

## LÖSUNGEN

### Aufgabe 5.2.1

Der Impuls (Schwung, Wucht) eines Körpers hängt von seiner Masse und seiner Geschwindigkeit ab. Ein langsamer Medizinball lässt also das Buch ebenso umfallen, wie ein heftig geworfener Tennisball. Ein Tischtennisball muss schon eine große Geschwindigkeit haben, damit er bei seiner kleinen Masse das Buch umwerfen kann.

### Aufgabe 5.2.2

- a) Aus der Definition des Impulses folgt:  $p = m \cdot v$ ; daraus folgt  $p = 1 \text{ t} \cdot 108 \text{ km/h} \rightarrow p = 1.000 \text{ kg} \cdot 30 \text{ m/s} \rightarrow p = 30.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$  oder  $p = 30.000 \text{ Hy}$
- b) Ein 100-Meter-Weltrekordläufer benötigt mit Start für 100 m in etwa 10 s. D.h. seine Geschwindigkeit beträgt etwas mehr als  $v = 10 \text{ m/s}$ . Sein Impuls ist deshalb etwas größer als  $p = 90 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s} \rightarrow p = 900 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$  oder  $p = 900 \text{ Hy}$

c) Internetrecherchen liefern:

1	Luftgewehr-Kugel	$m = 0,5 \text{ g}$ $v = 150 \text{ m/s}$		$p = 7,5 \cdot 10^2 \text{ Hy}$ $p = 0,075 \text{ Hy}$
2	Tennisball	$m = 58 \text{ g} \rightarrow m = 0,058 \text{ kg}$ $v = 190 \text{ km/h} \rightarrow v = 52,8 \text{ m/s}$		$p = 3,06 \cdot 10^0 \text{ Hy}$ $p = 3,06 \text{ Hy}$
3	Eishockey-Puck	$m = 160 \text{ g}$ $v = 150 \text{ km/h} \rightarrow v = 41,7 \text{ m/s}$		$p = 6,67 \cdot 10^0 \text{ Hy}$ $p = 6,67 \text{ Hy}$
4	Fahrradfahren	$m = 50 \text{ kg}$ $v = 1 \text{ m/s}$		$p = 5 \cdot 10^1 \text{ Hy}$ $p = 50 \text{ Hy}$
5	100-Meter-Lauf	$m = 50 \text{ kg}$ $v = 7,7 \text{ m/s}$ 100 m in 13 Sekunden		$p = 3,86 \cdot 10^2 \text{ Hy}$ $p = 386 \text{ Hy}$
6	Motorrad innerhalb der Stadt	$m = 150 \text{ kg}$ $v = 50 \text{ km/h} \rightarrow v = 1,39 \text{ m/s}$		$p = 2,08 \cdot 10^3 \text{ Hy}$ $p = 2,080 \text{ Hy}$
7	PKW in der Fußgängerzone	$m = 2 \text{ t} \rightarrow m = 2.000 \text{ kg}$ $v = 7 \text{ km/h} \rightarrow v = 1,94 \text{ m/s}$		$p = 3,89 \cdot 10^3 \text{ Hy}$ $p = 3.890 \text{ Hy}$
8	Formel-1-Auto	$m = 600 \text{ kg}$ $v = 300 \text{ km/h} \rightarrow v = 83 \text{ m/s}$		$p = 5,00 \cdot 10^4 \text{ Hy}$ $p = 50.000 \text{ Hy}$
9	PKW Landstraße	$m = 2 \text{ t} \rightarrow m = 2.000 \text{ kg}$ $v = 100 \text{ km/h} \rightarrow v = 2,78 \text{ m/s}$		$p = 5,56 \cdot 10^4 \text{ Hy}$ $p = 55.600 \text{ Hy}$
10	Kampffjet	$m = 14 \text{ t} = 14.000 \text{ kg}$ $v = \text{Mach } 2 \rightarrow 700 \text{ m/s}$		$p = 9,8 \cdot 10^6 \text{ Hy}$ $p = 9.800.000 \text{ Hy}$
11	ICE bei voller Fahrt	$m = 350 \text{ t} \rightarrow m = 350.000 \text{ kg}$ $v = 300 \text{ km/h} \rightarrow v = 83,3 \text{ m/s}$		$p = 2,92 \cdot 10^7 \text{ Hy}$ $p = 29.200.000 \text{ Hy}$
12	Airbus A380	$m = 400 \text{ t} = 400.000 \text{ kg}$ $v = 900 \text{ km/h} = 250 \text{ m/s}$		$p = 1,00 \cdot 10^8 \text{ Hy}$ $p = 100.000.000 \text{ Hy}$
13	Titanic	$m = 5,32 \cdot 10^7 \text{ kg} = 53.200.000 \text{ kg}$ $v = 21 \text{ Knoten} \rightarrow v = 10,8 \text{ m/s}$		$p = 5,75 \cdot 10^8 \text{ Hy}$ $p = 575.000.000 \text{ Hy}$

### Recherche 5.3.1

Z.B. Billardspiel, Impulsänderungen bei Auffahrnfällen, Boxhiebe

### Experiment 5.3.2

Wenn man sich von einem Experimentierwagen abstößt, kann man den Impulsübertrag an der Bewegung des Experimentierwagens sehen. Wenn eine Kraftplattform zur Verfügung steht, könnte man diesen Impulsübertrag exakt messen. In einem Modellversuch auf der Luftkissenfahrbahn kann man zeigen, dass zwei Wagen mit gleicher Masse, die durch eine Feder auseinander gestoßen werden, mit der gleichen Geschwindigkeit – also auch mit dem gleichen Impuls – auseinanderfahren.

### Experiment 5.3.3

Die angeschnippte Münze trifft mit einem Impuls  $p$  auf die zweite Münze und überträgt diesen Impuls vollständig auf diese zweite Münze. Durch Reibungseffekte mit der Tischoberfläche verliert die zweite Münze ihren Impuls anschließend an den Tisch bzw. an die Erde.

### Aufgabe 5.3.4

- a) Beim Anfahren haben die Fahrgäste zunächst keinen Impuls. Wenn der Zug also anfährt, werden die Fahrgäste zunächst in ihren Sitz gedrückt, wenn sie in Fahrtrichtung sitzen. Durch den Sitz werden sie auf die Zuggeschwindigkeit beschleunigt und haben dann einen Impuls entsprechend

$$p = m_{\text{Fahrgast}} \cdot v_{\text{Zuggeschwindigkeit}}$$

Beim Abbremsen haben die Fahrgäste zunächst den Impuls

$$p = m_{\text{Fahrgast}} \cdot v_{\text{Zuggeschwindigkeit}}$$

während der Zug seine Geschwindigkeit reduziert. Durch die Reibungskräfte zwischen Sitz und Fahrgast wird der Impuls des Fahrgasts bis zum Stillstand abgebaut. Hierbei kippen die Fahrgäste, wenn sie in Fahrtrichtung sitzen, eventuell mit dem Oberkörper nach vorne.

- b) Im Impulsbild: Ein Rasensprenger schleudert Wasser mit einem Impuls in eine Richtung. Der Rasensprenger erhält, entsprechend dem Impulserhaltungssatz, einen gleich großen Impuls in die entgegengesetzte Richtung.

Im Kraftbild: Das Wasser wird mit der Kraft  $F$  ausgeschleudert. Die Reactio wirkt betragsgleich in die entgegengesetzte Richtung auf den Rasensprenger.

### Aufgabe 5.3.5

- a) Das Auto mit der Masse  $m$  wurde beim Beschleunigen durch die Motorkraft  $F$  auf die Geschwindigkeit  $v$  gebracht.  
Nach der Formel  $p = m \cdot v$  ergibt sich  $p = 30.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 30.000 \text{ Hy}$
- b) Das Auto hat einen Impuls von z.B.  $+ 30.000 \text{ Hy}$ , also muss die Erde einen Impuls von  $-30.000 \text{ Hy}$  haben. Der Impuls des Autos kommt aus der Erde.
- c) Nach der Formel für die Impulsänderung  $\Delta p = F \cdot \Delta t$  verliert das Auto durch die Bremskraft  $F$  in der Zeit  $\Delta t$  den Impuls  $\Delta p$ . Der Impuls ( $30.000 \text{ Hy} = 30.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ), den das Auto vor dem Abbremsen hatte, wird auf die Erde übertragen.
- d) Bei einer sanften Abbremsung wirkt eine kleine Kraft  $F$  eine lange Zeit  $\Delta t$ ; bei der Vollbremsung wirkt eine größere Kraft  $F$  in einer kürzeren Zeit  $\Delta t$ . Bei einem Auffahrnfall wirkt eine zerstörerisch große Kraft  $F$  in einer extrem kurzen Zeit  $\Delta t$ . Zwischen der Bremskraft  $F$  und der Impulsänderung  $\Delta p$ , bzw. Bremszeit  $\Delta t$ , gilt die Formel:  $\Delta p = F \cdot \Delta t$ .

## LÖSUNGEN

### Aufgabe 5.3.6

a) Aus  $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$  und  $\Delta p = \Delta m \cdot v$  ergibt sich  $\Delta m = \frac{F \cdot \Delta t}{v} \rightarrow \Delta m = 320 \text{ kg}$

b) Für die Ausströmgeschwindigkeit gilt:  $v = \frac{F \cdot \Delta t}{\Delta m}$

Bei Verdopplung der ausgestoßenen Masse ergibt sich eine Halbierung der Ausströmgeschwindigkeit auf 500 m/s.

c) Nach dem Energieerhaltungssatz gilt für die pro Sekunde verbrannte Kerosinmenge:

$$\Delta E_{\text{Kerosin}} = \Delta E_{\text{kinGas}} \quad \text{mit} \quad \Delta E_{\text{kinGas}} = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot v^2$$

Das heißt, eine Verdopplung der ausgestoßenen Masse  $\Delta m$  pro Sekunde bei halbiert Strahlstromgeschwindigkeit  $v$  führt zu einer Halbierung der eingesetzten Kerosinmenge  $\Delta E_{\text{Kerosin}}$ .

d) Die Reduktion der Austrittsgeschwindigkeit bei gleichzeitig größerem Massendurchsatz hat nicht nur den Vorteil einer reduzierten Kerosinmenge, sondern auch den Vorteil einer wesentlichen Lärmreduktion.

### Aufgabe 5.3.7

a) Nach der Formel  $p = m \cdot v$  ergibt sich:  $p = 3,5 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 3,5 \cdot 10^7 \text{ Hy}$

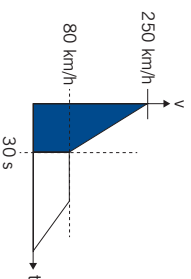
b) Bei 80 km/h hat der A380 noch einen Impuls von  $p = 1,1 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 1,1 \cdot 10^7 \text{ Hy}$ .

Für die Bremszeit gilt:  $\Delta t = \frac{\Delta p}{F_B}$ ; damit ergibt sich eine Bremszeit von

$$\Delta t = \frac{2,4 \cdot 10^7 \text{ Hy}}{4 \cdot 200 \text{ kN}} = 30 \text{ s}$$

c) Für die Verzögerung gilt:  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{170 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{30 \text{ s}} = \frac{47 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{30 \text{ s}} = 1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Das zugehörige v-t-Diagramm hat folgende Form:



Das Diagramm zeigt in den ersten 30 Sekunden den Bremsvorgang mit den Triebwerken im Umkehrmodus c, dann rollt das Flugzeug mit konstanter Geschwindigkeit und wird anschließend mit den Scheibenbremsen bis zum Stillstand abgebremst. Die Fläche unter dem v-t-Diagramm in den ersten 30 Sekunden liefert den Bremsweg in der ersten Bremsphase mit den „Umkehrtriebwerken“. Es ergibt sich eine Bremsstrecke von 1,4 km. Das ist etwas mehr als die Beschleunigung oder Verzögerung bei einer S-Bahn-Fahrt.

### Aufgabe 5.4.1

a) Der Impuls, den der Körper beim Herunterfallen bekommt, kommt aus der Erde. Der Impuls des Körpers nach unten ist genauso groß wie der Impuls der Erde nach oben.

b) Die Erde ist von einem Gravitationsfeld umgeben. Der Körper erhält den Impuls nach unten über das Gravitationsfeld aus der Erde.

Im Kräftebild: Die Actio auf den Körper nach unten ist ebenso groß wie die Reactio auf die Erde nach oben.

c) Das „Entgegenfallen“ der Erde kann man nicht wahrnehmen, weil die Masse der Erde so groß ist, dass sich eine vernachlässigbar kleine Geschwindigkeit der Erde nach oben ergibt.

d) Im Schwebeflug übertragen die Rotorblätter des Hubschraubers pro Sekunde einen Impuls nach unten an die Luft (sie schleudern ständig Luft nach unten). Wenn der Hubschrauber mit seinen Rotorblättern genau so viel Impuls pro Sekunde an die Luft nach unten überträgt, wie er über das Gravitationsfeld von der Erde pro Sekunde erhält, dann bleibt der Impuls des Hubschraubers konstant und er schwebt in der gleichen Höhe. Der Hubschrauber entsorgt den Impuls, den er über das Gravitationsfeld bekommt über die nach unten geschleuderte Luft.

Im Kräftebild: Die Actio von den Rotorblättern auf die Luft nach unten ist ebenso groß wie die Reactio der Luft auf die Rotorblätter nach oben.

e) Wenn der Hubschrauber auf dem Boden steht, gibt der Hubschrauber über seine Kufen pro Sekunde genau so viel Impuls an den Boden und damit an die Erde zurück, wie er über das Gravitationsfeld von der Erde bekommt. Wie im Schwebeflug bleibt auch beim Stehen auf dem Boden der Impuls des Hubschraubers konstant. Der Hubschrauber „entsorgt“ den Impuls, den er über das Gravitationsfeld erhält über seine Kufen.

Im Kräftebild: Die Actio der Kufen des Hubschraubers auf den Boden ist ebenso groß wie die Reactio der Unterlage auf den Hubschrauber nach oben.

### Aufgabe 5.4.2

a) Sicht Drehimpuls: Wenn der Motor die Hauptrotorblätter in Drehung versetzt, erhält das Hubschraubergehäuse nach dem Drehimpulserhaltungssatz einen gleich großen Drehimpuls in die entgegengesetzte Drehrichtung. Der Heckrotor entsorgt diesen Drehimpuls auf das Gehäuse an die umgebende Luft. Wenn der Heckrotor ausfällt, beginnt sich das Hubschraubergehäuse entgegen der Rotorrichtung um seine Hochachse zu drehen.

Sicht Drehmoment: Der Motor, der die Hauptrotorblätter in eine Drehrichtung antreibt, wirkt mit einem Actio-Drehmoment auf die Rotorblätter. Das Reactio-Drehmoment wirkt auf den Motor und das Gehäuse des Helikopters zurück und dreht ihn ohne Heckrotor in die andere Richtung. Der Heckrotor wirkt diesem Drehmoment auf das Helikoptergehäuse entgegen und gleicht es exakt aus.

b) Wenn der Pilot den Hubschrauber um seine Hochachse drehen will, dann reduziert er für kurze Zeit die Drehzahl des Heckrotors, oder er steigert die Drehzahl für eine Drehung in die andere Richtung.

### Aufgabe 5.4.3

Die Summe aus  $v_{\text{Rotor}} + v_{\text{Heli}}$  muss kleiner bleiben als die Schallgeschwindigkeit c. Für die Winkelgeschwindigkeit (Drehgeschwindigkeit) gilt  $\omega = v_{\text{Rotor}}/R$ ; damit erhalten wir  $\omega = (c - v_{\text{Heli}})/R$

Daraus ergibt sich:  $\omega < (c - v_{\text{Heli}})/R \rightarrow \omega < 33,7 \cdot 1/\text{s}$   
Über die Formel  $f = \omega/2 \cdot \pi$  kann man berechnen, dass sich der Rotor damit nicht häufiger als 322 Mal pro Minute um die eigene Achse drehen darf.

## LÖSUNGEN

### Aufgabe 5.4.4

a) Will man einen Vorwärtsflug realisieren, dann muss die Auftriebskraft durch die Hauptrotorblätter in Flugrichtung nach vorne gekippt werden. Eine Komponente dieser Auftriebskraft wirkt dann als beschleunigende Kraft in Vorwärtsrichtung, die andere Komponente gleicht die Schwerkraft, die auf den Helikopter wirkt, aus. Die Taumelscheibe verändert den Anstellwinkel während einer Rotationsperiode so, dass der Anstellwinkel immer dann vergrößert wird, wenn das Rotorblatt hinten ist. Wenn das Rotorblatt vorne vorbeistreicht, wird der Anstellwinkel entsprechend verkleinert. Damit der resultierende Effekt in Flugrichtung sein Maximum erreicht, muss der Anstellwinkel phasenverschoben schon seitlich von der Flugrichtung verändert werden.

b) Der Rückwärtsgang entspricht genau der Umkehrung des Vorwärtsflugs. In diesem Fall wird die Auftriebskraft durch die Hauptrotorblätter nach rückwärts gekippt. Die Anstellwinkel der Rotorblätter sind damit vorne größer und hinten kleiner.

c) Die Bewegung in seitliche Richtung erfolgt durch Kippen der Auftriebskraft der Hauptrotorblätter nach links oder rechts relativ zur Flugrichtung. Die Taumelscheibe verändert die Anstellwinkel der Rotorblätter bei einer seitlichen Bewegung nach rechts, in dem die Anstellwinkel auf der linken Seite vergrößert und auf der rechten Seite verkleinert werden – analog erfolgt die Bewegung seitlich nach links.

### Aufgabe 5.5.1

a) Die Tragflächen erzeugen den Auftrieb und tragen u. a. die Querruder und die Start- und Landeklappen.

b) Der Schwerpunkt des Flugzeugs liegt etwas vor dem Angriffspunkt der Auftriebskraft auf die Tragflächen. Das Höhenleitwerk liefert eine Abtriebskraft, die das Flugzeug in der Horizontal-lage hält. Bei dieser Konstellation werden Störungen, z. B. durch Windböen, selbstständig ausgeglichen.

c) Mit den Querrudern, die an den Tragflächen befestigt sind, kann man das Flugzeug um die Längsachse drehen.

d) Das Höhenleitwerk trägt das Höhenruder. Mit dem Höhenruder kann der Pilot das Flugzeug um die Querachse drehen. Damit kann der Pilot einen Steig- oder Sinkflug ausführen.

e) Am Seitenleitwerk sitzt das Seitenruder. Mit dem Seitenruder kann der Pilot das Flugzeug um seine Hochachse drehen.

### Aufgabe 5.5.2

Beim Start des A380 sind die Startklappen ausgefahren und die Dichte der Luft ist am Boden höher als in 10.000 m Höhe. Im Streckenflug in 10.000 m Höhe sind die Tragflächen auf ein Minimum reduziert und die Luftdichte ist wesentlich kleiner – allerdings liegt die Geschwindigkeit bei 0,95 Mach. In beiden Fällen liefert die Tragflächeneinstellung einen Auftrieb, der die Schwerkraft auf das Flugzeug ausgleicht.

### Aufgabe 5.5.3

Bei einem Anstellwinkel von  $\alpha = 5^\circ$  und einer Horizontalgeschwindigkeit von 50 m/s beträgt die vertikale Geschwindigkeitskomponente:

$$v_y = v_h \cdot \tan(\alpha) \rightarrow v_y = 4,37$$

Für die nötige Auftriebskraft  $F_A = 10.000 \text{ N}$  benötigt man einen Massendurchsatz von:

$$\frac{F}{v_y} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad \text{oder} \quad \frac{\Delta m}{\Delta t} \approx 2300 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{oder} \quad \frac{\Delta v}{\Delta t} = 2300 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Das bedeutet, dass die Cessna bei einer Spannweite von etwa 15 m und  $v = 50 \text{ m/s}$  pro Sekunde ein Luftpaket mit einer Grundfläche von etwa 15 m Breite und 50 m Länge beeinflusst.

Um den obigen Massendurchsatz in y-Richtung zu erhalten, benötigen wir eine Luftpaketdicke von etwa 3,0 m, die um  $5^\circ$  nach unten abgelenkt wird, wenn wir mit dem Impulserhaltungssatz rechnen.

### Auftriebskraft

$$\begin{aligned} 1. \quad F &= \frac{\Delta p}{\Delta t} ; \text{ mit } \Delta p = \Delta m \cdot v_y & 4. \quad F &= A \cdot \rho \cdot v_y \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} ; \text{ mit } v_y \sim v \text{ folgt } F \sim A \cdot \rho \cdot v^2 \\ 2. \quad F &= \frac{\Delta m \cdot v_y}{\Delta t} ; \text{ mit } \Delta m = \Delta V \cdot \rho & 5. \quad F &= K \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 ; \text{ mit } K \text{ als Proportionalitäts-} \\ & & & \text{konstante} \\ 3. \quad F &= \frac{\Delta V \cdot \rho \cdot v_y}{\Delta t} ; \text{ mit } \Delta V = A \cdot \Delta s \end{aligned}$$

### Aufgabe 5.6.1

a) Der Schwerpunkt des Flugzeugs liegt in der Nähe der Auftriebskräfte auf die Tragflächen, nur wenig nach vorne hin zum Bug verschoben.

b) Wenn der Schwerpunkt etwas vor dem Angriffspunkt des Auftriebs auf die Tragflächen liegt, müssen die Höhenleitwerke Abtrieb produzieren. Wird die horizontale Fluglage durch eine Störung so verändert, dass der Bug nach unten weist (Drehung des Flugzeugs durch diese Störung um die Querachse), dann erhöht sich der Abtrieb am Höhenleitwerk durch den nun vergrößerten Anstellwinkel des Höhenleitwerks und das Flugzeug wird um die Querachse wieder zurück in die horizontale Fluglage gedreht. Führt eine Störung dazu, dass die Nase des Flugzeugs angehoben wird, dann sinkt das Höhenleitwerk nach unten, der Anstellwinkel wird so verändert, dass am Höhenleitwerk nun Auftrieb entsteht und die Störung damit ausgeglichen wird.

c) Wenn eine Störung dazu führt, dass sich das Flugzeug um die Hochachse dreht, verändert sich der Anstellwinkel des Seitenleitwerks so, dass Kräfte auf das Seitenleitwerk das Flugzeug wieder zurückdrehen.

d) Tragflächen wirken maximal, wenn sie exakt horizontal liegen. Sind sie an einem Flugzeug in V-Form angebracht, dann wirken die resultierenden Kräfte nur mit einer Komponente in vertikaler Richtung. Wird das Flugzeug durch eine Störung um die Längsachse gedreht, dann dreht sich die Tragfläche, die hierbei abgesenkt wird, in die Horizontale und der Auftrieb an ihr wird größer – die andere Tragfläche steht dann noch steiler und ihr Auftrieb wird entsprechend kleiner. Beide Effekte führen dazu, dass das Flugzeug wieder in die Horizontale zurückgedreht wird.