

I-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  $s = 260\text{ m}$  abgebremst. Entlang der Teststrecke werden folgende Weg-Zeit-Werte ermittelt:

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

- Skizzieren Sie die  $s$ - $t$ -,  $v$ - $t$ - und  $a$ - $t$ -Diagramme.
- Wie groß ist die Durchschnittsgeschwindigkeit auf der Teststrecke?
- Wie groß ist die Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  und die Beschleunigung  $a_0$ ?
- Wie groß ist die Höchstgeschwindigkeit  $v_E$  des Fahrzeugs?
- Mit welcher Verzögerung  $a_B$  wird das Fahrzeug abgebremst?

I-2. Zwei PKW (Nr. 1 und Nr. 2) fahren mit einer Geschwindigkeit von  $v = 144\text{ km h}^{-1}$  im Abstand  $\Delta x_1 = 45\text{ m}$  hintereinander her. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  muss PKW(1) plötzlich mit einer Beschleunigung von  $a_1 = -6,4\text{ m s}^{-2}$  bremsen. Nach einer Reaktionszeit von  $t_R = 1,5\text{ s}$  bremsst auch der PKW(2) so, dass er in  $\Delta x_2 = 10\text{ m}$  hinter PKW(1) zum Stillstand kommt. (PKW(1) steht also vorn, PKW(2) 10 m dahinter. Zur Vereinfachung betrachten Sie beide PKW als Massenpunkte, also als ausdehnungslos.)

- Zeichnen Sie die  $x$ - $t$ -,  $v$ - $t$ - und  $a$ - $t$ -Diagramme für beide PKW, wobei auch der prinzipielle Verlauf der Diagramme vor dem Zeitnullpunkt erkennbar sein sollte.
- Welche Bremsverzögerung muss PKW(2) haben, um wie gefordert, in  $\Delta x_2 = 10\text{ m}$  hinter PKW(1) zum Stillstand zu kommen?
- Prüfen Sie Ihr unter **b.** erhaltenes Ergebnis, indem Sie für beide PKW den nach dem Zeitnullpunkt zurückgelegten Wert bis zum Stillstand berechnen.
- Berechnen Sie die Anhaltezeiten für beide Fahrzeuge.

### Zusatzaufgaben

I-3. Zwei Fahrzeuge fahren mit gleicher Geschwindigkeit  $v_0 = 108\text{ km h}^{-1}$  an der Raststätte Harz der A7 im zeitlichen Abstand von 30 s vorbei (Fahrzeug 1 fährt voraus, Fahrzeug 2 folgt hinterher). Fahrzeug 1 beginnt auf der Höhe der Raststätte, mit der Bremsbeschleunigung  $-0,4\text{ m s}^{-2}$  abzubremsen, während Fahrzeug 2 seine Geschwindigkeit beibehält.

- Zeichnen Sie das Weg-Zeit Diagramm
- In welcher Distanz zur Raststätte Harz hat Fahrzeug 2 das Fahrzeug 1 eingeholt?

I-4. Zur Pfahlgründung bei Brücken oder Hafenanlagen verwendet man oft den "Freifallbären". Es handelt sich dabei um eine Ramme, bei der eine Masse entweder hydraulisch oder mit Dampf- oder Dieselwinden auf eine bestimmte Höhe gehoben und dann frei fallen gelassen wird. Man kann annehmen, dass der Hebevorgang einer gleichförmigen Bewegung entspricht.

Die Schlagzahl eines Freifallbären wird mit  $50\text{ min}^{-1}$  und die Hubgeschwindigkeit mit  $2\text{ m s}^{-1}$  angegeben. Wie groß ist der Fallweg?



Abb. 1 Historische Ramme

## Lösungen:

**I-1b.** Durchschnittsgeschwindigkeit:

$$\bar{v} = \frac{s_{ges}}{t_{ges}} = \frac{260 \text{ m}}{18 \text{ s}} = 14,44 \text{ m s}^{-1}$$

**I-1c.** Lösung für  $a_0$ :

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

Lösung für  $v_0$ :

$$v_0 = \frac{(55 - 15) \text{ m}}{5 \text{ s}} = 8 \text{ m s}^{-1}$$

**I-1d.** Lösung:

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

**I-1e.** Lösung:

$$a_B = -\frac{1}{2} \frac{v_E^2}{s_B} = -\frac{1}{2} \frac{20^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}}{40 \text{ m}} = -5 \text{ m s}^{-2}$$

**I-2a.** Lösung:

$$|a_2| > \frac{1600}{250 + 70 - 120} \text{ m s}^{-2} = \frac{1600}{200} \text{ m s}^{-2} = 8 \text{ m s}^{-2}$$

**I-2c.** Lösung für PKW(1)

$$x_{ges}^{PKW(1)} = \frac{1}{2} \frac{v_0^2}{|a_1|} = \frac{40^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}}{2 \cdot 6,4 \text{ m s}^{-2}} = 125 \text{ m}$$

Lösung für PKW(2)

$$x_{ges}^{PKW(2)} = 100 \text{ m} + 60 \text{ m} - 45 \text{ m} = 115 \text{ m}$$

**I-2d.** Bremszeit für PKW(1)

$$t_{ges,1} = \frac{v_0}{|a_1|} = \frac{40 \text{ m s}^{-1}}{6,4 \text{ m s}^{-2}} = 6,25 \text{ s}$$

Anhaltezeit für PKW(2)

$$t_{ges,2} = \frac{v_0}{|a_2|} + t_R = \frac{40 \text{ m s}^{-1}}{8 \text{ m s}^{-2}} + 1,5 \text{ s} = 5 \text{ s} + 1,5 \text{ s} = 6,5 \text{ s}$$

**I-3b.** Lösung

$$s_{\ddot{u}} = v_0 t_2 - v_0 t_1 = v_0 (t_2 - t_1) = 1112 \text{ m}$$

**I-4a.** Lösung:

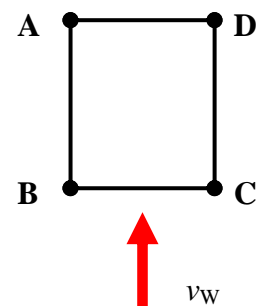
$$s_{0-} = 2,80 \text{ m} - 1,44 \text{ m} = 1,36 \text{ m}$$

- II-1. Eine Masse (1) wird bei  $t = 0\text{ s}$  aus einer Höhe von 10 m aus der Ruhe fallengelassen. Eine zweite Masse (2) wird genau in diesem Augenblick mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_{02}$  der fallenden Masse entgegen geschossen. Die Körper treffen in halber Höhe aufeinander.  
Nach welcher Zeit treffen sich die beiden Körper? Wie groß ist die Abschussgeschwindigkeit  $v_{02}$  der Masse (2)?
- II-2. Ein Tennisball soll 20 m senkrecht nach oben geworfen werden.
- Welche Anfangsgeschwindigkeit muss der Ball haben?
  - Wie weit fliegt ein Ball, der mit gleicher Anfangsgeschwindigkeit unter einem Winkel von  $60^\circ$  geworfen wird?
  - Wie weit könnte der Ball mit gleicher Anfangsgeschwindigkeit maximal geworfen werden? Unter welchem Winkel muss der Ball geworfen werden?

**Zusatzaufgaben**

- II-3. Ein Flugzeug fliegt vom Flughafen Hannover nach Berlin-Schönefeld. Die Entfernung beträgt 280 km, die Fluggeschwindigkeit  $210\text{ km h}^{-1}$ . Ohne Windeinfluss wäre die Kursrichtung  $90^\circ$  (Kursrichtung von West nach Ost). Während des Fluges herrscht jedoch Wind mit  $60\text{ km h}^{-1}$  aus  $180^\circ$  (aus Süden).
- Welchen Kurs muss das Flugzeug unter Berücksichtigung des Windes fliegen, um in der kürzesten Zeit Berlin-Schönefeld zu erreichen?
  - Welche Geschwindigkeit hat das Flugzeug über Grund?
  - Welche Zeit benötigt es mit Wind, und wie lange hätte der Flug ohne Windeinfluss gedauert?
- Hinweis:* Verwenden Sie die Vektordarstellung der Geschwindigkeiten in einem  $x$ - $y$ -Koordinatensystem.

- II-4. Ein Flugzeug fliegt den Kurs entlang der Punkte  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ . Die Seitenlänge des Quadrats beträgt 100 km, die Fluggeschwindigkeit  $200\text{ km h}^{-1}$ .
- Berechnen Sie die Flugzeit unter der Annahme, dass während des Fluges kein Seitenwind herrscht.
  - Berechnen Sie die Flugzeit unter der Annahme eines konstanten Seitenwindes  $v_w = 40\text{ km h}^{-1}$ , der senkrecht bezüglich der Strecken  $B \leftrightarrow C$  und  $A \leftrightarrow D$  wirkt.
  - Vergleichen Sie die unter **a.** und **b.** berechneten Flugzeiten. Überlegen Sie folgende Anwendung: Bei welchen Windbedingungen sollte man z. B. in der Leichtathletik Rekordbedingungen über Laufstrecken von 400 m haben?



- II-5. Die Festung Königstein in Sachsen besitzt einen berühmten Tiefbrunnen. Dessen Tiefe soll durch Abwurf eines schweren Gegenstands bestimmt werden, wobei die Luftreibungseffekte während des freien Falls vernachlässigt werden können. Für die Zeitdifferenz zwischen Loslassen des Gegenstands am oberen Brunnenrand (mit  $v(t=0) = 0$ ) und der Rückkehr des Auftreffschalls werden 6,0 s gemessen. Die Schallgeschwindigkeit beträgt  $c_0 = 343\text{ m s}^{-1}$ .  
Wie tief ist der Brunnen?

## Lösungen:

**II-1.** Lösung für  $t_1$ :

$$t_1 = \sqrt{\frac{y_0}{g}} = \sqrt{\frac{10\text{ m}}{10\text{ m s}^{-2}}} = 1\text{ s}$$

Lösung für  $v_{02}$ :

$$v_{02} = \frac{y_0}{2t_1} + \frac{1}{2} g t_1 = \sqrt{g y_0} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**II-2a.** Lösung:

$$v_{y0} = \sqrt{2 g y(t_H)} = 20\text{ m s}^{-1}$$

**II-2b.** Lösung:

$$x(t_{ges}) = v_{x0} t_{ges} = 8,66\text{ m}$$

**II-2c.** Lösung:

$$x(t_{ges}) = v_{x0} t_{ges} = 10\text{ m}$$

**II-3a.** Vorhaltewinkel:

$$\alpha = 16,6^\circ$$

Steuerkurs:

$$90^\circ + 16,6^\circ = 106,6^\circ$$

**II-3b.** Grundgeschwindigkeit:

$$v_G = \sqrt{v_F^2 - v_W^2} = \sqrt{210^2 - 60^2}\text{ km h}^{-1} = 201\text{ km h}^{-1}$$

**II-3c.** Flugzeit ohne Wind:

$$t_{ow} = \frac{s}{v_F} = \frac{280\text{ km}}{210\text{ km h}^{-1}} = 1,333\text{ h} = 80\text{ min}$$

Flugzeit mit Wind:

$$t_{mW} = \frac{s}{v_G} = \frac{280\text{ km}}{201\text{ km h}^{-1}} = 1,391\text{ h} = 83,5\text{ min}$$

**II-4a.** Gesamtweg:

$$s_{ges} = 4 \cdot s_0 = 400\text{ km}$$

Gesamtzeit:

$$t_{ges} = \frac{s_{ges}}{v_0} = 2\text{ h} = 7200\text{ s}$$

**II-4b.** Gesamtzeit:

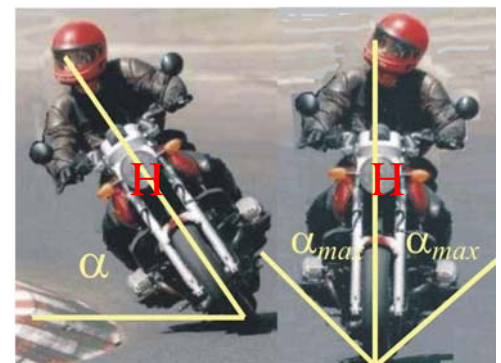
$$t_{ges} = 7424\text{ s}$$

**II-4c.** Die Zeiten mit Seitenwind sind auf einem Rundkurs immer länger als ohne Seitenwind. In Aufgabe II 4b. ist  $t_{ges}$  3,1% größer als  $t_{ges}$  von Aufgabe 1.a. Rekordversuche im Laufen über die 400 m Strecke (Rundkurs) in einem Stadion sollten deshalb möglichst bei Windstille unternommen werden.

**II-5.** Die Lösung zur negativen Wurzel  $s_{0-} = 154\text{ m}$  ist die gesuchte Brunntiefe.

- III-1.** Ein PKW wird auf einer 1000 m langen geraden Strecke getestet: Er wird von 0 km/h auf 120 km/h in 13,3 s beschleunigt, fährt anschließend mit konstanter Geschwindigkeit und wird auf den letzten 100 m bis zum Stillstand abgebremst.
- Skizzieren Sie die  $a$ - $t$ ,  $v$ - $t$  und  $s$ - $t$ -Diagramme.
  - Bestimmen Sie die Beschleunigung  $a_0$  und die Beschleunigungsstrecke  $s_a$ .
  - Wie lang ist der Streckenabschnitt, der mit konstanter Geschwindigkeit gefahren wird?
  - Wie groß sind die Bremsverzögerung  $a_b$  und die Bremszeit  $t_b$ ?
- Betrachten Sie jetzt eine Testfahrt auf einer kreisförmigen Strecke mit  $R = 120$  m:
- Wie groß ist die Gesamtbeschleunigung, wenn die Bahnbeschleunigung gleich der in Aufgabe **b** ermittelten Beschleunigung  $a_0$  der geraden Teststrecke ist und der Punkt der betrachtet werden soll, an dem die Bahngeschwindigkeit des Fahrzeugs  $v_t = 72 \text{ km h}^{-1}$  beträgt.
  - Wie groß ist die Gesamtbeschleunigung  $a_{ges}$ , kurz vor dem Erreichen der konstanten Bahngeschwindigkeit von  $v_t = 120 \text{ km h}^{-1}$ ? In welche Richtung zeigt der Beschleunigungsvektor? (Man verwende den Wert  $v_t = 120 \text{ km h}^{-1}$  für Bahngeschwindigkeit)
  - Wie groß ist die Gesamtbeschleunigung  $a_{ges}$ , kurz nach dem Erreichen der konstanten Bahngeschwindigkeit von  $v_t = 120 \text{ km h}^{-1}$ ? In welche Richtung zeigt der Beschleunigungsvektor? (Man verwende auch hier den Wert  $v_t = 120 \text{ km h}^{-1}$  für die Bahngeschwindigkeit)

- III-2.** Motorräder fahren üblicherweise Kurven mit einer Schräglage (charakterisiert durch den Winkel  $\alpha$  im Bild rechts), so dass die Resultierende aus dem negativen Vektor der Erdbeschleunigung  $-\vec{g}$  und Vektor der Radialbeschleunigung  $a_r$  (entspricht der Zentripetalbeschleunigung) parallel zur Hochachse (**H**) verläuft. Bauartbedingt kann im vorliegenden Beispiel die Schräglage  $\alpha_{max} = 45^\circ$  nicht überschritten werden.



- Betrachten Sie eine gleichmäßig beschleunigte Motorradfahrt auf einer Kreisstrecke mit Radius  $R = 62,5 \text{ m}$ . Das Motorrad startet aus dem Stand heraus und passiert in den Abständen von 10 m und 20 m Lichtschranken. Die Messung der Zeitdifferenz zwischen dem Passieren der Lichtschranken ergibt 1,0 s. Wie groß ist die Bahnbeschleunigung?
- Nach welcher Fahrtstrecke auf dem Kreis wird die maximale Schräglage  $\alpha_{max} = 45^\circ$  erreicht?
- Welche Gesamtbeschleunigung  $a_{ges}$  hat das Motorrad in diesem Punkt?
- Der Weg bis zum Erreichen der maximale Schräglage  $\alpha_{max} = 45^\circ$  sei  $S_{max}$ . Wie groß ist die Gesamtbeschleunigung nach der Wegstrecke  $S_{max}/2$  und welche Schräglage hat das Motorrad an diesem Punkt?

## Lösungen:

**III-1b.** Beschleunigung:

$$a_0 = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_0}{t_a} = \frac{33,33 \text{ m}}{13,3 \text{ s}^2} = 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Beschleunigungsstrecke:

$$s_a = \frac{1}{2} a_0 t_a^2 = 221,1 \text{ m}$$

**III-1c.** Strecke mit  $v_0$ :

$$s_v = s_1 - s_a = 900 \text{ m} - 221,1 \text{ m} = 678,9 \text{ m}$$

**III-1d.** Bremszeit:

$$t_b = -\frac{v_0}{a_b} = -\frac{33,33 \text{ m s}^{-1}}{-5,55 \text{ m s}^{-2}} = 6,00 \text{ s}$$

**III-1e.** Gesamtbeschleunigung:

$$a_{ges} = \sqrt{2,5^2 + 3,33^2} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4,16 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

**III-1f.** Gesamtbeschleunigung:

$$a_{ges} = \sqrt{2,5^2 + 9,25^2} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,59 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

(Das ist fast 1 g! Damit könnte schon knapp der Punkt erreicht sein, an dem die Reifen ihre Haftung verlieren und rutschen)

**III-1g.** Gesamtbeschleunigung:

$$a_{ges} = \sqrt{0^2 + 9,25^2} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,25 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Der Beschleunigungsvektor zeigt auf das Zentrum der Kreisbahn.

**III-2a.** Lösung:

$$a_{t-} = (-\sqrt{32} + 6) \cdot 10 \text{ m s}^{-2} = 3,43 \text{ m s}^{-2}$$

Nur für  $a_{t-} = 3,43 \text{ m s}^{-2}$  ist  $s(t_1) = 10 \text{ m}$  und  $s(t_1 + 1 \text{ s}) = 20 \text{ m}$  mit  $t_1 = 2,41 \text{ s}$ .

**III-2b.** Fahrtstrecke:

$$s_{\max} = \frac{1}{2} a_t t_{\max}^2 = \frac{1}{2} 3,43 \text{ m s}^{-2} (7,28 \text{ s})^2 = 91 \text{ m}$$

**III-2c.** Gesamtbeschleunigung:

$$a_{ges} = \sqrt{a_t^2 + a_R^2} = \sqrt{3,43^2 + 10^2} \text{ m s}^{-2} = 10,6 \text{ m s}^{-2}$$

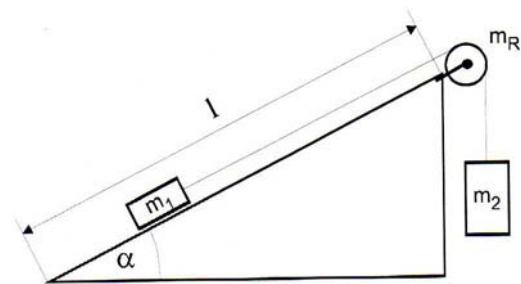
Bei dieser Gesamtbeschleunigung könnte der Fahrer schon erhebliche Probleme bekommen, da möglicherweise die maximale Haftreibungskraft der Reifen überschritten wird.

**III 2d.** Gesamtbeschleunigung:

$$a_{ges} = \sqrt{a_t^2 + a_R^2} = \sqrt{3,43^2 + 5^2} \text{ m s}^{-2} = 6,06 \text{ m s}^{-2}$$

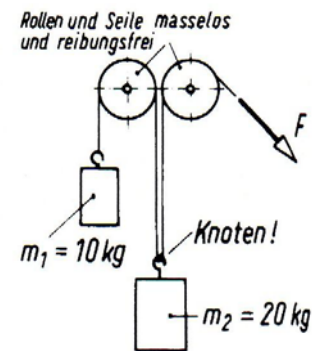
$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{2}\right) = 27^\circ$$

**IV-1.** Eine Masse ( $m_1 = 20 \text{ kg}$ ) wird von einem zweiten Körper (Masse  $m_2 = 25 \text{ kg}$ ) auf einer schiefen Ebene mit einem Neigungswinkel von  $\alpha = 15^\circ$  und der Länge  $l = 5 \text{ m}$  hochgezogen. Die Gleitreibungszahl beträgt  $\mu_G = 0,1$ . Die Masse der Rolle und des Seils soll vernachlässigt werden ( $m_R \cong 0$ ).



- Mit welcher Beschleunigung bewegen sich die Körper?
- Wie lange benötigt  $m_1$ , um die Strecke  $l$  zu durchlaufen?
- Wie groß ist die Seilkraft?

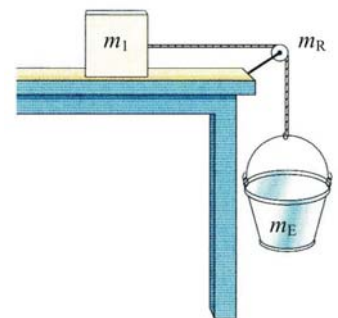
**IV-2.** Ein Körper  $m_2$  mit einer Masse von  $20 \text{ kg}$  wird durch die Gewichtskraft der Masse  $m_1 = 10 \text{ kg}$  an dem nach links und die Kraft  $F$  an dem nach rechts führenden Seilende angehoben. Das Seil und die Rollen seien masselos gedacht. Der Körper  $m_2$  ist mit einem Knoten am Seil befestigt.



- Mit welcher Kraft  $F$  muss an dem rechten Seilende gezogen werden, wenn sich der Körper  $m_2$  mit einer Beschleunigung  $a = \frac{g}{2}$  nach oben bewegen soll?

**Zusatzaufgaben**

**IV-3.** Eine Masse  $m_1 = 10 \text{ kg}$ , die auf einem Tisch ruht, ist über ein Seil mit einem Eimer (Masse des leeren Eimers  $m_E = 1 \text{ kg}$ ) verbunden. Das (masselose) Seil wird über eine zylinderförmige Umlenkrolle umgelenkt, deren Masse vernachlässigt werden kann.



- Die Haftreibungszahl der Masse  $m_1$  auf dem Tisch beträgt  $\mu_{H,\max} = 0,5$ . Welche Masse Wasser muss in den Eimer gefüllt werden, damit die Masse gleitet?
- Die Gleitreibungszahl der Masse  $m_1$  auf dem Tisch beträgt  $\mu_{H,\max} = 0,4$ . Wie groß ist die Beschleunigung, wenn der Eimer mit der in **a.** bestimmten Masse Wasser gefüllt ist?

**IV-1a.**

$$a = 10 \frac{m}{s^2} \cdot 0,3976 = 3,98 m s^{-2}$$

**IV-1b.** Für die Strecke  $l$  gilt:

$$t_l = \sqrt{\frac{2 \cdot l}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5 m}{3,98 m s^{-2}}} = 1,59 s$$

**IV-1c.**

Seilkraft an  $m_1$ :

$$F_{S_2} = 250,0 N - 99,4 N = 150,6 N$$

$$F_{S_1} = 51,8 N + 19,3 N + 79,5 N = 150,6 N$$

**IV-2a.**

$$F = g \cdot \left( \frac{3}{2} m_2 - \frac{1}{2} m_1 \right) = 10 \frac{m}{s^2} \cdot (30 - 5) kg = 250 N$$

**IV-3a.** Lösung

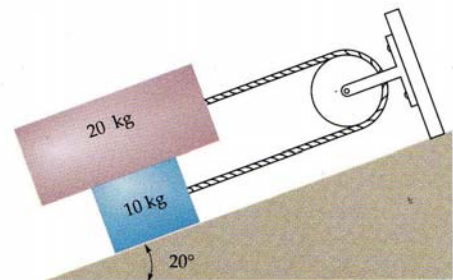
$$m_W > \mu_{H,\max} m_1 - m_E = 0,5 \cdot 10 kg - 1 kg = 4 kg$$

**IV-3b.** Ergebnis:

$$a = \frac{1}{15} \cdot g = 0,0667 \cdot g = 0,667 m s^{-2}$$



V-1. Die Massen  $m_1 = 20 \text{ kg}$  und  $m_2 = 10 \text{ kg}$  sind in der gezeigten Anordnung mit einem Seil verbunden, das durch eine Umlenkrolle umgelenkt wird. Die Massen des Seils und der Rolle können vernachlässigt werden. Der Steigungswinkel der schiefen Ebene betrage  $\theta = 20^\circ$ .



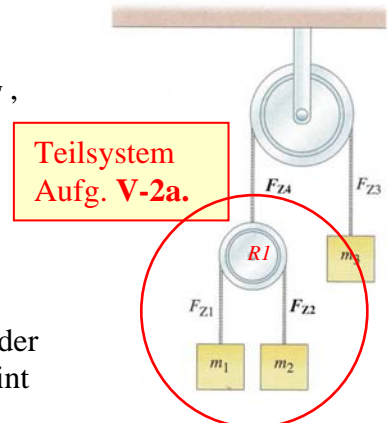
- Die Haftreibung zwischen  $m_1$  und  $m_2$  und zwischen  $m_2$  und der schiefen Ebene (SE) soll gleich sein. Welchen Wert darf die Haftreibungszahl  $\mu_{H,\max}$  nicht überschreiten, damit die Massen gleiten können?
- Beim Gleiten soll die Gleitreibungszahl  $\mu_G = 0,05$  betragen. Wie groß ist die Beschleunigung  $a$ ?  
Wie groß sind die Seilkräfte?
- im Haftreibungsfall, mit dem Maximalwert für  $\mu_{H,\max}$  wie in **Teil a.** berechnet,
- im Gleitfall wie in **Teil b.** beschrieben?

V-2. Eine rollende homogene Kugel und ein gleitender Quader mit gleicher Masse benötigen auf einer schiefen Ebene die gleiche Zeit für die gleiche Strecke.

- Die Gleitreibungszahl des Quaders beträgt  $\mu_G = \frac{1}{7}$ , die Rollreibungszahl der Kugel sei vernachlässigbar. Wie groß ist der Steigungswinkel  $\vartheta$  der schiefen Ebene?

### Zusatzaufgaben

V-3. Abbildung 1 zeigt einen doppelten Flaschenzug mit  $m_1 = 1 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 2 \text{ kg}$  und  $m_3 = 3 \text{ kg}$ . Zur Vereinfachung vernachlässige man die Massen der Seile und Rollen. Ziel ist es, die Seilkräfte und die Beschleunigung der Masse  $m_3$  zu bestimmen.



Teilsystem  
Aufg. V-2a.

Vorschlag für einen Lösungsansatz:

- Man betrachte das Teilsystem mit den Massen  $m_1$  und  $m_2$  an der kleinen Rolle (RI im roten Kreis) zunächst als ruhend (gemeint ist, dass die Rolle RI sich zwar drehen, nicht aber vertikal bewegen kann) und leite zunächst für das ruhende Teilsystem eine Beziehung für die Kraft  $F'_{Z4}(m_1, m_2, g)$  her, mit der das Teilsystem das nach oben führende Seil belastet. Abb. 1  
Wird anschließend das Teilsystem bestehend aus RI und den Massen  $m_1$  und  $m_2$  mit  $\pm a$  beschleunigt, kann  $g$  durch  $(g \pm a)$  ersetzt werden, um  $F_{Z4}$  in einem bewegten System zu erhalten.
- Man berechne unter Verwendung der Beziehung für  $F_{Z4}$  die Beschleunigung der Masse  $m_3$ .
- Bestimme die Seilkräfte  $F_{Z1}$ ,  $F_{Z2}$ ,  $F_{Z3}$  und  $F_{Z4}$ .

## Lösungen:

V-1a. Lösung für  $\mu_{H,\max}$  :

$$\mu_{H,\max} < \frac{(m_1 - m_2) \sin \theta}{(2m_1 + m_2) \cos \theta} = \frac{10}{50} \tan 20^\circ = 0,073$$

V-1b. Lösung:

$$a = 0,357 \frac{m}{s^2}$$

V-1c. Seilkraft an Masse  $m_2$ :

$$F_{S_2} = 34,202 N + 20,521 N = 54,723 N$$

V-1d. Seilkraft an Masse  $m_2$ :

$$F_{S_2} = 34,202 N + 14,095 N + 3,570 N = 51,867 N$$

V-2a. Lösung:

$$\vartheta = \arctan\left(\frac{1}{2}\right) = 26,6^\circ$$

V-3a. Lösung für  $F_{Z_4}$  :

$$F_{Z_4} = \frac{4m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot (g \pm a)$$

V-3b. Einsetzen

$$a_3 = \frac{1 \cdot 3 + 2 \cdot 3 - 4 \cdot 1 \cdot 2}{1 \cdot 3 + 2 \cdot 3 + 4 \cdot 1 \cdot 2} \cdot g = \frac{1}{17} \cdot g = 0,588 m s^{-2}$$

V-3c. Seilkraft  $F_{Z_4}$  :

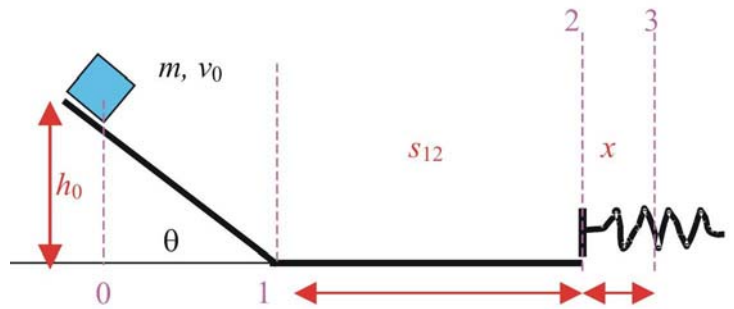
$$F_{Z_4} = F_{Z_3} = \frac{480}{17} N = 28,24 N$$

$$F_{Z_1} = \frac{4}{3} \cdot 1 \cdot \frac{18}{17} \cdot 10 N = 14,12 N$$

$$F_{Z_2} = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot \frac{18}{17} \cdot 10 N = 14,12 N$$

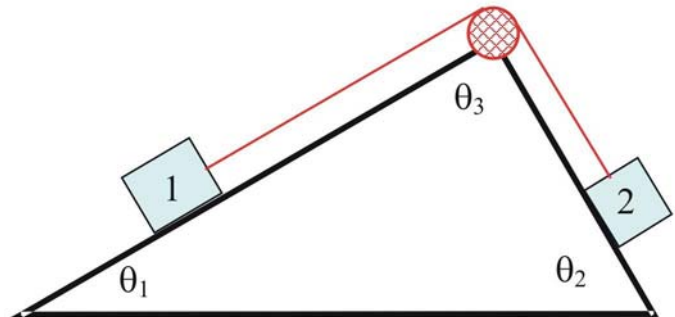
**Kontrolle:** Die Summe der Seilkräfte  $F_{Z_1}$  und  $F_{Z_2}$  ist gleich der Kraft  $F_{Z_4}$ .

- VI-1.** Die Masse  $m = 1\text{ kg}$  rutscht mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_0 = 4\text{ m s}^{-1}$  aus einer Höhe von  $h_0 = 0,5\text{ m}$  eine schieben Ebene mit Steigungswinkel  $\theta = 30^\circ$  hinab. Anschließend rutscht sie auf einer Strecke  $s_{12} = 2\text{ m}$  horizontal weiter und trifft am Ende auf eine Feder mit der Federkonstanten  $D = 5000\text{ N m}^{-1}$ . Die Gleitreibungszahl beträgt auf dem gesamten Weg  $\mu_G = 0,2$ .



- Berechnen Sie die Gesamtenergie  $E_{ges}$ , die kinetischen Energien  $E_{kin}$  und die Reibungsarbeiten  $W_R$  in den Punkten 1 und 2 der Bahn, sowie die an der Feder geleistete elastische Verformungsarbeit  $W_{E3}$  im Punkt 3.
- Wie groß ist der Federweg  $x$ ?
- Wie groß müsste die Anfangsgeschwindigkeit  $v'_0$  gewählt werden, damit die Masse nach dem Rückprall wieder genau die Anfangshöhe  $h_0$  ohne Geschwindigkeit erreicht? (Vernachlässigen Sie zur Vereinfachung die Reibung entlang des Federweges  $x$ )

- VI-2.** Auf unterschiedlich geneigten Dachflächen (siehe Skizze) liegen zwei Massen mit  $m_1 = m_2 = 1\text{ kg}$ , die durch ein Seil verbunden sind. Das Seil wird auf der Dachspitze mit einer Rolle umgelenkt. Die Massen von Seil und Rolle sollen vernachlässigt werden. Die Winkel betragen:  $\theta_1 = 30^\circ$  und  $\theta_2 = 60^\circ$ .



- Betrachten Sie die Kräfte, die auf die beiden Massen  $m_1$  und  $m_2$  wirken. Wie groß muss die Haftreibungszahl  $\mu_{H,max}$  mindestens sein, damit die Massen nicht gleiten können?
- Man stelle sich vor, links und rechts der Umlenkrolle wären Kraftmessgeräte im Seil. Welche Seilkräfte zeigen diese an, solange sich die Massen nicht bewegen?
- Man nehme jetzt an, dass die in Aufgabe 7.a. berechnete Haftreibungszahl  $\mu_{H,max}$  unterschritten werde (z. B. durch Regen, der auf das Dach fällt). Die beiden Massen beginnen zu gleiten. In welche Richtung? Die Gleitreibungszahl während des Rutschvorganges soll dann (einheitlich für  $m_1$  und  $m_2$ )  $\mu_G = 0,2$  betragen. Wie groß ist die Beschleunigung?
- Bestimmen Sie die Kräfte (einschließlich der Trägheitskräfte), die auf die bewegten Massen  $m_1$  und  $m_2$  wirken. Geben Sie Betrag und Richtung der Kräfte an. Berechnen Sie erneut die Seilkräfte.

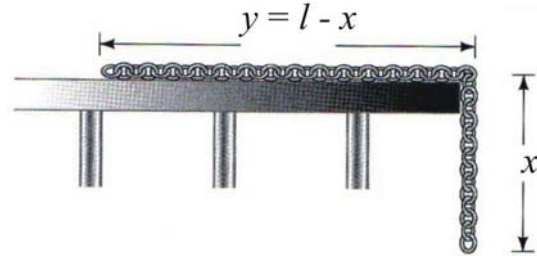
### Zusatzaufgaben

---

**VI-3.** Eine Kette der Masse  $m_{ges} = 1\text{ kg}$  mit homogener Massenverteilung und Gesamtlänge  $l = 1\text{ m}$  liegt auf einem Tisch (siehe Abb.).

**a.** Die Kette gleitet vom Tisch, wenn das überhängende Stück mindestens  $x_0 = 0,3\text{ m}$  lang ist. Wie groß ist die Haftreibungszahl  $\mu_{H,max}$ ?

**b.** Man betrachte die Gleitbewegung: Wie lauten die Gleichungen der Beschleunigungsfunktion  $a(x)$  für  $x_0 < x < l$  und für  $x \geq l$ ? Die Gleitreibungszahl soll 10% kleiner als die Haftreibungszahl sein. Zeichnen Sie die Funktion  $a(x)$ .



Hinweis: Man kann eine dimensionslose Darstellung wählen, mit  $\frac{x}{l}$  auf der Abszisse

und  $\frac{a}{g}$  auf der Ordinate.

**c.** Welche Geschwindigkeit hat die Kette, wenn sie in voller Länge von der Tischplatte gegliedert ist?

## Lösungen:

**VI-1a.** Gesamtenergie:

$$E_{ges} = m g h_0 + \frac{1}{2} m v_0^2 = 5 J + 8 J = 13 J$$

Reibungsarbeit auf der **Strecke 0→1**:

$$W_{R01} = \mu_G F_N s_{01} = \frac{\mu_G m g \cos 30^\circ h_0}{\sin 30^\circ} = 1,732 J$$

Kinetische Energie **Punkt 1**:  $E_{kin1} = E_{ges} - W_{R01} = (13 - 1,732) J = 11,268 J$

Reibungsarbeit auf der **Strecke 1→2**:

$$W_{R12} = \mu_G F_N s_{12} = \mu_G m g s_{12} = 4 J$$

Reibungsarbeit auf der **Strecke 0→2**:

$$W_{R02} = W_{R01} + W_{R12} = 5,732 J$$

Kinetische Energie **Punkt 2**:  $E_{kin2} = E_{ges} - W_{R02} = (13 - 5,732) J = 7,268 J$

Verformungsarbeit (Feder) im **Punkt 3**:

$$W_{E3} = E_{kin2} = 7,268 J$$

**VI-1b.** Federweg:

$$x_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{E3}}{D}} = 0,0539 m \cong 5,4 cm$$

**VI-1c.**

Anfangsgeschwindigkeit:

$$v'_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot (W_{R01} + W_{R12})}{m}} = 4,79 \frac{m}{s}$$

**VI-2a.**

$$\mu_{H,max} \geq \frac{0,866 - 0,5}{0,866 + 0,5} = 0,2679$$

**VI-2b.** links der Umlenkrolle:

$$F_S = F_{t1} + F_{H,max1} = 5 N + 0,27 \cdot 8,66 N = 7,32 N$$

rechts der Umlenkrolle:

$$F_S = F_{t2} - F_{H,max2} = 8,66 N - 0,27 \cdot 5 N = 7,32 N$$

**VI-2c.**

$$a = g \cdot 0,0464 = 0,464 m s^{-2}$$

**VI-2d.**

$$F_{S1} = 5 N + 0,2 \cdot 8,66 N + 0,464 N = 7,196 N$$

**VI-3a.** Lösung für  $\mu_{H,max}$ :

$$\mu_{H,max} = \frac{x_0}{l - x_0} = \frac{0,3}{0,7} = 0,4286$$

**3b.** Gleitreibungszahl:

$$\mu_G = \mu_{H,max} - 0,1 \cdot \mu_{H,max} = 0,3857 \approx 0,39$$

## Lösung:

Beschleunigung für  $0 \leq x \leq x_0$

$$a(x) \equiv 0$$

Sprung (Unstetigkeitsstelle) bei

$$x = x_0$$

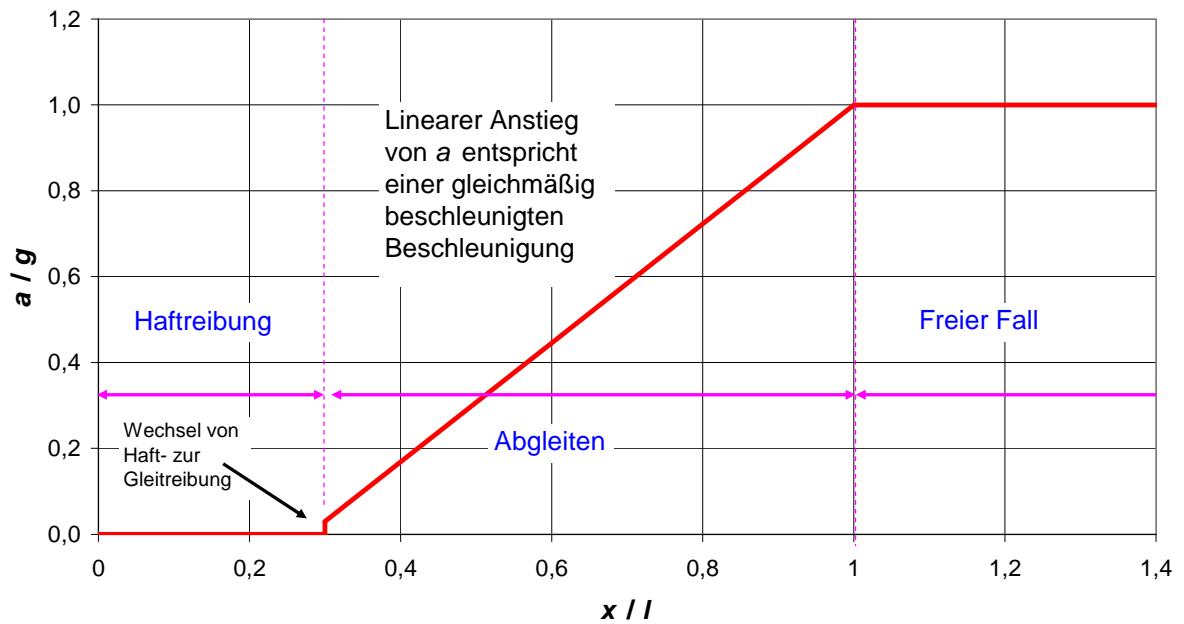
Beschleunigung für  $x_0 \leq x \leq l$

$$a(x) = \left( \frac{x}{l} (1 + \mu_G) - \mu_G \right) g = \left( 1,39 \frac{x}{l} - 0,39 \right) g$$

Beschleunigung für  $x > l$

$$a(x) = g = konst.$$

### Beschleunigung einer gleitenden Kette



3c.

$$E_{pot} = 1 \cdot 10 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{0,3^3}{1} \right) J = 4,5500 J$$

$$W_R = 0,3857 \cdot 10 \cdot 1 \left[ 0,7 - \frac{1}{2 \cdot 1} (1^2 - 0,3^2) \right] J = 0,9450 J$$

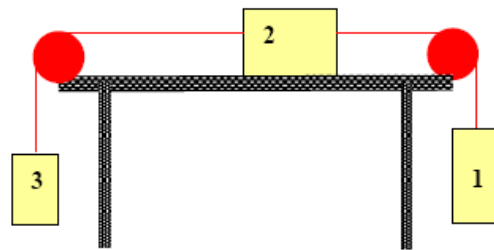
Lösung für v:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin}(x=l)}{m_{ges}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,605}{1 kg}} = 2,685 \frac{m}{s}$$

**VII-1.** Ein Wagen der Masse  $m = 1600 \text{ kg}$  soll innerhalb einer Zeit von  $t = 2,5$  Minuten eine Rampe der Länge  $s = 190 \text{ m}$  mit einer Steigung von 16% aus dem Stillstand hochgezogen werden. Die Bewegung sei gleichmäßig beschleunigt. Die Rollreibungszahl beträgt  $\mu_R = 0,1$ . Welche Leistung muss der Motor bei einem Wirkungsgrad von  $\eta = 0,75$  aufbringen?

- Man kann die mittlere und die maximale Leistung aus Kraft und Geschwindigkeit bestimmen.
- Alternativ kann die mittlere Leistung aus den benötigten Energien und den geleisteten Arbeiten bestimmen.  
(Allgemeiner Hinweis: Steigung ist der Quotient aus der Höhenänderung und dem entsprechenden horizontalen Weg)

**VII-2.** Drei Massen,  $m_1 = 2 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 3 \text{ kg}$  und  $m_3 = 1 \text{ kg}$ , sind mit (masselosen) Seilen verbunden.  $m_2$  liegt auf einer horizontalen Unterlage,  $m_1$  und  $m_3$  hängen senkrecht an den Seilen herab. Die Seile werden mit masselosen Rollen mit Radius  $R = 0,1 \text{ m}$  umgelenkt.



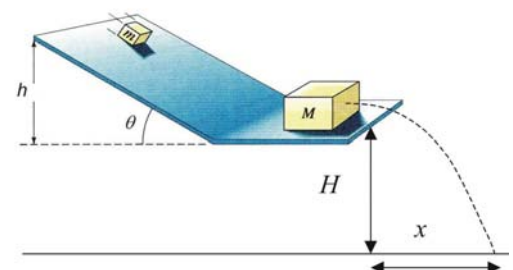
- Welche Haftreibungszahl  $\mu_{H,max}$  muss für  $m_2$  unterschritten werden, damit sich die Massen bewegen?
- Die Gleitreibungszahl  $\mu_G$  für  $m_2$  betrage 0,2. Wie groß ist die Beschleunigung der Massen?
- Wie groß ist die Winkelbeschleunigung der Rollen?

Welche Drehzahl haben die Umlenkrollen, wenn sich die Massen aus der Ruhe heraus um die Strecke  $s = 1 \text{ m}$  bewegt haben?

- Verwenden Sie zur Lösung zunächst die kinematischen Gleichungen.
- Bestimmen Sie die Drehzahl alternativ mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes.

### Zusatzaufgaben

**VII-3.** Betrachten Sie eine schiefe Ebene auf einem Tisch mit der Höhe  $H = 1,0 \text{ m}$ . Ein Block der Masse  $m = 1 \text{ kg}$  gleitet diese schiefe Ebene mit Neigungswinkel  $\theta = 40^\circ$  hinab. In der Ausgangshöhe  $h = 80 \text{ cm}$  besitzt er die Geschwindigkeit  $v_0 = 3 \text{ m s}^{-1}$ . Am Ende der Ebene stößt er auf einen Block der Masse  $M = 5 \text{ kg}$ . Der gestoßene Block verlässt die Ebene und fällt die Tischhöhe  $H$  hinab. Der Aufschlagpunkt liegt  $x = 55,9 \text{ cm}$  von der Tischkante entfernt.



- Wie viel Prozent der ursprünglichen kinetischen Energie der Masse  $m$  gehen beim Stoß der Massen  $m$  und  $M$  durch Verformung und/oder Wärme verloren? (Hinweis: Die Blöcke können als Massenpunkte behandelt werden, die reibungsfrei gleiten.)

## Lösungen:

**VII-1a.** Mittlere Gesamtleistung:

$$\bar{P}_{ges} = \frac{1}{\eta} \cdot \bar{P}_{Nutz} = \frac{1}{0,75} \cdot 5237 = 6983 \text{ W}$$

Maximale Gesamtleistung:

$$P_{ges}^{\max} = \frac{1}{\eta} \cdot P_{Nutz}^{\max} = \frac{1}{0,75} \cdot 10475 = 13966 \text{ W}$$

**VII-1b** Mittlere Gesamtleistung:

$$\bar{P}_{ges} = \frac{1}{\eta} \cdot \bar{P}_{Nutz} = \frac{1}{0,75} \cdot 5237 = 6983 \text{ W}$$

**VII-2a.**

$$\mu_{H,\max} = \frac{F_{g1} - F_{g3}}{F_{n2}} = \frac{20 \text{ N} - 10 \text{ N}}{30 \text{ N}} = \frac{1}{3}$$

**VII-2b.** Lösung:

$$a = g \cdot \frac{(m_1 - m_3 - \mu_G m_2)}{m_1 + m_2 + m_3} = g \cdot \frac{0,4}{6} = 0,666 \text{ m s}^{-2}$$

**VII-2c.** Winkelbeschleunigung:

$$\alpha = \frac{a}{r} = \frac{0,666 \text{ m}}{0,1 \text{ m s}^2} = 6,66 \text{ s}^{-2}$$

**VII-2d.** Drehzahl der Rolle:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v_1}{2\pi r} = 1,84 \text{ s}^{-1}$$

**VII-2e.** Drehzahl der Rolle:

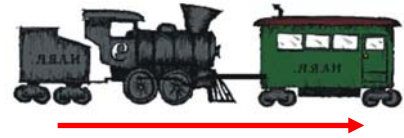
$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v_1}{2\pi r} = 1,837 \text{ s}^{-1}$$

**VII-3a.**

$$\varepsilon = 62,5 \%$$



- VIII-1.** Eine Rangierlok der Masse 25 t, die einen (nicht angekuppelten) Waggon der Masse 10 t vor sich her schiebt, wird gleichmäßig beschleunigt. Sie soll in 5 s aus dem Stand heraus eine Endgeschwindigkeit von 18 km/h erreichen. Dabei ist ständig eine Reibungskraft von 5 kN vorhanden.



- a. Wie groß ist die maximale und wie groß die mittlere Leistung, die die Lok aufbringen muss?

Nach Erreichen der Endgeschwindigkeit bremst die Lok, der geschobene Waggon löst sich und rollt mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Nach einer reibungsfreien Fahrt stößt er auf drei stehende, aneinander gekuppelte gleiche Waggonen mit jeweils 10 t Masse und kuppelt automatisch an diese an.

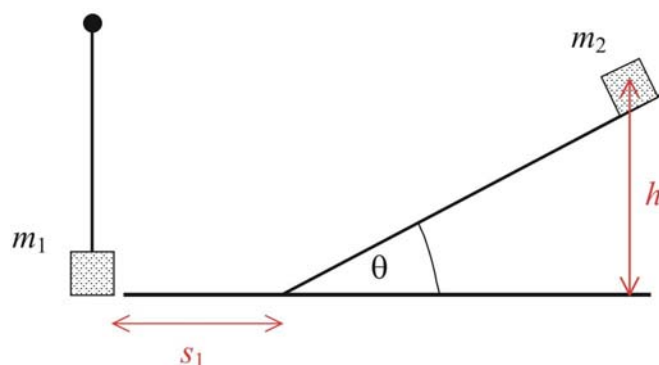


- b. Mit welcher gemeinsamen Geschwindigkeit rollen die vier Waggonen weiter?  
 c. Wie groß ist der relative Energieumsatz in der Kupplung? (Hinweis: Gesucht ist der Energieverlust  $Q$  beim Stoß geteilt durch die kinetische Energie  $E_{kin}^0$  des stoßenden Waggonen.)  
 d. Welche Kraft muss die Kupplung aufbringen, wenn die Ankupplungszeit circa 0,75 s beträgt?

- VIII-2.** Ein Dachziegel gleitet ein geneigtes Dach über eine Strecke von  $s = 6\text{ m}$  hinab. Das Dach hat einen Neigungswinkel von  $\vartheta = 30^\circ$  gegen die Waagerechte. Die Gleitreibungszahl beträgt  $\mu_G = 0,4$ . Der Ziegel fällt anschließend über die Dachkante auf den  $H = 8\text{ m}$  tiefer gelegenen Boden. In welcher Entfernung von der Hauswand trifft der Dachziegel auf dem Boden auf, wenn der Dachüberstand  $\Delta x_{\vec{y}} = 0,5\text{ m}$  beträgt?

**Zusatzaufgabe** -----

- VIII-3.** Ein Körper der Masse  $m_2 = 1\text{ kg}$  gleitet aus der Höhe  $h = 1\text{ m}$  eine schiefe Ebene mit dem Neigungswinkel  $\theta = 30^\circ$  hinab. Anschließend rutscht er auf einem horizontalen Streckenabschnitt der Länge  $s_1 = 1\text{ m}$  und stößt am Ende auf einen Pendelkörper mit der Masse



$m_1 = 0,5 \text{ kg}$  . Die Gleitreibungszahl auf der gesamten Strecke beträgt  $\mu_G = 0,1$ . Berechnen Sie, wie hoch das Pendel mit der Masse  $m_1$  ausschwingt (Masse der Pendelstange kann vernachlässigt werden), für folgende Bedingungen:

- a. Einen (vollkommen) **elastischen Stoß** zwischen den Massen  $m_2$  und  $m_1$  .
- b. Einen **unelastischen Stoß** zwischen den Massen  $m_2$  und  $m_1$  , wobei als Zusatzbedingung angenommen werden soll, dass beim Stoß 25% der kinetischen Energie in Verformungs- bzw. Wärmeenergie umgewandelt wird.
- c. Einen **vollkommen unelastischen Stoß**.
- d. Wie groß ist der Energieverlust beim vollkommen unelastischen Stoß (**V1c.**) relativ zur kinetischen Energie des Körpers  $m_2$  direkt vor dem Stoß?

## Lösungen:

VIII-1a. Maximale Leistung:

$$P_{\max} = F_{\text{ges}} v_{\max} = 40 \text{ kN} \cdot 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 200 \text{ kW}$$

Mittlere Leistung:

$$P_{\text{mittel}} = F_{\text{ges}} v_{\text{mittel}} = 40 \text{ kN} \cdot 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 100 \text{ kW}$$

VIII-1b.

$$u = \frac{10}{40} v_1 = \frac{5}{4} \text{ m s}^{-1} = 1,25 \text{ m s}^{-1}$$

VIII-1c. Relativer Energieumsatz:

$$\frac{Q}{E_{\text{kin}}} = 1 - \frac{m_1}{\sum_{i=1}^4 m_i} = 1 - \frac{10}{40} = 75\%$$

VIII-1d.

$$F_{234} = \frac{30000 \cdot 1,25}{0,75} = +50 \text{ kN}$$

VIII-2. Abstand von der Hauswand:

$$x_{\text{ges}} = 4,48 \text{ m}$$

VIII-3.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin},K}}{m_2}} = 3,813 \text{ m s}^{-1}$$

VIII-3a. mit  $v_1 = 0$ :

$$u_1 = \frac{2m_2}{m_1 + m_2} v_2 = \frac{2}{1,5} v_2 = \frac{4}{3} v_2 = 5,084 \text{ m s}^{-1}$$

mit  $v_1 = 0$ :

$$u_2 = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v_2 = \frac{1 - 0,5}{1,5} v_2 = +\frac{1}{3} v_2 = 1,271 \text{ m s}^{-1}$$

$$h_{\text{elastisch}} = \frac{u_1^2}{2g} = 1,292 \text{ m}$$

VIII-3b.

$$u_1 = v_2 = 3,813 \text{ m s}^{-1}$$

$$u_2 = \frac{1}{2} v_2 = 1,907 \text{ m s}^{-1}$$

Berechnung der Höhe, die das Pendel schwingt:

$$h_{\text{unelastisch}} = \frac{u_1^2}{2g} = 0,727 \text{ m}$$

VIII-3c. Lösung für  $u$ :

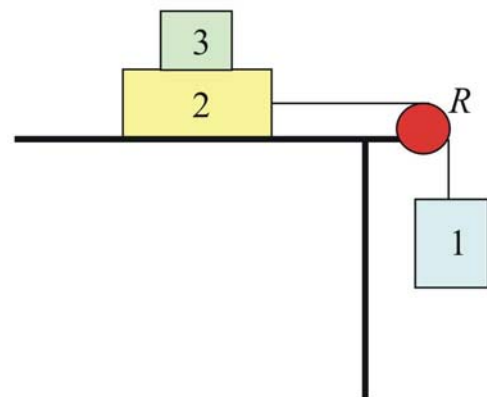
$$u = \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_2 = \frac{1 \text{ kg}}{1,5 \text{ kg}} v_2 = \frac{2}{3} v_2 = 2,542 \text{ m s}^{-1}$$

$$h_{\text{vollk.unelastisch}} = \frac{u^2}{2g} = 0,323 \text{ m}$$

VIII-3d. Relativer Energieverlust:

$$\frac{Q_{vu}}{E_{\text{kin},2}} = \frac{1}{3} = 33,3\%$$

**IX-1.** Auf einem Tisch liegen zwei Blöcke  $m_2 = 3\text{ kg}$  und  $m_3 = 1,5\text{ kg}$  übereinander. Die Gleitreibungszahlen zwischen Block Nr.2 und dem Tisch und zwischen den beiden Blöcken Nr. 2 und Nr. 3 betragen  $\mu_G = 0,3$ , die Haftreibungszahlen  $\mu_{H,\max} = 0,4$ . Der Block Nr. 1 ist mit einem Seil, das über eine Umlenkrolle geführt ist, mit dem Block Nr.2 verbunden. (Seil und Umlenkrolle sollen als masselos betrachtet werden.)



- a. Überlegen Sie zunächst, was passieren würde, wenn weder Haftreibung noch Gleitreibung vorhanden wäre. Würde sich der Block Nr. 3 bewegen? Bestimmen Sie die Beschleunigung des Blocks Nr. 2, wenn der Block Nr. 1 eine Masse von  $m_1 = 2\text{ kg}$  besitzt?

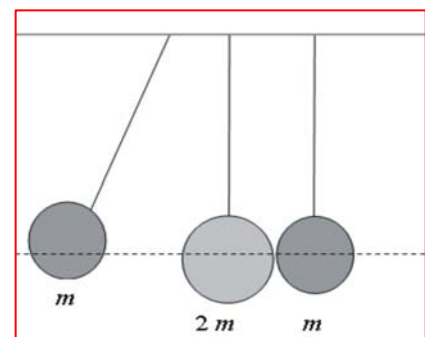
**Berücksichtigen Sie im Folgenden die genannten Reibungszahlen:**

- b. Wie groß muss die Masse des Blocks Nr. 1 mindestens sein ( $m_{1a}$ ), damit der Block  $m_2$  bewegt werden kann?
- c. Wie groß darf die Masse des Blocks Nr. 1 höchstens sein ( $m_{1b}$ ), damit der Block Nr. 3 auf dem Block Nr. 2 haften bleibt?
- d. Wie groß ist die Beschleunigung des Blocks Nr. 2, wenn für die Masse des Blocks Nr. 1 gilt  $m_1 = 2\text{ kg}$ ? (Hinweis: Überlegen Sie zunächst, was bei dem gegebenen Wert von  $m_1$  mit Block Nr. 3 passiert).
- e. Die Masse des Blocks Nr. 1 soll  $m_1 = 8\text{ kg}$  betragen. Bestimmen Sie die Beschleunigung für Block Nr. 2 ( $a_2$ ) und für Block Nr. 3 ( $a_3$ ).
- f. Skizzieren Sie die Ergebnisse für die Beschleunigungen  $a = a_1 = a_2$  und  $a_3$  als Funktion der Masse  $m_1$  des Blocks Nr. 1. Diskutieren Sie den Verlauf und die Sprungstellen.

**IX-2.** Eine Pendelmasse  $m_a = m$  mit der Geschwindigkeit  $v_a = 1\text{ m s}^{-1}$  stößt elastisch auf zwei in Ruhe nebeneinander hängende Pendel mit der Masse  $m_b = 2m$  und  $m_c = m$ .

Beim Stoßvorgang befinden sich alle Schwerpunkte auf gleicher Höhe (gestrichelten Linie).

- a. Wie groß sind nach dem Stoß die Geschwindigkeiten  $u_a$  der Masse  $m_a$  und  $u_c$  der Masse  $m_c$ ?
- b. Wie viel Prozent der ursprünglichen Energie von  $m_a$  wird auf  $m_c$  übertragen?
- c. Wie verteilt sich die Energie nach den Stoßvorgängen auf die Massen  $m_a$  und  $m_b$ ?

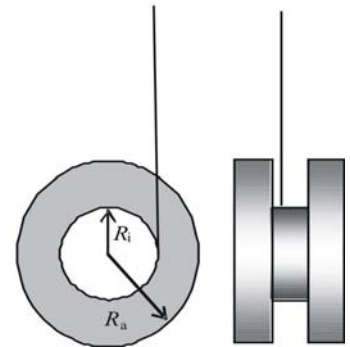


### Zusatzaufgabe

**IX-3.** Ein JoJo besteht aus drei homogenen Holzscheiben gleicher Dicke  $d = 1\text{ cm}$ . Die äußeren beiden Scheiben haben einen Radius von  $R_a = 2,5\text{ cm}$ , die zentrale Scheibe besitzt einen Radius von  $R_i = 1\text{ cm}$ , das Holz hat eine Dichte von  $\rho = 1,1\text{ g cm}^{-3}$ . Um die zentrale Scheibe ist ein Faden der Länge  $l = 1\text{ m}$  gewickelt (Masse vernachlässigbar).

**a.** Berechnen Sie das Massenträgheitsmoment des JoJo bezüglich der axialen Symmetrieachse durch den Massenmittelpunkt.

**b.** Das JoJo wird losgelassen und der aufgewickelte Faden am äußersten Punkt festgehalten. Wie lange dauert es, bis der Faden abgewickelt ist und das JoJo am tiefsten Punkt angelangt ist?



**Lösungen:**

**IX-1a.**

$$a = \frac{2}{2+3} \cdot g = 0,4 g = 4 \text{ m s}^{-2}$$

**IX-1b.**

Lösung:

$$m_{1a} = 1,8 \text{ kg}$$

**IX-1c.** Bedingung für Haftreibung:

$$a_3 < \mu_{H,\max} \cdot g \quad (*)$$

Allgemeine Lösung für  $a$

$$a = \frac{m_1 - (m_2 + m_3) \mu_G}{m_1 + m_2 + m_3} \cdot g \quad (5)$$

Gesuchter Wert der Masse  $m_{1b}$ :

$$m_{1b} = 5,25 \text{ kg}$$

**IX-1d.** Lösung:

$$a = \frac{2 - 4,5 \cdot 0,3}{6,5} \cdot g = 0,1 \cdot 10 \text{ m s}^{-2} = 1 \text{ m s}^{-2}$$

**IX-1e.** Allgemeine Lösung für  $a$

$$a = \frac{m_1 - (m_2 + 2m_3) \mu_G}{m_1 + m_2} \cdot g \quad (7)$$

Lösung:

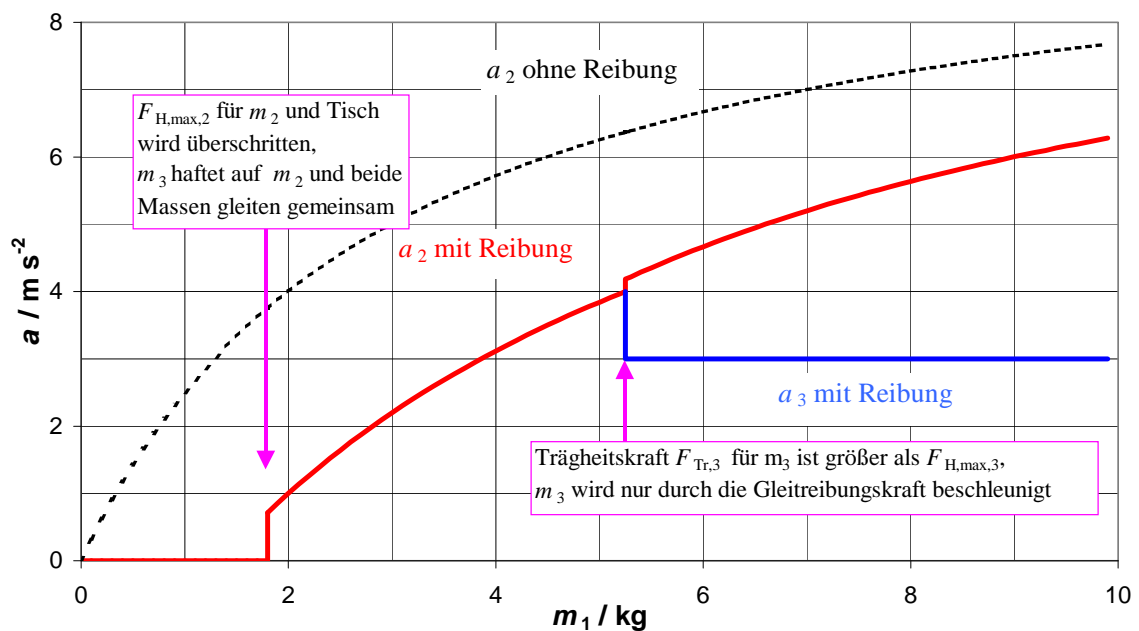
$$a = \frac{6,2}{11} g = 0,564 \cdot 10 \text{ m s}^{-2} = 5,64 \text{ m s}^{-2}$$

Lösung:

$$a_3 = \mu_G g = 0,3 \cdot 10 \text{ m s}^{-2} = 3 \text{ m s}^{-2}$$

**IX-1f.**

**Beschleunigung als Funktion der Masse  $m_1$**



**IX-2a. Lösung:**

$$u_0 = \frac{m - 2m}{m + 2m} v_a = -\frac{1}{3} v_a = -0,3333 m s^{-1}$$

Ergebnis:

$$u_c = \frac{8}{9} m s^{-1} = 0,88888 m s^{-1}$$

**IX-2b. Ergebnis:**

$$P_c = \frac{E_{kin,c}^{nachher}}{E_{kin,a}^{vorher}} = \frac{0,3951}{0,5} = 79,0\%$$

**IX-2c. Ergebnis:**

$$P_a = \frac{E_{kin,a}^{nachher}}{E_{kin,a}^{vorher}} = \frac{0,0555}{0,5} = 11,1\%$$

Ergebnis:

$$P_b = \frac{E_{kin,b}^{nachher}}{E_{kin,a}^{vorher}} = \frac{0,0494}{0,5} = 9,9\%$$

Prüfung:

$$P_a + P_b + P_c = 79,0\% + 9,9\% + 11,1\% = 100,0\%$$

**IX-3a. Lösung:**

$$J_{ges} = \pi d \rho \left[ R_a^4 + \frac{1}{2} R_i^4 \right] = 1,367 \cdot 10^{-5} kg m^2$$

**IX-3b.**

$$a = 5,18 m s^{-2}$$

Zeit zum Durchfallen einer Strecke von  $l = 1 m$ .

$$t = \sqrt{\frac{2l}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1m}{5,18 m s^{-2}}} = 0,621 s$$

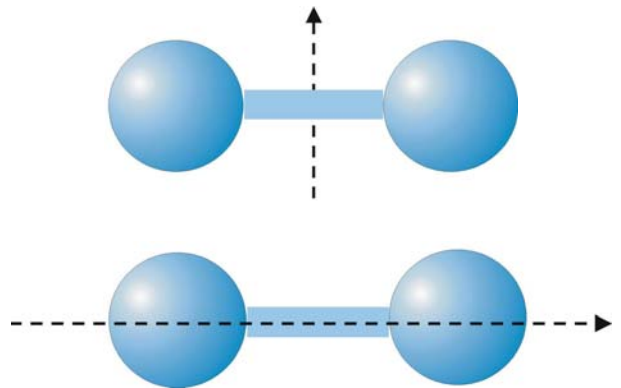
**X 1.** Berechnen Sie das Massenträgheitsmoment für folgende Körper mit **homogener Dichte**. Die Körper sollen jeweils die Gesamtmasse  $m_{ges}$  besitzen. Die gestrichelte Linie zeigt die Drehachse. Das Ergebnis soll in der Form  $J_{ges} = x \cdot m_{ges} \cdot R^2$  angegeben werden, wobei der Faktor  $x$  aus den Angaben zur Geometrie zu bestimmen ist..

**a. Hantel senkrecht zur Symmetrieachse:**

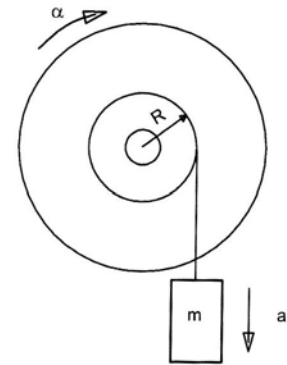
Radius der Kugeln  $R$ ,  
Länge der Verbindungsstange  $L = 2 \cdot R$ ,  
Radius der Verbindungsstange  $r = 0,2 \cdot R$ .

**b. Hantel parallel zur Symmetrieachse:**

Radius der Kugeln  $R$ ,  
Länge der Verbindungsstange  $L = 2 \cdot R$ ,  
Radius der Verbindungsstange  $r = 0,2 \cdot R$ .



**X 2.** Ein Drehmomentenrad erfährt um seine horizontale Achse eine Winkelbeschleunigung, die durch die Gewichtskraft eines Körpers der Masse  $m = 10 \text{ kg}$  erzeugt wird, der an einem um die Achse ( $R = 8 \text{ cm}$ ) gewickelten Faden hängt. Lässt man den Körper ( $m$ ) los, so bewegt er sich in  $t = 5 \text{ s}$  um die Strecke  $s = 2 \text{ m}$  nach unten. Berechnen Sie das Massenträgheitsmoment des Systems Rad/Achse,



- indem Sie die am System wirkenden **Kräfte und Momente betrachten**,
- indem Sie den **Energieerhaltungssatz anwenden**.

**Zusatzaufgaben**

**X 3.** Eine Masse ( $m_1 = 1 \text{ kg}$ ) ist mit einem (masselosen) Seil über eine Umlenkrolle (homogener Zylinder) der Masse  $m_R = 0,5 \text{ kg}$  mit einer zweiten Masse  $m_2$  verbunden (Abb. 1).

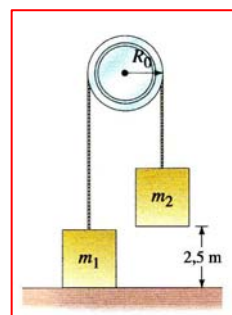


Abb. 1.

- Wie groß ist  $m_2$ , um  $s = 2,5 \text{ m}$  in  $t = 1 \text{ s}$  zu durchfallen?
- Welche Höchstgeschwindigkeit erreichen die Massen?
- Wie groß ist die mittlere Leistung, wie groß die Maximalleistung?

**X 4.** Man vergleiche eine rollende Kugel (Masse  $m_1 = 1 \text{ kg}$ ) und eine gleitende Masse ( $m_2 = 1 \text{ kg}$ ) auf einer schiefen Ebene. Der Steigungswinkel der schiefen Ebene beträgt  $\vartheta = 30^\circ$ , beide Körper starten in der Höhe  $h = 1 \text{ m}$  ohne Anfangsgeschwindigkeit (siehe Abb. 2, Darstellung nicht maßstabgerecht!).

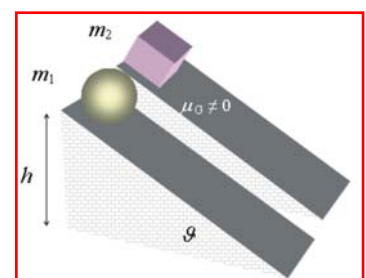


Abb. 2.

- Wie groß muss die Gleitreibungszahl für die Masse  $m_2$  sein, damit sie in gleicher Zeit wie die Kugel  $m_1$  unten ankommt?



## Lösungen:

**X 1a.** Lösung: Faktor  $x$ :

$$x = \frac{J_{ges}}{m_{ges} R^2} = 2 \cdot 2,1354 + 0,0097 = 4,28$$

**X 1b.** Lösung: Faktor  $x$ :

$$x = \frac{J_{ges}}{m_{ges} R^2} = 2 \cdot 0,19413 + 0,000583 = 0,389$$

**X 2a.**

$$J = 10 \cdot (0,08)^2 \frac{10 - 0,16}{0,16} \text{ kg m}^2 = 3,936 \text{ kg m}^2$$

**X 2b.**

$$J = 0,064 \text{ kg m}^2 \cdot 61,5 = 3,936 \text{ kg m}^2$$

**X 3a.**

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

**X 3b.**

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

**X 3c.**

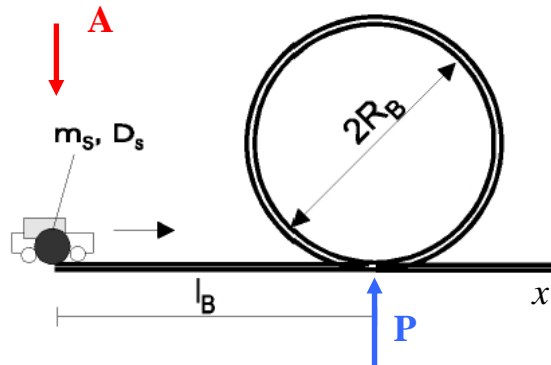
$$\bar{P} = \frac{0,5 \cdot 4,5 \text{ kg} \cdot 5^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}}{1 \text{ s}} = 56,25 \text{ W}$$

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

**X 4a.**

$$\mu_G = \frac{2}{7} \tan \vartheta = 0,165$$

- XI-1.** Ein Student möchte sein neues Weihnachtsgeschenk, ein Spielzeugauto und eine Loopingbahn testen. Das Auto hat eine Masse von  $m_A = 200\text{ g}$  mit Schwungradantrieb (Vollscheibe mit der Masse  $m_S = 50\text{ g}$ , Durchmesser  $D_S = 4\text{ cm}$ ) und die Loopingbahn besteht aus einer horizontalen Anlaufstrecke der Länge  $l_B = 50\text{ cm}$



und einer Loopingschleife mit Radius  $R_B = 20\text{ cm}$ . Das Schwungrad dient nicht nur als Energiespeicher, sondern auch als Antriebsrad (d. h. die Umfangsgeschwindigkeit des Rades entspricht der Fahrgeschwindigkeit des Autos).

- Das Auto soll durch die Loopingschleife fahren können. Bestimmen Sie die kleinste Geschwindigkeiten  $v_{\min}$ , die es im höchsten Punkt der Schleife haben kann, ohne herabzufallen. (Betrachten Sie dazu das Auto näherungsweise als Massenpunkt, der sich reibungsfrei bewegt.)
- Bestimmen Sie die Geschwindigkeit  $v_p$ , die das Auto im Punkt (P) (Einfahrt in die Loopingschleife) haben muss, um die im Aufgabenteil a. genannten Bedingungen zu erfüllen.
- Skizzieren Sie die Funktion der Normalkraft, die auf das Auto entlang der Fahrtstrecke  $x$  wirkt ( $x > l_B + \pi \cdot (2R_B)$ ). Betrachten Sie hierzu die Geschwindigkeit  $v$  bei (P), insbesondere  $v_{\text{links}}$  für  $x = l_B - \varepsilon$  und  $v_{\text{rechts}}$  für  $x = l_B + \varepsilon$ , mit jeweils  $\varepsilon \rightarrow 0$ .
- Mit welcher Anfangsdrehzahl muss sich das Schwungrad am Anfangspunkt (A) der Loopingbahn drehen?

- XI-2.** Zwei Schwungräder in Form von homogenen Vollzylindern mit den Massen  $m_1 = 0,8\text{ kg}$  und  $m_2 = 1,5\text{ kg}$  und dem Radius  $R_1 = R_2 = 10\text{ cm}$  haben eine Drehzahl von  $n_1 = 900\text{ min}^{-1}$  und  $n_2 = 600\text{ min}^{-1}$ . Die beiden Schwungräder werden gekuppelt. Die Kupplungszeit dauert  $\Delta T = 0,5\text{ s}$ .

- Welche gemeinsame Drehfrequenz haben die Schwungräder nach dem Kuppeln?
- Wie groß ist der Drehimpuls der beiden verkuppelten Schwungräder?
- Berechnen Sie die Veränderung des Drehimpulses vor und nach dem Kupplungsvorgang für beide Schwungräder getrennt. Kommentieren Sie das Ergebnis.
- Welches Drehmoment hat beim Kupplungsvorgang gewirkt?
- Betrachten Sie die Energien: Welche Energien hatten die Schwungräder vor, welche Energie haben sie nach der Kupplung? Gilt der Energieerhaltungssatz? Kommentieren Sie auch dies Ergebnis.

## Lösungen:

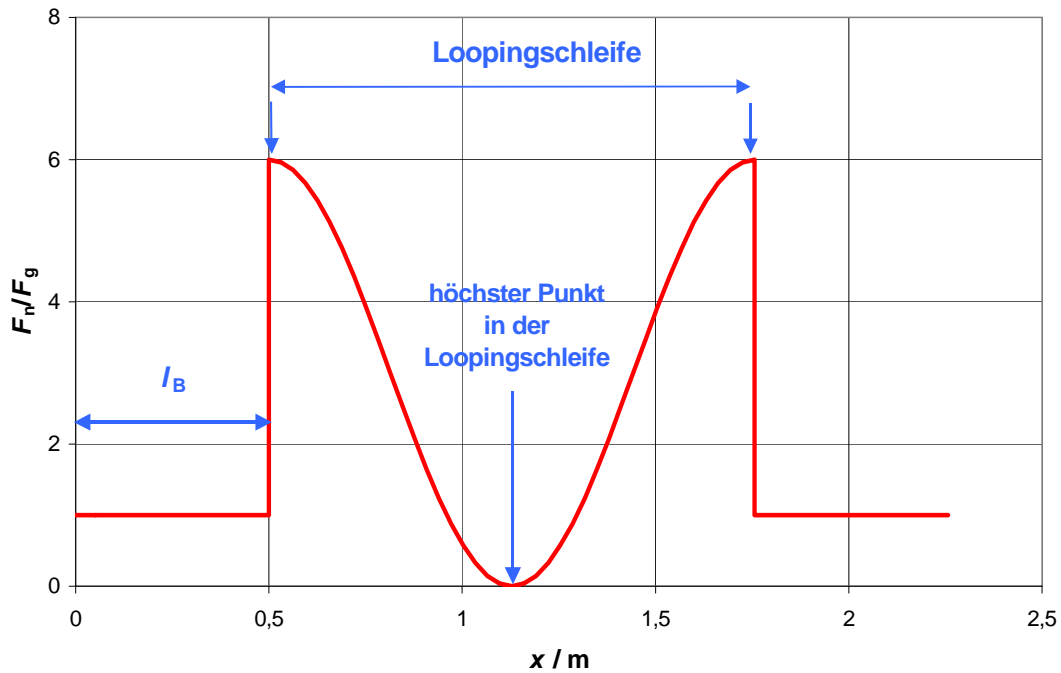
**XI-1a.** Minimalgeschwindigkeit:

$$v_{\min} = \sqrt{R_B g} = \sqrt{0,2 \cdot 10} \frac{m}{s} = 1,414 \frac{m}{s}$$

**XI-1b.**

$$v_P = \sqrt{10} \frac{m}{s} = 3,162 \frac{m}{s}$$

**XI-1c.**



**XI-1d.** Lösung:

$$n_s = \frac{v_A}{\pi D_s} = \frac{\sqrt{10}}{\pi \cdot 0,04} s^{-1} = 25,2 s^{-1}$$

**XI-2a.**

$$n_{gem} = 704 \text{ min}^{-1}$$

**XI-2b.**

$$L' = 0,848 \frac{kg \ m^2}{s}$$

$$L' = 0,848 \frac{kg \ m^2}{s}$$

**XI-2c.**

$$\Delta L_1 = \pi \cdot m_1 R^2 \left( -\frac{196}{60 s} \right) = -0,082 \frac{kg \ m^2}{s}$$

$$\Delta L_2 = \pi \cdot m_2 R^2 \left( -\frac{104}{60 s} \right) = +0,082 \frac{kg \ m^2}{s}$$

**XI-2d.** Drehmoment:

$$M = \frac{dL}{dt} = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{0,082 \ kg \ m^2}{0,5 s^2} = 0,164 \ Nm$$

**XI-2e.** Relativer Energieverlust:

$$\frac{Q}{E_{ges}} = \frac{1,318}{32,569} = 0,040 \hat{=} 4\%$$