3 Erhaltungsgrößen

Lösung der Einstiegsfrage

Wenn man die Masse der Springerin kennt und auch die Höhe über dem Wasserspiegel, aus der sie abspringt, kennt man die Höhenenergie beim Absprung genau. Nun muss das Bungee-Seil so eingestellt werden, dass es durch diese Höhenenergie etwas weniger weit gedehnt wird als die Höhe über dem Wasserspiegel festlegt. Im ausgedehnten Zustand ist die Höhenenergie der Springerin dann in Spannenergie des Bungee-Seils umgewandelt worden.

Wenn die „Härte" des Seils passend eingestellt wird und alle Haken und Befestigungen haltbar ausgeführt sind, kann man tatsächlich sicher sein, dass der Sprung knapp über dem Wasserspiegel endet: Energieerhaltung gibt Sicherheit!

(S. 63 – 86) 3 Erhaltungsgrößen

Begriffsstruktur

Grundlegende Begriffe (*strukturbildend*)	Wichtige Begriffe und Inhalte (*strukturbeschreibend*)	Weitere Begriffe und Inhalte
Mechanische Energie	Energieterme, Energieerhaltung, Energieumsetzung,	Gesamtenergie, abgeschlossenes System
Mechanische Arbeit	Energieänderung, Energieübertragung, Leistung	Teilsystem, Arbeitsdiagramm
Impuls	System, Impulserhaltung	Impulsänderung, unelastischer Stoß, elastischer Stoß
Drehimpuls	Drehimpulserhaltung, Rotationsenergie	

Didaktischer Kommentar

Nachdem im Kapitel „Ursache von Bewegungen“ mit Hilfe der Grundgleichung der Dynamik der Einfluss wirkender Kräfte auf die Bewegung eines Körpers untersucht wurde, steht hier die Frage im Mittelpunkt: „Gibt es physikalische Größen, die ihren Wert während eines Vorganges nicht ändern?“ Auf der Grundlage der Idee des Bilanzierens kann man dann aus der Kenntnis dieser Werte Aussagen über andere physikalische Größen gewinnen.

Der Energiebegriff wird zunächst, losgelöst von anderen bereits definierten Begriffen, als eigenständige Zustandsgröße eines Systems entwickelt. Dies geschieht aus fachsystematischen Gründen zunächst nur für die mechanische Energie. Die Vorgehensweise ermöglicht aber auch einen breiteren Zugang zum Energiebegriff unter Einbeziehung nicht-mechanischer Aspekte. Diese müssten dann von der Lehrkraft inhaltlich gefüllt werden und eventuell könnte der Energiebegriff schon an dieser Stelle unter Aspekten der Umweltproblematik stärker ins Zentrum der Betrachtung gerückt werden.

Aus dem Gedanken der Energieerhaltung werden adäquate Energieterme gewonnen, deren Widerspruchsfreiheit zu anderen bereits gefundenen physikalischen Zusammenhängen geprüft wird. In komplexer werdenden Anwendungen wird schließlich ein allgemeiner Erhaltungssatz für die Energie gewonnen.

Der Arbeitsbegriff ergibt sich beim Übergang von geschlossenen Systemen mit Energieerhaltung zu Teilsystemen, deren Energie sich ändern kann. Arbeit wird als eine spezielle Form der Energieübertragung definiert. Dies führt schließlich zur Beziehung $W = F \cdot s$, die aus der Mittelstufe bekannt ist, und in einer schärferen Betrachtung zur allgemeinen Form, die die Richtungsunterschiede berücksichtigt. Im Sinne eines Spiralcurriculums wird also in ***Impulse* Physik Oberstufe** der Arbeitsbegriff in einen übergeordneten Kontext eingebunden. Auf eine parallele Darstellung des unterrichtlichen Weges „Kraft → Arbeit → Energie“ wurde aus Umfangsgründen verzichtet. Durch Umordnen der Texte kann er dennoch anknüpfend an den Arbeitsbegriff aus der Mittelstufe beschritten werden, etwa ausgehend von der Aussage: „Arbeit bewirkt Energieänderung“.

Die Einbeziehung des zeitlichen Aspekts führt auf den Begriff der Leistung, formelmäßig auch erfasst in der wichtigen Beziehung $P = F \cdot v$.

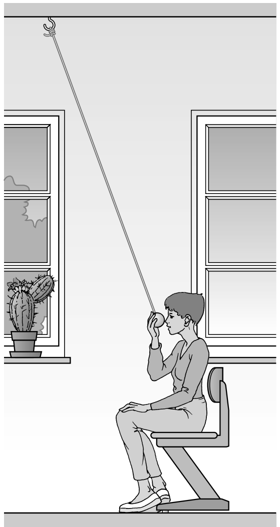
Aus der Annäherung an reale Abläufe ergibt sich der Wirkungsgrad, hier bewusst abgeleitet aus einem Beispiel, das nicht rein mechanisch, dafür aber experimentell leicht zugänglich ist.

Die Betrachtungen der Wechselwirkung bei Stößen führen zunächst zum **Impulsbegriff** und zur Impulserhaltung. Der Zusammenhang Impulsänderung – Kraft wird dann hergestellt.

Aus Analogieschlüssen wird anschließend auf das Grundgesetz der Dynamik des rotierenden starren Körpers sowie die Größe der Rotationsenergie gefolgert. Gleiches gilt für den Drehimpuls und seinen Erhaltungssatz.
Auf Integraldarstellung wird durchgehend verzichtet, nicht aber auf die Veranschaulichung physikalischer Größen durch die Inhalte geeigneter Flächen.

Material **Ergänzende Versuche**

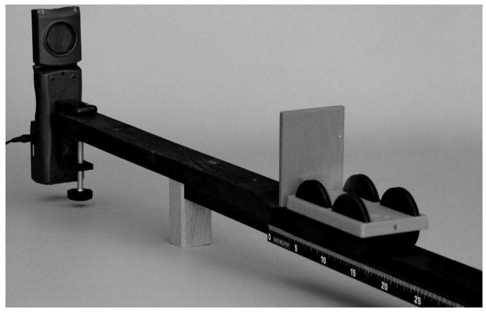
(S. 64)



V1 Ein Körper mit der Masse von etwa 1 kg hängt an einer Schnur von der Zimmerdecke herab. Dieses Pendel wird bis zur Nasenspitze einer Versuchsperson ausgelenkt und dann losgelassen (siehe Abbildung links). Der Körper schwingt weg und kommt wieder zurück. Unmittelbar vor der Nasenspitze kehrt er um.

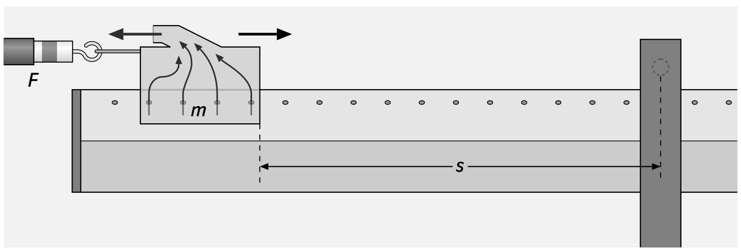
V2 Ein fallender Körper mit der Masse m_G beschleunigt den Gleiter einer Luftkissenfahrbahn mit der Masse m_K. Für unterschiedliche Fallstrecken s wird die Geschwindigkeit v bestimmt.

V3 Eine Fahrbahn wird an einem Ende angehoben. Mithilfe eines Ultraschallsensors wird die Geschwindigkeit v eines hinabfahrenden Wagens in Abhängigkeit von seiner Masse m und der Starthöhe h untersucht (siehe Abbildung rechts).



(S. 72)

V1 Auf einer Luftkissenfahrbahn sitzt ein Gleiter mit der Masse m, in dem die ausströmende Luft zu einer Düse gelenkt wird. Die durch die ausströmende Luft erzeugte Kraft F wird mit einem Kraftmesser bestimmt. Lässt man den Gleiter los, wird dieser beschleunigt. Am Ende der Beschleunigungsstrecke s wird die Geschwindigkeit v gemessen. Im Rahmen der Messgenauigkeit stimmen die Werte der Terme $F \cdot s$ und $\frac{1}{2} m \cdot v^2$ überein.

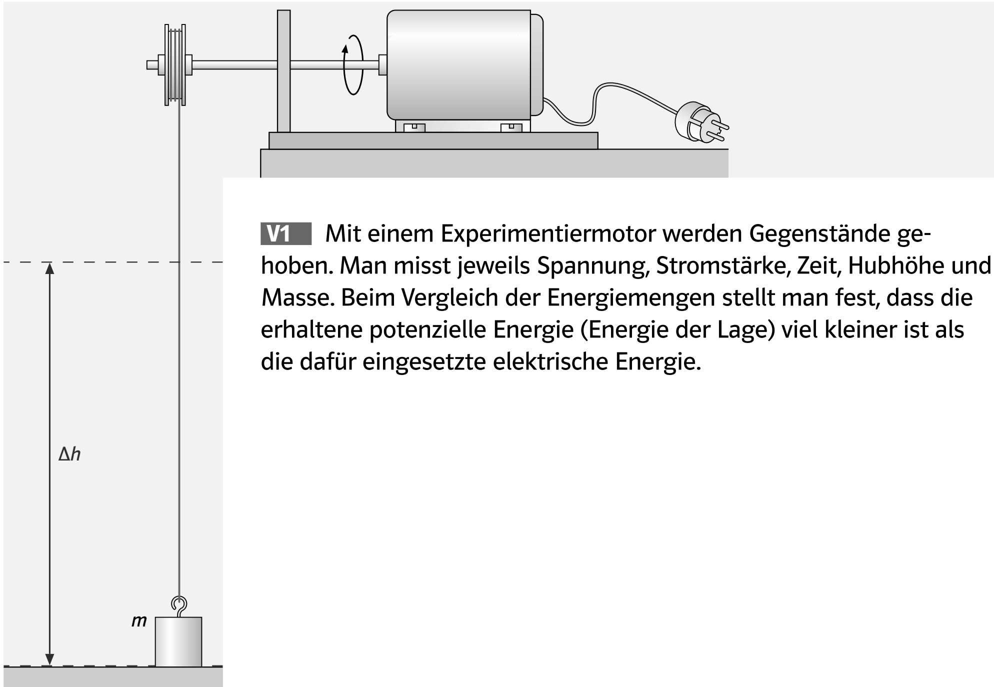


V2 Ein Wagen mit der Masse m wird eine schiefe Ebene hinaufgezogen. Bei verschiedenen Steigungen werden die jeweils konstante, zum gleichförmigen Ziehen gerade benötigte Kraft F, die zurückgelegte Weglänge s und der Höhenunterschied h gemessen.

Im Rahmen der Messgenauigkeit stimmen die Werte für die Terme $F \cdot s$ und $m \cdot g \cdot h$ überein.

m in kg	0,25	0,25	0,25
h in m	0,05	0,10	0,15
$m \cdot g \cdot h$ in J	0,12	0,25	0,37
F in N	0,26	0,54	0,76
s in m	0,50	0,50	0,50
$F \cdot s$ in J	0,13	0,27	0,38

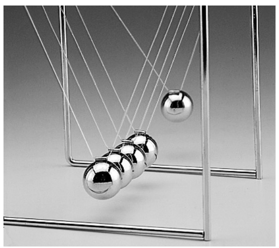
(S. 74)



V1 Mit einem Experimentiermotor werden Gegenstände gehoben. Man misst jeweils Spannung, Stromstärke, Zeit, Hubhöhe und Masse. Beim Vergleich der Energiemengen stellt man fest, dass die erhaltene potenzielle Energie (Energie der Lage) viel kleiner ist als die dafür eingesetzte elektrische Energie.

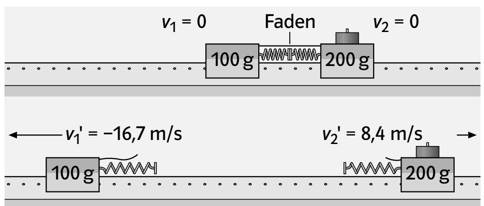
(S. 77)

V1 Eine Münze gleitet auf einer glatten Unterlage gegen eine ruhende Münze. Bei zwei gleichen Münzen beobachtet man entweder, dass sich nur eine Münze weiterbewegt, oder dass sich beide in unterschiedlichen Richtungen bewegen. Bei unterschiedlichen Münzen bewegen sich stets beide Münzen nach dem Stoß.



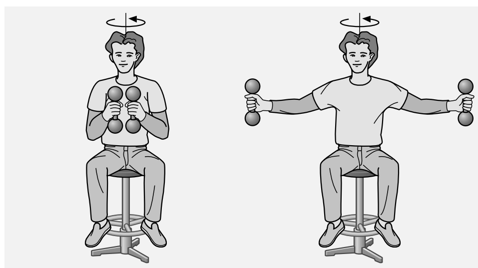
V2 Fünf gleiche Kugelpendel sollen sich in der Ruhelage berühren (siehe Abbildung links). Wird eine der äußeren Kugeln ausgelenkt und dann losgelassen, so schlägt auf der anderen Seite nur die letzte Kugel aus. Sie erreicht die Ausgangshöhe der ersten Kugel. Werden von der einen Seite gleich zwei äußere Kugeln ausgelenkt, so werden auf der anderen Seite auch die beiden letzten Kugeln in Bewegung gesetzt.

V3 Zwischen zwei Gleitern einer Luftkissenfahrbahn befindet sich eine gespannte Feder, die durch einen Faden in ihrem Zustand gehalten wird. Durchtrennt man den Faden, entfernen sich die Gleiter voneinander.



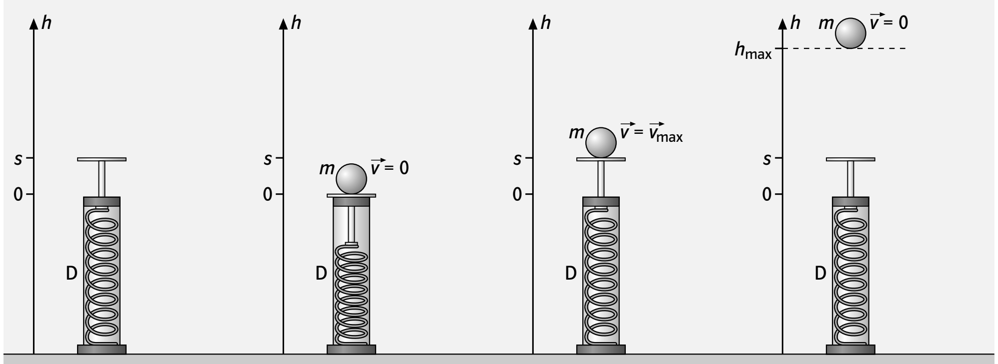
(S. 82)

V1 Eine Person sitzt auf einem Drehschemel und hält Hanteln in den Händen. Der Schemel wird in Rotation versetzt. Die Rotation wird langsamer, wenn die Arme ausgestreckt, sie wird wieder schneller, wenn die Arme wieder angezogen werden.



Material Lösungen der Aufgaben

(S. 65) **A1** ◒ Beim „Spannen" des Katapults wird Spannenergie in das System gebracht (genauer: Spannenergie in der Feder gespeichert). Beim Entspannen der Feder wird diese Energie zunächst in Bewegungsenergie des Geschosses und anschließend in Höhenenergie des Geschosses umgesetzt.



entspannte Feder

A: gespannte Feder

$E_A = E_{s,A}$

$E_{s,A} = \frac{1}{2} D \cdot s^2$

B: Geschoss mit maximaler Geschwindigkeit

$E_B = E_{B,B} + E_{H,B}$

$E_{B,B} = \frac{1}{2} m \cdot v_{max}^2$

$E_{H,B} = m \cdot g \cdot s$

C: Geschoss in maximaler Höhe

$E_C = E_{H,C}$

$E_{H,C} = m \cdot g \cdot h_{max}$

Unter der Annahme eines abgeschlossenen Systems (d.h. keine Energieumsetzung über die Systemgrenzen hinweg, z.B. infolge von Reibung) gilt: $E_A = E_B = E_C$. Ist die Spannstrecke s klein gegenüber der erreichten Flughöhe h_{max}, so kann der Term $E_{H,B}$ vernachlässigt werden und es gilt in guter Näherung:

$$E_{S,A} = E_{B,B} = E_{H,C}, \text{ d.h., } \frac{1}{2} D \cdot s^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_{max}^2 = m \cdot g \cdot h_{max}$$

A2 ◒ Gegeben ist die Geschwindigkeit, die der Ball nach oben erhält:

$$v = 12\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Aufgrund der Energieerhaltung gilt, dass die Bewegungsenergie im Startpunkt und die Höhenenergie im oberen Umkehrpunkt gleich groß sind:

$$E_B = E_H$$

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h$$

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{\left(12\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 7{,}34\,\text{m}$$

Der Ball erreicht eine Höhe von 7,34 m.

A3 ◒ Die Person springt aus einer Höhe von h auf das Trampolin. Bei Erreichen des Trampolins hat sich ihre Höhenenergie um $\Delta E_{H,1} = m \cdot g \cdot h$ verringert. Ab da dehnt sich das Trampolin um die Strecke s (d.h., ein positiver Wert von s bedeutet eine Dehnung des Trampolins nach unten). Die Höhenenergie der Person verringert sich weiter um den Betrag $\Delta E_{H,2} = m \cdot g \cdot s$ während gleichzeitig die Spannenergie des Trampolins um $\Delta E_S = \frac{1}{2} D \cdot s^2$ zunimmt. Insgesamt ergibt sich aus dem Energieerhaltungssatz somit:

$$\Delta E_H = \Delta E_S$$

$$\Leftrightarrow \quad m \cdot g \cdot h + m \cdot g \cdot s = \frac{1}{2} D \cdot s^2$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{1}{2} D \cdot s^2 - m \cdot g \cdot s - m \cdot g \cdot h = 0$$

Das ist eine quadratische Gleichung für die gesuchte Größe s. Als Lösung ergibt sich (vgl. mathematische Formelsammlung):

(S. 65) $s_{1,2} = \frac{m \cdot g \pm \sqrt{m^2 \cdot g^2 + 2D \cdot m \cdot g \cdot h}}{D}$

Einsetzen der gegebenen Größen liefert:

$$s_{1,2} = \frac{80\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \pm \sqrt{6\,400\,\text{kg}^2 \cdot 96{,}24\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}^4} + 12\,000\,\frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 80\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1{,}20\,\text{m}}}{6\,000\,\frac{\text{N}}{\text{m}}}$$

$$= \frac{784{,}8\,\text{N} \pm \sqrt{615\,936\,\text{N}^2 + 11\,301\,120\,\text{N}^2}}{6\,000\,\frac{\text{N}}{\text{m}}}$$

$$= \frac{784{,}8\,\text{N} \pm \sqrt{11\,917\,056\,\text{N}^2}}{6\,000\,\frac{\text{N}}{\text{m}}}$$

$$= \frac{784{,}8\,\text{N} \pm 3\,452{,}1\,\text{N}}{6\,000\,\frac{\text{N}}{\text{m}}}$$

Die beiden Lösungen der quadratischen Gleichung lauten:

$$s_1 = \frac{784{,}8\,\text{N} + 3\,452{,}1\,\text{N}}{6\,000\,\frac{\text{N}}{\text{m}}} = 0{,}71\,\text{m}$$

$$s_2 = \frac{784{,}8\,\text{N} - 3\,452{,}1\,\text{N}}{6\,000\,\frac{\text{N}}{\text{m}}} = -0{,}44\,\text{m}$$

Da ein positiver Wert von s gesucht ist (entspricht einer Dehnung des Trampolins nach unten) ist die erste Lösung das gesuchte Ergebnis.

Bemerkung: Die zweite Lösung entspricht einer Dehnung des Trampolins nach oben. Bei dieser Dehnung ist die Spannenergie des Trampolins genauso groß wie die Änderung der Höhenenergie der Person, wenn diese die Fallstrecke $1{,}20\,\text{m} - 0{,}44\,\text{m} = 0{,}76\,\text{m}$ zurückgelegt hat.

(S. 67) **A1** ◒ Der Term für die Spannenergie lässt sich durch einen Versuch mit einem Federpendel aus der Höhenenergie herleiten:

An eine Feder mit der Federhärte D wird eine Kugel der Masse m mit der Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ gehängt. Die Feder dehnt sich um die Strecke Δs, die Kugel befindet sich nun in der Ruhelage. Die Ausdehnung der Feder ist proportional zur wirkenden Kraft, es gilt das Hooke'sche Gesetz:

$$F = \Delta s \cdot D$$

Nun hebt man die Kugel um die Strecke Δs an, die Feder ist nun also wieder entspannt. Lässt man die Kugel nun los, beginnt sie um ihre Ruhelage zu schwingen, ihre Amplitude beträgt dabei Δs.
Während der Schwingung werden Höhen- und Bewegungsenergie der Kugel sowie die Spannenergie der Feder ständig ineinander überführt.
Man vergleicht nun die Situationen im oberen und unteren Umkehrpunkt: Im oberen Umkehrpunkt sind die Bewegungsenergie der Kugel und die Spannenergie der Feder sind jeweils null, die Kugel besitzt Höhenenergie. Bezogen auf den unteren Umkehrpunkt beträgt diese

$$E_H = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot 2\Delta s$$

Im unteren Umkehrpunkt besitzt die Kugel dann weder Bewegungs- noch Höhenenergie, die Feder ist jedoch um die Strecke $2\Delta s$ gedehnt und besitzt entsprechend Spannenergie.
Es gilt der Energieerhaltungssatz:

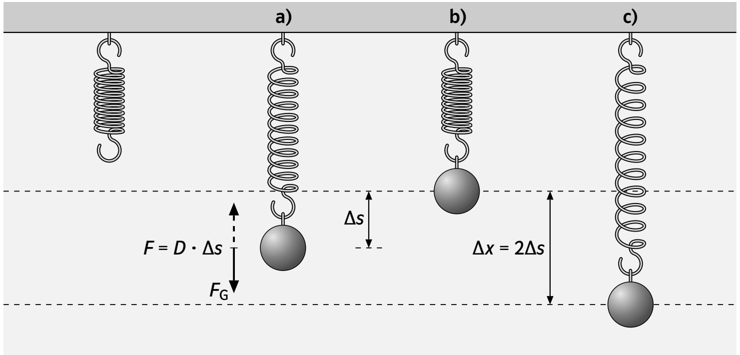
$$E_H = E_S = m \cdot g \cdot 2\Delta s$$

Ersetzt man den Ausdruck $m \cdot g$ durch $\Delta s \cdot D$ ergibt sich:

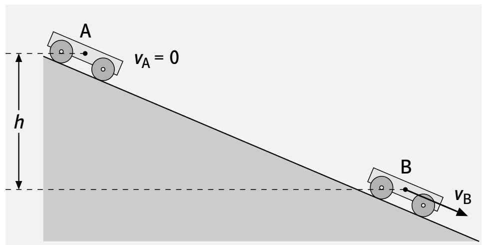
$$E_S = \Delta s \cdot D \cdot 2\Delta s = \frac{1}{2} D \cdot (2\Delta s)^2$$

(S. 67) Die Größe $2\,\Delta s$ gibt die Gesamtausdehnung der Feder im unteren Umkehrpunkt an. Damit kann man die Spannenergie einer um die Strecke Δx gedehnten Feder angeben mit:

$$E_S = \frac{1}{2} D \cdot \Delta x^2$$



(S. 68) **A1**



$$E_A = E_{H,A} + E_{B,A} = m \cdot g \cdot h + 0 \quad (\text{da } v_A = 0)$$

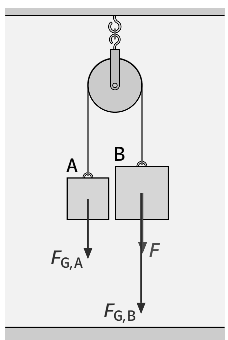
$E_B = E_{H,B} + E_{B,B} = 0 + \frac{1}{2} m \cdot v_B^2$ (Festlegung des Nullniveaus für die Höhenenergie). Ist das System abgeschlossen, gilt:

$$E_A = E_B$$

Also: $m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2$
Die Masse m kürzt sich heraus (da sowohl E_H als auch E_B proportional zur Masse des Wagens sind).
Es gilt also: $v_B = \sqrt{2g \cdot h}$, d. h., die Endgeschwindigkeit v_B hängt neben der Erdbeschleunigung g nur von der Starthöhe h ab.

(S. 69) **A1** Der Hinweis verrät es schon: Die Eigenrotation der Stahlkugel beansprucht einen Teil der Energie, der durch eine größere Starthöhe kompensiert werden müsste. Beispiel Kreisel: Der Kreisel bewegt sich im Idealfall nicht fort, sondern rotiert nur um seine eigene Achse. Trotzdem wird dabei Masse mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt. Die Bewegungsenergie muss dem Kreisel zugeführt werden, damit er diese Bewegung ausführen kann.

(S. 71) **A1** **a)** Auf den Körper B wirkt die Kraft $F = F_{G,B} - F_{G,A} = 9{,}81\,\text{N}$ nach unten, sodass B eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung (nach unten) ausführt. Der Körper A vollführt mit der gleichen Beschleunigung wie B eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung (nach oben).



b) Durch die Kraft $F = 9{,}81\,\text{N}$ wird ein Körper der Masse $m = m_A + m_B = 3\,\text{kg}$ beschleunigt:

$$F = m \cdot a \quad \Leftrightarrow \quad a = \frac{F}{m} = \frac{9{,}81\,\text{N}}{3\,\text{kg}} = 3{,}27\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Es gelten also die Bewegungsgesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung:

$v = a \cdot t + v_0$ (mit $v_0 = 0$) und $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$ (mit $s_0 = 0$)

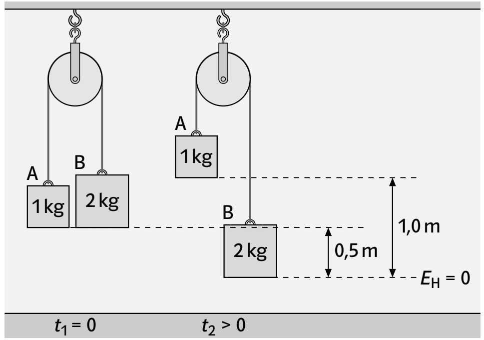
Daraus ergibt sich:

$$t = \frac{v}{a} \quad \Leftrightarrow \quad s = \frac{1}{2} a \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^2 \quad \Leftrightarrow \quad s = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{a} \quad \Leftrightarrow \quad v = \sqrt{2s \cdot a}$$

Zum Zeitpunkt t_2 hat jeder Körper die Strecke $s = 0{,}5\,\text{m}$ zurückgelegt.
Die Geschwindigkeit beträgt dann:

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot 0{,}5\,\text{m} \cdot 3{,}27\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1{,}8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

(S.71) **c)** Die Energie E_1 zum Zeitpunkt t_1 ist die Summe aus den Höhenenergien der Körper A und B, die sich in 0,5 m Höhe über dem Nullniveau für die Höhenenergie befinden:



$$E_1 = 1\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0{,}5\,\text{m} + 2\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0{,}5\,\text{m}$$
$$= 14{,}715\,\text{J}$$

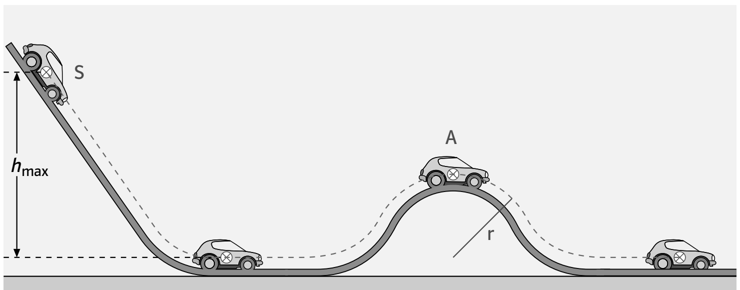
Die Energie E_2 zum Zeitpunkt t_2 ist die Summe aus den Bewegungsenergien der Körper A und B und der Höhenenergie des Körpers A, der sich nun 1,0 m über dem Nullniveau befindet:

$$E_2 = \frac{1}{2} \cdot 1\,\text{kg} \cdot v_2^2 + \frac{1}{2} \cdot 2\,\text{kg} \cdot v_2^2 + 1\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1{,}0\,\text{m} = 1{,}5\,\text{kg} \cdot v_2^2 + 9{,}81\,\text{J}$$

Nach dem Energieerhaltungssatz sind die Energien gleich:

$$E_2 = E_1 \quad \Leftrightarrow \quad 1{,}5\,\text{kg} \cdot v_2^2 + 9{,}81\,\text{J} = 14{,}715\,\text{J} \quad \Leftrightarrow \quad v_2 = \sqrt{\frac{14{,}715\,\text{J} - 9{,}81\,\text{J}}{1{,}5\,\text{kg}}} \quad \Leftrightarrow \quad v_2 = 1{,}8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A2 **a)**



Ist die Starthöhe h größer als der Radius r der zu durchfahrenden Kreisbahn, dann besitzt der Wagen im Punkt A Höhenenergie $E_{H,A}$ und Bewegungsenergie $E_{B,A}$; er kann also den höchsten Punkt A durchfahren. Um auf einer Kreisbahn fahren zu können, muss auf den Wagen die Zentripetalkraft $F_Z = \frac{m \cdot v^2}{r}$ wirken. Sie wird in diesem Fall durch die Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ verursacht.

b) Je größer die Starthöhe h und damit die Geschwindigkeit v wird, desto größer muss die erforderliche Zentripetalkraft F_Z sein. Da diese nicht größer als F_G sein kann, ergibt sich für die maximale Geschwindigkeit im Punkt A, mit der der Wagen die Kreisbahn durchfahren kann:

$$F_Z = F_G \quad \Leftrightarrow \quad \frac{m \cdot v_{max}^2}{r} = m \cdot g \quad \Rightarrow \quad v_{max} = \sqrt{r \cdot g}$$

Der Energiesatz liefert eine Aussage über die maximale Starthöhe:

$$E_{H,S} = E_{H,A} + E_{B,A} \quad \Leftrightarrow \quad m \cdot g \cdot h_{max} = m \cdot g \cdot r + \frac{1}{2} m \cdot v_{max}^2 \quad \Leftrightarrow \quad h_{max} = r + \frac{1}{2}\frac{v_{max}^2}{g}$$

Einsetzen von v_{max} ergibt:

$$h_{max} = r + \frac{1}{2}\frac{r \cdot g}{g} = \frac{3}{2} r$$

Für $h > h_{max}$ reicht die Gewichtskraft nicht aus, um den Wagen auf der Bahn zu halten.

(S. 71) **A3** ◒

a) Im linken Umkehrpunkt des Pendels ist die Geschwindigkeit des Pendelkörpers null, d. h. er hat hier nur Höhenenergie. Bei der Bewegung des Pendelkörpers nach rechts verringert sich die Höhenenergie und die Bewegungsenergie nimmt zu. Im tiefsten Punkt ist die Geschwindigkeit des Pendelkörpers maximal und gleichzeitig ist die Höhenenergie minimal (bzw. gleich null, wenn man – wie im Kontomodell in der Grafik dargestellt – das Nullniveau der Höhenenergie so definiert). Die anfänglich vorhandene Höhenenergie wurde vollständig in Bewegungsenergie überführt. Auf dem Weg zum rechten Umkehrpunkt erfolgt die Energieüberführung in umgekehrter Richtung, d. h., die Bewegungsenergie nimmt ab und die Höhenenergie nimmt zu bis sie im Umkehrpunkt wieder den ursprünglichen Betrag hat und die Bewegungsenergie null ist.
Da die Höhenenergie proportional mit der Höhe wächst, hat der Pendelkörper an dieser Stelle die Hälfte der ursprünglichen Höhenenergie. Wegen der Energieerhaltung wurde die andere Hälfte in Bewegungsenergie des Pendelkörpers überführt. Es sind an dieser Stelle also beide Balken zur Hälfte gefüllt.

b) Am Anfang beträgt die Höhenenergie

$$E_H = 0{,}1\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 0{,}3\,\text{m} = 0{,}2943\,\text{J}$$

Ohne Reibung wird diese Höhenenergie vollständig in Bewegungsenergie überführt:

$$E_B = E_H$$

Die Formel für E_B wird eingesetzt und nach v aufgelöst:

$$v = \sqrt{2\frac{E_H}{m}}$$

Daraus ergibt sich $v = 2{,}4\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

c) Die im System enthaltene Energie hat sich nicht verändert. Wenn das Pendel die gleiche Höhenenergie wie vorher hat, so muss es auch die gleiche Höhe erreichen.

d) Da die Reibung nicht berücksichtigt wird, stellt dieses Fadenpendel eine Idealisierung dar. Tatsächlich geht dem System thermische Energie verloren. Unter Berücksichtigung dieser thermischen Energie gilt das Energieerhaltungsprinzip.

A4 ●

a) Da der Wagen zum Stehen kommt, muss seine ursprüngliche Bewegungsenergie während dieser 100 ms vollständig in andere Energieformen überführt worden sein.

b) Gegeben ist: $\Delta t = 0{,}1\,\text{s}$, $m = 1500\,\text{kg}$ und $v = 64\,\frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{64}{3{,}6}\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 18\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Daraus folgt:

$$E_B = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1500\,\text{kg} \cdot \left(\frac{64}{3{,}6}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 237\,037\,\text{J}$$

c) Analog zu Teilaufgabe b) ergibt sich für $m = 70\,\text{kg}$:

$$E_B = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 70\,\text{kg} \cdot \left(\frac{64}{3{,}6}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 11\,061\,\text{J}$$

Dieselbe Energie hat die Person in einer Höhe von

$$h = \frac{E}{m \cdot g} = \frac{11\,061\,\text{J}}{70\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 16{,}1\,\text{m}$$

Der Aufprall mit 64 km/h entspricht also einem Sturz aus 16 m Höhe.

d) Ein Sturz aus 16 m Höhe überlebt im Normalfall kein Mensch. Physikalisch gesehen liegt das daran, dass die Bewegungsenergie bzw. Höhenenergie von rund 11 kJ beim Aufprall im Körper umgewandelt wird und so zu schweren Knochenbrüchen und inneren Verletzungen führt. Um das zu verhindern, muss man dafür sorgen, dass bei einem Autounfall die Bewegungsenergie der Insassen möglichst auf andere Gegenstände übertragen wird und nicht innerhalb der Körper der Insassen umgewandelt wird.
Dies gelingt mit Hilfe von Gurt und Knautschzone. Durch den Gurt werden die Insassen mit dem Pkw „verbunden". Beim Aufprall wird dann die Bewegungsenergie des Fahrzeugs (einschließlich der Bewegungsenergie der Insassen) in Verformungsenergie der Knautschzone

(S.71) überführt. Die Bewegungsenergie der Insassen wird also mit in die Verformung der Knautschzone übertragen. Dadurch, dass sich die Gurte bei Belastung dehnen wird auch hierhin ein Teil der Bewegungsenergie der Insassen übertragen und der Airbag bremst den Kopf und übernimmt so einen Teil der Bewegungsenergie des Kopfes, der ja nicht direkt über den Gurt mit dem Pkw verbunden ist.

Die Kraft, mit der eine angegurtete Person bei einem Aufprall gebremst wird, lässt sich leicht abschätzen. Geht man von einer gleichmäßig verzögerten Bewegung aus, so beträgt die mittlere Geschwindigkeit des Fahrzeugs während des Bremsvorgangs $v_{\text{Mittel}} = \frac{v}{2} \approx 9\,\text{m/s}$. Die Bremszeit beträgt $\Delta t = 0{,}1\,\text{s}$ und damit ergibt sich für den „Bremsweg“ $s = v_{\text{Mittel}} \cdot \Delta t = 0{,}9\,\text{m}$ (das ist gerade die Knautschzone des Pkw). Aus $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$ ergibt sich die Beschleunigung zu

$$a = \frac{2s}{t^2} = \frac{1{,}8\,\text{m}}{0{,}01\,\text{s}^2} = 180\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 18\,g.$$

Die mittlere Bremskraft, die auf die Insassen beim Aufprall wirkt, beträgt also rund das 18-fache der Gewichtskraft der Insassen.

Die Rechnung macht deutlich, warum ein Mensch einen Sturz aus 16 m Höhe nicht überlebt: Hier fehlt die Knautschzone! Der „Bremsweg“ beträgt dann quasi nur ein paar Zentimeter. Entsprechend kürzer ist dann auch die „Bremszeit“ und entsprechend größer die „Bremsverzögerung“ bzw. die „Bremskraft“. Beispiel: Verkürzt sich der Bremsweg von 90 cm auf 9 cm, so verkürzt sich die Bremszeit auf 0,01 s und die Beschleunigung wächst auf 180 g.

Dieser Auszug aus dem Lehrerband **Impulse Physik Oberstufe** wurde auf der Grundlage der Lehrerbände der bisherigen Ausgaben **Impulse Physik 11–13 Oberstufe Niedersachsen** und **Impulse Physik Oberstufe** (Autoren: Lars Blüggel, Wilhelm Bredthauer, Klaus Gerd Bruns, Dr. Oliver Burmeister, Hans Jerg Dorn, Manfred Grote, Dr. Ludger Hannibal, Annelie Hegemann, Dr. Thilo Höfer, Florian Karsten, Harald Köhncke, Michael Renner, Michael Rode, Norbert Schell, Martin Schmidt, Dr. Helmut Schmöger, Horst Welker, Peter Wojke, Dr. Frank Zimmerschied) von Lars Blüggel, Markus Ketter und Maria Lenk erstellt.

Bildquellen
Bilder: 45.1 laif, Köln; **47.2** Grote, Manfred, Lüchow; **48.2** Zuckerfabrik Fotodesign, Stuttgart
Illustratoren: **47.1; 47.3; 48.1; 48.3; 48.4; 49.1; 51.1; 51.2; 51.3; 52.1; 52.2** Marzell, Alfred, Schwäbisch Gmünd:

Entstanden in Zusammenarbeit mit dem Projektteam des Verlages.

Gestaltung: normaldesign GbR, Maria und Jens-Peter Becker, Schwäbisch Gmünd.
DTP/ Satz: B2 Büro für Gestaltung, Andreas Staiger, Stuttgart.
Druck: Göhring Druck GmbH, Waiblingen-Beinstein

Printed in Germany.
ISBN: 978-3-12-773041-8