen Sie:

- das logarithmische Dekrement,
- die Periodendauer der gedämpften Schwingung,
- die Abklingkonstante und die Reibungskonstante,
- die Periodendauer der ungedämpften Schwingung,
- die Federkonstante  $D$ ,
- die Anfangsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt  $t = 0$ ,



25 Punkte

4. Eine Rüttelstrecke besitzt periodische sinusförmige Bodenwellen einer Höhe von  $h = 5 \text{ cm}$  und einer Periodenlänge von  $l = 2 \text{ m}$  auf. Die schwingende Masse eines Fahrzeugs (Masse mit Fahrer, jedoch ohne Räder) beträgt  $m_{\text{ges}} = 1250 \text{ kg}$ . Das Fahrzeug besitzt vier gleiche Einzelfedern (Federkonstante jeweils  $D_{\text{Rad}} = 10 \text{ kN m}^{-1}$ ) und vier gleiche Schwingungsdämpfer (Stoßdämpfer), die bewirken, dass der Wert der Abklingkonstante für die schwingende Masse 40% des Wertes von  $\omega_0$  beträgt ( $\beta = \delta = 0,4 \cdot \omega_0$ ).
- Bei welcher Geschwindigkeit erreicht das Fahrzeug das Resonanzmaximum? Welchen Wert besitzt die Schwingungsamplitude des Fahrzeugs im Resonanzmaximum?
  - Welchen Wert besitzt die Schwingungsamplitude bei der Geschwindigkeit  $v = 36 \text{ km h}^{-1}$ .

30 Punkte

Hilfsmittel: Eine der freigegebenen Physik 2-Formelsammlungen.  
 Taschenrechner nach Vorgab.

Bearbeitungshinweise: Der Lösungsweg muss erkennbar und nachvollziehbar sein.  
 Man kann  $g = 10 \text{ m s}^{-2}$  verwenden.

Die Aufgaben sind soweit wie möglich buchstabenmäßig durchzurechnen. Geben Sie die Ergebnisse der Zahlenrechnung mit sinnvoller Ziffernzahl an.

## Lösung:

1. Kräfte, die beim Zerreißen auf ein senkrecht ins Meerwasser herabgelassenes Stahlseil der Länge  $l$  wirken:

$$F_g - F_A = \sigma \cdot A$$

Mit:

$$F_g = \rho_{\text{Stahl}} \cdot V \cdot g = \text{Gewichtskraft}$$

$$F_A = \rho_{\text{MW}} \cdot V \cdot g = \text{Auftriebskraft}$$

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot l = \text{Volumen des eingetauchten Stahlseils}$$

$$A = \pi \cdot r^2 = \text{Querschnittsfläche des Stahlseils}$$

Einsetzen:

$$(\rho_{\text{Stahl}} - \rho_{\text{MW}}) \pi \cdot r^2 \cdot l \cdot g = \sigma \cdot \pi \cdot r^2$$

$$l = \frac{\sigma}{(\rho_{\text{Stahl}} - \rho_{\text{MW}}) \cdot g}$$

$$l = \frac{800 \cdot 10^6 \text{ kg s}^{-2} \text{ m}^{-1}}{(7,86 - 1,05) 10^3 \text{ kg m}^{-2} \cdot 10 \text{ m s}^{-2}} = 11,747 \text{ m}$$

**Antwort:** Ja, Stahlseile mit gegebenen Eigenschaften können den Meeresgrund erreichen.

Ohne Auftriebskraft hätte es nicht gereicht  $l_{\text{ohne Auftrieb}} = 10,178 \text{ m}$

2. **Pendel (1):** Physikalisches Pendel in Form eines Quadrats aus vier dünnen homogenen Stäben mit Drehpunkt im Schwerpunkt des oberen Stabs:

$$\omega_{0,1} \text{ für physikalisches Pendel: } \omega_{0,1} = \sqrt{\frac{m_{\text{ges}} \cdot g \cdot d}{J_{\text{ges}}}}$$

mit:

$$m_{\text{ges}} = 4 \cdot m_{\text{Stab}}$$

Der Drehpunkt liegt im Schwerpunkt des oberen Stabs. Der Schwerpunkt liegt im Zentrum des aus den vier Stäben gebildeten Quadrats.

$$\text{Abstand Schwerpunkt – Drehpunkt: } d = \frac{l}{2}$$

$$\text{gesamtes Massenträgheitsmoment: } J_{\text{ges}} = J_{\text{oben}} + 2 \cdot J_{\text{Seite}} + J_{\text{unten}}$$

$$J_{\text{oben}} \text{ für oberen Stab: } J_{\text{oben}} = \frac{1}{12} m_{\text{Stab}} l^2$$

$$J_{\text{Seite}} \text{ für seitlichen Stab: } J_{\text{Seite}} = J_S + m_{\text{Stab}} \cdot h^2$$

$$\text{mit } h = \text{Abstand Schwerp. – Drehp.: } h^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{1}{2} l^2$$

$$J_{\text{Seite}} = J_S + m_{\text{Stab}} \cdot h^2 = \frac{1}{12} m_{\text{Stab}} l^2 + \frac{1}{2} m_{\text{Stab}} \cdot l^2 = \frac{7}{12} m_{\text{Stab}} l^2$$

$$J_{\text{unten}} \text{ unteren Stab: } J_{\text{unten}} = J_S + m_{\text{Stab}} \cdot h^2$$

$$\text{mit } h = \text{Abstand Schwerp. – Drehp.: } h = l$$

$$J_{\text{unten}} = J_S + m_{\text{Stab}} \cdot h^2 = \frac{1}{12} m_{\text{Stab}} l^2 + m_{\text{Stab}} l^2 = \frac{13}{12} m_{\text{Stab}} l^2$$

Einsetzen für  $J_{\text{ges}}$ :

$$J_{\text{ges}} = \left(\frac{1}{12} + 2 \cdot \frac{7}{12} + \frac{13}{12}\right) \cdot m_{\text{Stab}} l^2 = \frac{28}{12} \cdot m_{\text{Stab}} l^2$$

$$J_{ges} = \frac{7}{3} \cdot m_{Stab} l^2$$

Eigenkreisfrequenz:

$$\omega_{0,1} = \sqrt{\frac{4 \cdot m_{Stab} \cdot g \cdot \frac{l}{2}}{\frac{7}{3} m_{Stab} \cdot l^2}} = \sqrt{\frac{12 \cdot m_{Stab} \cdot g}{14 \cdot m_{Stab} \cdot l}} = \sqrt{\frac{6}{7}} \cdot \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Schwingungsdauer:

$$T_{0,1} = \frac{2\pi}{\omega_{0,1}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{6}{7}}} \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 7}{6}} \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{14}{3}} \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

**Pendel (2):** Physikalisches Pendel in Form eines Quadrats aus vier dünnen homogenen Stäben mit Drehpunkt in einer der Ecken des Quadrats

$\omega_{0,2}$  für physikalisches Pendel:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{m_{ges} \cdot g \cdot d}{J_{ges}}}$$

Mit:

$$m_{ges} = 4 \cdot m_{Stab}$$

Der Drehpunkt liegt in einer der Ecken des Quadrats. Der Schwerpunkt liegt im Zentrum des aus den vier Stäben gebildeten Quadrats.

Abstand Schwerpunkt – Drehpunkt:

$$d = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} = \frac{l}{\sqrt{2}}$$

Gesamtes Massenträgheitsmoment:

$$J_{ges} = 2 \cdot J_{Seite\ oben} + 2 \cdot J_{Seite\ unten}$$

$J_{Seite\ oben}$  für die beiden oberen Stäbe:

$$J_{Seite\ oben} = \frac{1}{12} m_{Stab} l^2 + m_{Stab} \left(\frac{l}{2}\right)^2$$

$$J_{Seite\ oben} = m_{Stab} l^2 \cdot \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{4}\right) = \frac{1}{3} m_{Stab} l^2$$

$J_{Seite\ unten}$  für die beiden unteren Stäbe:

$$J_{Seite\ unten} = J_S + m_{Stab} \cdot h^2$$

mit  $h =$  Abstand Schwerp. – Drehp.:

$$h^2 = l^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{5}{4} \cdot l^2$$

$J$  für unteren Stab:

$$J_{Seite\ unten} = \frac{1}{12} m_{Stab} l^2 + \frac{5}{4} m_{Stab} l^2$$

$$J_{Seite\ unten} = \left(\frac{1}{12} + \frac{5}{4}\right) \cdot m_{Stab} l^2 = \frac{16}{12} m_{Stab} l^2 = \frac{4}{3} m_{Stab} l^2$$

Einsetzen für  $J_{ges}$ :

$$J_{ges} = \left(2 \cdot \frac{1}{3} + 2 \cdot \frac{4}{3}\right) \cdot m_{Stab} l^2 = \frac{10}{3} \cdot m_{Stab} l^2$$

Eigenkreisfrequenz:

$$\omega_{0,2} = \sqrt{\frac{4 \cdot m_{Stab} \cdot g \cdot \frac{l}{\sqrt{2}}}{\frac{10}{3} m_{Stab} \cdot l^2}} = \sqrt{\frac{12 \cdot m_{Stab} \cdot g}{10 \cdot \sqrt{2} \cdot m_{Stab} \cdot l}} = \sqrt{\frac{6}{5 \cdot \sqrt{2}}} \cdot \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Schwingungsdauer:

$$T_{0,2} = \frac{2\pi}{\omega_{0,2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{6}{5 \cdot \sqrt{2}}}} \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 5 \cdot \sqrt{2}}{6}} \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T_{0,2} = \pi \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot \sqrt{2}}{3}} \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Relativer Unterschied:

$$\frac{T_{0,2} - T_{0,1}}{T_{0,1}} = \frac{\pi \cdot \sqrt{\frac{g}{l}} \left( \sqrt{\frac{10 \cdot \sqrt{2}}{3}} - \sqrt{\frac{14}{3}} \right)}{\pi \cdot \sqrt{\frac{14}{3}} \cdot \sqrt{\frac{g}{l}}}$$

$$\frac{T_{0,2} - T_{0,1}}{T_{0,1}} = \left( \frac{\sqrt{10 \cdot \sqrt{2}} - \sqrt{14}}{\sqrt{3}} \right) \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{14}}$$

$$\frac{T_{0,2} - T_{0,1}}{T_{0,1}} = \frac{\sqrt{10 \cdot \sqrt{2}} - \sqrt{14}}{\sqrt{14}} = \sqrt{\frac{10 \cdot \sqrt{2}}{14}} - 1 = \sqrt{\frac{5 \cdot \sqrt{2}}{7}} - 1$$

Ergebnis:

$$\frac{T_{0,2} - T_{0,1}}{T_{0,1}} = \frac{\sqrt{5 \cdot \sqrt{2}}}{\sqrt{7}} - 1 = 0,00506 \hat{=} 0,51\%$$

3a. Logarithmisches Dekrement:

$$\Lambda = \ln \left( \frac{x_n}{x_{n+1}} \right)$$

$$\Lambda_1 = \ln \left( \frac{x_1}{x_3} \right) = \ln \left( \frac{0,20558}{0,04059} \right) = 1,6223$$

$$\Lambda_2 = \ln \left( \frac{|x_2|}{|x_4|} \right) = \ln \left( \frac{|-0,09135|}{|-0,01804|} \right) = 1,6221$$

Ergebnis:

$$\bar{\Lambda} = 1,6222$$

3b. Aus dem Diagramm und der Tabelle ergibt sich direkt die Periodendauer der gedämpften Schwingung:

$$T_{e,1} = t_3 - t_1 = (1,510 - 0,260) s = 1,25 s$$

$$T_{e,2} = t_4 - t_2 = (2,135 - 0,885) s = 1,25 s$$

Ergebnis:

$$T_e = 1,25 s$$

Eigenkreisfrequenz der gedämpften Schwingung:

$$\omega_e = \frac{2\pi}{T_e} = \frac{2\pi}{1,25 s} = 5,0265 s^{-1}$$

3c. Für das logarithmische Dekrement gilt:

$$\Lambda = \ln \left( \frac{x_n}{x_{n+1}} \right) = \beta \cdot T_e$$

Abklingkonstante:

$$\beta = \frac{\Lambda}{T_e} = \frac{1,6222}{1,25 s} = 1,2976 s^{-1}$$

Reibungskonstante:

$$b = \beta \cdot 2m = 1,2976 s^{-1} \cdot 2 kg = 2,5952 kg s^{-1}$$

3d. Es gilt:

$$\omega_e^2 = \omega_0^2 - \beta^2$$

Es folgt:

$$\frac{4\pi^2}{T_e^2} = \frac{4\pi^2}{T_0^2} - \beta^2$$

Periodendauer der ungedämpften Schwingung:

$$\frac{4\pi^2 + \beta^2 \cdot T_e^2}{T_e^2} = \frac{4\pi^2}{T_0^2}$$

$$T_0 = \sqrt{\frac{4\pi^2 \cdot T_e^2}{4\pi^2 + \beta^2 \cdot T_e^2}} = \frac{2\pi \cdot T_e}{\sqrt{4\pi^2 + \beta^2 \cdot T_e^2}}$$

$$T_0 = \frac{2\pi \cdot 1,25 s^2}{\sqrt{4\pi^2 + 1,2976^2 \cdot 1,25^2}} = 1,2103 s$$

3e. Eigenkreisfrequenz der ungedämpften Schwingung:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{D}{m}}$$

Federkonstante:

$$D = m \cdot \frac{4\pi^2}{T_0^2} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{4\pi^2}{1,2103 s^2} = 26,94 \text{ kg s}^{-2}$$

$$D = 26,94 \text{ kg s}^{-2} = 26,94 \text{ N m}^{-1}$$

3f. Amplitudenfunktion:

$$x(t) = x_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega_e \cdot t)$$

Für die lokalen Maxima und Minima gilt:

Koordinaten  $i = 1$ :

$$x_1 = x_0 \cdot e^{-\beta t_1} \cdot \sin(\omega_e \cdot t_1)$$

$$x_{0,1} = \frac{x_1 \cdot e^{+\beta t_1}}{\sin(\omega_e \cdot t_1)} = \frac{0,20558 \text{ m} \cdot e^{1,2976 s^{-1} \cdot 0,260 s}}{\sin(5,0265 s^{-1} \cdot 0,260 s)}$$

$$x_{0,1} = \frac{0,20558 \text{ m} \cdot 1,40126}{0,96538} = 0,2984 \text{ m}$$

Koordinaten  $i = 2$

$$x_{0,2} = \frac{x_2 \cdot e^{+\beta t_2}}{\sin(\omega_e \cdot t_2)} = \frac{-0,09135 \text{ m} \cdot e^{1,2976 s^{-1} \cdot 0,885 s}}{\sin(5,0265 s^{-1} \cdot 0,885 s)}$$

$$x_{0,2} = \frac{-0,09135 \text{ m} \cdot 3,1530}{-0,96537} = 0,2984 \text{ m}$$

Koordinaten  $i = 3$

$$x_{0,3} = \frac{x_3 \cdot e^{+\beta t_3}}{\sin(\omega_e \cdot t_3)} = \frac{0,04059 \text{ m} \cdot e^{1,2976 s^{-1} \cdot 1,510 s}}{\sin(5,0265 s^{-1} \cdot 1,510 s)}$$

$$x_{0,3} = \frac{0,04059 \text{ m} \cdot 7,09499}{0,96536} = 0,2983 \text{ m}$$

Koordinaten  $i = 4$

$$x_{0,4} = \frac{x_4 \cdot e^{+\beta t_4}}{\sin(\omega_e \cdot t_4)} = \frac{-0,01804 \text{ m} \cdot e^{1,2976 s^{-1} \cdot 2,135 s}}{\sin(5,0265 s^{-1} \cdot 2,135 s)}$$

$$x_{0,4} = \frac{-0,01804 \text{ m} \cdot 15,9646}{-0,96535} = 0,2983 \text{ m}$$

Ergebnis:

$$\bar{x}_0 = 0,29835 \text{ m}$$

Bemerkung: In der Klausur musste nur für ein Koordinatenpaar gerechnet werden.

Geschwindigkeitsfunktion:  $v(t) = \frac{d}{dt} x(t) = x_0 \cdot (-\beta) e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega_e \cdot t) + x_0 \cdot \omega_e \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos(\omega_e \cdot t)$

$$v(t) = x_0 \cdot e^{-\beta t} (\omega_e \cdot \cos(\omega_e \cdot t) - \beta \cdot \sin(\omega_e \cdot t))$$

Für  $t = 0$  gilt:

$$v(t=0) = x_0 \cdot \omega_e = 0,29835 \text{ m} \cdot 5,0265 \text{ s}^{-1}$$

$$v(t=0) = 1,4996 \text{ m s}^{-1} \cong 1,5 \text{ m s}^{-1}$$

**4a.** Das Fahrzeug besitzt eine schwingende Masse (Masse der Räder darin nicht enthalten) von:

$$m_{ges} = 1250 \text{ kg}$$

Federkonstante der Einzelfeder an jedem der vier Räder beträgt:

$$D_{Rad} = 10 \text{ kN m}^{-1} = 1 \cdot 10^4 \text{ N m}^{-1}$$

gesamte Federkonstante für die schwingende Masse des Fahrzeugs:

$$D_{ges} = 4 \cdot D_{Rad} = 40 \text{ kN m}^{-1} = 4 \cdot 10^4 \text{ N m}^{-1}$$

Eigenkreisfrequenz der ungedämpften Schwingung des Fahrzeugs:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D_{ges}}{m_{ges}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^4 \text{ N m}^{-1}}{1250 \text{ kg}}} = 5,6569 \text{ s}^{-1}$$

Abklingkonstante:

$$\beta = 0,4 \cdot \omega_0 = 0,4 \cdot 5,6569 \text{ s}^{-1} = 2,2627 \text{ s}^{-1}$$

Resonanzkreisfrequenz:

$$\omega_{Res} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \sqrt{5,6569^2 - 2 \cdot 2,2627^2} \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_{Res} = \sqrt{5,6569^2 - 2 \cdot 2,2627^2} \text{ s}^{-1} = 4,6649 \text{ s}^{-1}$$

Resonanzfrequenz:

$$f_{Res} = \frac{\omega_{Res}}{2\pi} = 0,7424 \text{ s}^{-1}$$

Periodendauer bei Resonanz:

$$T_{Res} = \frac{1}{f_{Res}} = \frac{1}{0,7424 \text{ s}^{-1}} = 1,3439 \text{ s}$$

Periodenlänge der Bodenwellen:  $l = 2 \text{ m}$

Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs im Resonanzmaximum entspricht der Geschwindigkeit, in der die Periodenlänge  $l = 2 \text{ m}$  der Bodenwellen in der Zeit  $T_{Res} = 1,3439 \text{ s}$  zurückgelegt wird:

$$v_{Res} = \frac{l}{T_{Res}} = \frac{2 \text{ m}}{1,3439 \text{ s}} = 1,4848 \text{ m s}^{-1}$$

Ergebnis für  $v_{Res}$ :

$$v_{Res} = 1,4848 \text{ m s}^{-1} \cong 1,5 \text{ m s}^{-1} = 5,3 \text{ km h}^{-1}$$

Resonanzüberhöhung = Amplitudenüberhöhung bei äußeren Anregungsfrequenz von

$$\omega_a = \omega_{Res}.$$

Amplitudenüberhöhung:

$$\frac{A(\omega_a, \omega_0, \beta)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta)} = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_a^2)^2 + (2 \cdot \beta \cdot \omega_a)^2}}$$

Resonanzüberhöhung:

$$\frac{A(\omega_a = \omega_{Res}, \omega_0, \beta)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta)} = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_{Res}^2)^2 + (2 \cdot \beta \cdot \omega_{Res})^2}}$$

Mit:

$$\omega_{Res}^2 = \omega_0^2 - 2\beta^2$$

Einsetzen:

$$\frac{A(\omega_a = \omega_{Res}, \omega_0, \beta)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta)} = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_0^2 + 2\beta^2)^2 + 4 \cdot \beta^2 \cdot (\omega_0^2 - 2\beta^2)}}$$

$$\frac{A(\omega_a = \omega_{Res}, \omega_0, \beta)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta)} = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{4\beta^4 + 4 \cdot \beta^2 \cdot \omega_0^2 - 8 \cdot \beta^4}}$$

$$\frac{A(\omega_a = \omega_{Res}, \omega_0, \beta)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta)} = \frac{1}{2 \cdot \frac{\beta}{\omega_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{\omega_0}\right)^2}}$$

Es gilt:  $\frac{\beta}{\omega_0} = 0,4$

$$\frac{A(\omega_a = \omega_{Res}, \omega_0, \beta = 0,4 \cdot \omega_0)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta = 0,4 \cdot \omega_0)} = \frac{1}{2 \cdot 0,4 \sqrt{1 - 0,4^2}} = 1,3638$$

Die Bodenwellen haben eine Höhe  $h = 5 \text{ cm}$ . Die Höhe  $h$  entspricht der Differenz vom Maximum minus Minimum. Näherungsweise ist also:

$$A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta) = 2,5 \text{ cm}$$

Für die Schwingungsamplitude des Fahrzeugs im Resonanzmaximum gilt also:

$$A(\omega_a = \omega_{Res}, \omega_0, \beta = 0,4 \cdot \omega_0) = 1,3638 \cdot 2,5 \text{ cm} = 3,40 \text{ cm}$$

**4b.** Bei der Geschwindigkeit  $v = 36 \text{ km h}^{-1} = 10 \text{ m s}^{-1}$  beträgt die Frequenz der

Frequenz der äußeren Erregung:  $f_a = \frac{v}{l} = \frac{10 \text{ m s}^{-1}}{2 \text{ m}} = 5 \text{ s}^{-1}$

Kreisfrequenz der Erregung:  $\omega_a = 2\pi \cdot f_a = 2\pi \cdot 5 \text{ s}^{-1} = 31,42 \text{ s}^{-1}$

$$\frac{\omega_a}{\omega_0} = \frac{31,42 \text{ s}^{-1}}{5,5669 \text{ s}^{-1}} = 5,6441$$

Amplitudenüberhöhung:

$$\frac{A(\omega_a, \omega_0, \beta)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta)} = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_a^2)^2 + (2 \cdot \beta \cdot \omega_a)^2}}$$

$$\frac{A(\omega_a, \omega_0, \beta)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta)} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega_0^2 - \omega_a^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{\beta}{\omega_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{\omega_a}{\omega_0}\right)^2}}$$

$$\frac{A(\omega_a, \omega_0, \beta)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta)} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_a}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{\beta}{\omega_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{\omega_a}{\omega_0}\right)^2}}$$

Ergebnis Amplitudenüberhöhung:  $\frac{A(\omega_a, \omega_0, \beta)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta)} = \frac{1}{\sqrt{(1 - 5,6441^2)^2 + 4 \cdot 0,4^2 \cdot 5,6441^2}}$

$$\frac{A(\omega_a, \omega_0, \beta)}{A_0(\omega_a = 0, \omega_0, \beta)} = 0,0321$$

Ergebnis Amplitude:

$$A(\omega_a = 31,42 \text{ s}^{-1}, \omega_0 = 5,6569 \text{ s}^{-1}, \beta = 0,4 \omega_0) = 0,0321 \cdot 2,5 \text{ cm}$$

$$A(\omega_a = 31,42 \text{ s}^{-1}, \omega_0 = 5,6569 \text{ s}^{-1}, \beta = 0,4 \omega_0) = 0,80 \text{ mm}$$