Einführung in die Mechanik

Einführung in die Mechanik

Inhaltsverzeichnis:

1. Flanke – Kopfball – Tor!!!

2. Die Beschreibung und Darstellung von Bewegungen

3. Wie schnell? Wohin?
    3.1 Tempo
    3.2 Richtung
    3.3 Geschwindigkeit

4. Die Zusatzgeschwindigkeit
    4.1 Zusatzgeschwindigkeit als Folge einer Einwirkung
    4.2 Konstruktion der Endgeschwindigkeit
    4.3 Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit
    4.4 Sonderfall: Eindimensionale Bewegungen

5. Die Newtonsche Bewegungsgleichung
    5.1 Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit
    5.2 Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit
    5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit
    5.4 Die Newtonsche Bewegungsgleichung

6. Anwendungen der Newtonschen Bewegungsgleichung
    6.1 Alltagsanwendungen
    6.2 Das Beharrungsprinzip

7. Das Wechselwirkungsprinzip

8. Kraftarten
    8.1 Gravitationskraft
    8.2 Magnetische Kraft
    8.3 Elektrische Kraft
    8.4 Reibungskraft

9. Wenn mehrere Kräfte wirken
    9.1 Kraftpfeile aneinander hängen
    9.2 Kräftegleichgewicht

Autoren:
Prof. Dr. Martin Hopf, Prof. Dr. habil. Thomas Wilhelm,
Dr. Christine Waltner, Dr. Verena Tobias, Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner

Ideen und Mitarbeit:
A. Ilhan Sen, Barbara Scherzer, Anne Zimmer,
Florian Schüller, Christine Michel

Weitere Fotos und Bilder:
M. Bubb, R. Lubinski

Korrektur:
Heiko Pauthner, Wolfgang Reusch, Claudia Hopf

Titelfoto und Fußballbilder:
FFC Wacker München
Fotograf: Markus Römer

1. Flanke – Kopfball – Tor!!!

1. Anna und Marie beim Kopfball

Erfolgreichen Stürmerinnen und Stürmern gelingt es, eine Flanke mit einem Kopfstoß ins Tor zu lenken (Bild 1). Gekonnt ändern sie durch diese Einwirkung die ursprüngliche Bewegungsrichtung des Balles, so dass er ins gegnerische Tor fliegt.

Innerhalb der Physik befasst sich der Bereich der Mechanik mit dem Zusammenhang zwischen der Einwirkung auf einen Gegenstand und der Auswirkung auf seine Bewegung: Er kann dadurch schneller und langsamer werden oder auch seine Richtung verändern.
Bewegungsänderungen haben immer eine Ursache: Trifft der geflankte Ball tatsächlich ins Tor, so ist dies der Erfolg der köpfenden Spielerin. Sie darf sich feiern lassen!

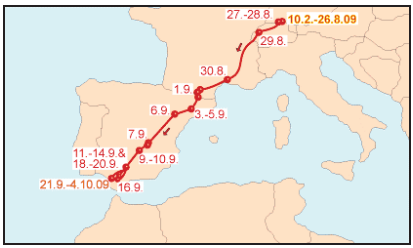
Mit den Gesetzen der Mechanik kann man Bewegungen voraussagen, wenn man die Einwirkung kennt: Wird z. B. der Ball im Tor landen, wenn ein Fußballspieler mit einer gewissen Stärke und Richtung köpft? Umgekehrt ist es auch möglich die Einwirkung zu erschließen, wenn man die Bewegung beobachtet: Mit welcher Stärke und Richtung hat z. B. der Fußballspieler geköpft, wenn der Ball im Tor landet?

Um Fragestellungen dieser Art wird es in den nächsten Kapiteln gehen.

2. Die Darstellung und Beschreibung von Bewegungen

2.1 Weißstorch „Max“ mit einem kleinen Sender

Störche fliegen zum Überwintern in den Süden. Um den Zug der Störche zu verfolgen, wurde ein großes Forschungsprojekt gestartet:
Schon kurz nach der Geburt wurde der Weißstorch Max mit einem kleinen Sender ausgestattet (Bild 2.1). Nun kann in regelmäßigen Abständen der Aufenthaltsort von Max bestimmt und in eine Landkarte eingetragen werden (Bild 2.2).

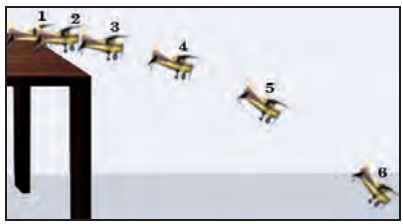


2.2 Flugroute von Max bis 4.10.2009

Die Forschung zum Zug der Störche zeigt ein typisches Beispiel, wie Bewegungen aufgezeichnet werden.

Beschreibung einer Bewegung:
Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, muss zu bestimmten Zeitpunkten festgestellt werden, wo sich der Gegenstand befindet. Sowohl der Zeitpunkt der Messung als auch der Ort des Gegenstandes müssen dabei möglichst genau festgehalten werden.
Die Bewegung wird dabei umso genauer beschrieben, je näher die Zeitpunkte zusammen liegen und umso präziser Ort und Zeit bestimmt worden sind.

Stroboskopbilder
Den Ort eines Gegenstands kann man auch mit einem Fotoapparat bestimmen. Dazu macht man in festen Zeitabständen immer wieder ein Foto. (Der Fotoapparat darf sich dabei nicht bewegen.) Wenn diese Fotos übereinandergelegt werden, entsteht ein sogenanntes **Stroboskopbild** (SB).
In Bild 2.3 ist die Bewegung eines Spielzeugfliegers abgebildet. Dabei wurde immer nach 0,1 Sekunden ein neues Bild gemacht. Damit du das besser erkennst, sind die einzelnen Bilder nummeriert. Jetzt ist die Flugroute des Fliegers sehr genau beschrieben. Du kannst auch erkennen, wann der Flieger am schnellsten war: Zwischen den Punkten 5 und 6 liegt der größte Abstand. Da zwischen zwei Punkten immer 0,1 Sekunden vergangen sind, war er hier am schnellsten. Insgesamt war das 0,5 Sekunden nach dem Start. Das erkennst du daran, dass es sich um das 5. Bild handelt und damit 5mal 0,1 Sekunden seit dem Start vergangen sind.



2.3 Stroboskopbild eines Spielzeugfliegers, zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,1 Sekunden

Aufgaben
① Beschreibe, wie die Bewegung des Storches Max aufgezeichnet wurde.

② Erläutere, weshalb aus dem Bild 2.2 nicht die exakte Flugroute von Max ablesbar ist.

③ In Bild 2.4 siehst du das Stroboskopbild eines Fußballs.

2.4 Stroboskopbild eines Fußballs, zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,04 Sekunden

a) Beschreibe die Bewegung des Balls. Entscheide, ob die Bewegung am linken oder am rechten Bildrand angefangen hat.
b) Wann war der Fußball am schnellsten? Wann war er am langsamsten? Kannst du den genauen Zeitpunkt nach dem ersten Aufprall angeben?

④ Statt immer wieder neue Fotos zu machen, kannst du auch einen Videofilm drehen. Eine Videokamera funktioniert nämlich genauso: Alle 0,04 Sekunden wird ein neues Bild aufgenommen. Das siehst du, wenn du einen Videofilm bildweise ablaufen lässt. Dann kannst du z. B. einen Ablauf wie in Bild 2.5 erkennen.

2.5 Bewegung einer Trampolinspringerin, zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,04 Sekunden

a) Betrachte irgendeinen Film Bild für Bild und beschreibe eine der Bewegungen, die du dort erkennen kannst.
b) Erstelle ein Stroboskopbild dieser Bewegung. Klebe dazu eine Plastikfolie über den Bildschirm. Wähle dir dann einen Punkt auf dem Gegenstand aus und markiere ihn mit Folienstift. Gehe jetzt ein Bild weiter im Film und markiere den Punkt erneut.
c) Erkläre, wann sich der von dir ausgewählte Gegenstand am schnellsten und wann am langsamsten bewegt.

3. Wie schnell? Wohin?

Du hast bereits gelernt, wie Bewegungen beschrieben werden: Zu festgelegten Zeitpunkten wird der Ort des Gegenstands bestimmt. Manchmal reicht das aber nicht. Darum geht es bei folgendem Spiel:

V1: „Blindes Fangen in Zeitlupe“
„Jäger“, „Gejagter“ und zwei Assistenten spielen mit. Der Jäger muss den Gejagten fangen. Aber so wäre das zu einfach! Deshalb werden dem Jäger die Augen verbunden. Damit er trotzdem eine Chance hat den Gejagten zu fangen, sagen die Assistenten dem Jäger, wo er hinlaufen soll. Außerdem darf der Gejagte nur in Zeitlupe gehen.

V2: Ein fernsteuerbares Auto soll entlang einer vorgegebenen Route (Bild 3.1) fahren. Wenn du die Fernsteuerung bedienst, darfst du dabei nicht auf die Strecke schauen, sondern nur auf die Anweisungen deiner Mitschüler hören.

3.1 Ferngesteuertes Auto auf einer vorgegebenen Route

Beobachtung: Bei beiden Versuchen erhältst du Anweisungen wie „rechts“, „links“, „mehr links“, „geradeaus“, „schneller“ oder „stopp“ usw. Es kommt also nicht nur darauf an, wie schnell, sondern auch wohin sich der Jäger bzw. das Auto bewegt.

Dieses Ergebnis kann man verallgemeinern: Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, muss man an jedem Punkt der Bewegung angegeben, **wie schnell und wohin** er sich fortbewegt.

3.1 Tempo

Der Begriff **Tempo** beschreibt in der Physik, wie schnell sich ein Gegenstand bewegt. Das Tempo wird mit dem Buchstaben v bezeichnet und entweder in der Einheit $\frac{km}{h}$ oder $\frac{m}{s}$ angegeben. Dabei sind

$$36\ \frac{km}{h} = 36\ \frac{1000\ m}{3600\ s} = 10\ \frac{m}{s}.$$

Du hast bestimmt auch schon einmal gesehen, wie das Tempo eines Fahrrades oder eines Autos auf einem Tachometer (Bild 3.2) angezeigt wird.

3.2 Tacho eines Fahrrades und eines Autos

Meistens steht aber kein Tacho zur Verfügung. Trotzdem kannst du das Tempo eines Gegenstands ganz einfach bestimmen: Dabei musst du dir immer einen Anfangs- und einen Endpunkt aussuchen, zwischen denen du das Tempo bestimmen möchtest. Messe nun die Zeit, die der Gegenstand benötigt, um diese Strecke zurückzulegen. Dann kannst du das Tempo als Quotient von zurückgelegter Strecke und dafür benötigter Zeit berechnen.
In der Formel wird die zurückgelegte Strecke mit Δs, die dafür benötige Zeit mit Δt bezeichnet. (Das Symbol Δ wird verwendet, weil sowohl die Strecke als auch die Zeit sich auf den Unterschied zwischen Anfangs- und Endpunkt beziehen.)

$$\text{Tempo} = \frac{\text{zurückgelegte Strecke}}{\text{dafür benötigte Zeit}}$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Beispiele

a) *Tempo eines Skaters*
Thomas fährt bei der Blade-Night mit. Für die 18,7 km benötigt er 1,5 h. Sein Tempo ist dann (im Durchschnitt):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{18{,}7\,km}{1{,}5\,h} = 12{,}5\ \frac{km}{h}.$$

b) *Tempo beim 100 m-Lauf*
Am 16.8.2009 lief der Jamaikaner Usain Bolt in Berlin einen neuen Weltrekord (Bild 3.3). Er sprintete die 100 m in 9,58 s. Sein Tempo war (im Durchschnitt):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{100\ m}{9{,}58\ s} = 10{,}4\ \frac{m}{s}.$$

Das sind 37,6 $\frac{km}{h}$.

3.3 Usain Bolt

Bei einem solchen Rennen werden auch die Reaktionszeiten und die Zwischenzeiten der Sprinter aufgezeichnet.
Anhand der Tabelle 1 kannst du das Tempo der drei Erstplatzierten auf verschiedenen Streckenabschnitten berechnen.
Auf welchem Streckenabschnitt erreichte Usain Bolt das größte Tempo? Wie groß war es?
Welches war das größte Tempo, das seine beiden Konkurrenten auf einem Streckenabschnitt erreichten? An welcher Stelle wurde es erreicht?

Platz	Läufer	Reaktionszeit	20m	40m	60m	80m	100m
1	Usain Bolt	0,146 s	2,89 s	4,64 s	6,31 s	7,92 s	9,58 s
2	Tyson Gay	0,144 s	2,92 s	4,70 s	6,39 s	8,02 s	9,71 s
3	Asafa Powell	0,134 s	2,91 s	7,71 s	6,42 s	8,10 s	9,84 s

Tabelle 1 Zeitmessungen für einen 100 m Lauf für verschieden Streckenabschnitte

c) *Tempomessung*
Du kannst eine ähnliche Tempomessung auch selbst durchführen. Um zum Beispiel das Tempo eines Fahrradfahrers zu bestimmen, benötigst du eine Stoppuhr und ein Maßband. Markiere eine Strecke (z. B. 10 m) auf dem Schulhof. Sobald das Fahrrad die erste Markierung durchfährt, startest du die Stoppuhr und stoppst sie, wenn das Fahrrad die zweite Markierung durchfährt. Dann kannst du das Tempo ausrechnen.

d) *Tempo des Spielzeugfliegers*
Betrachte noch einmal die Stroboskopaufnahme des Spielzeugfliegers (Bild 2.3). Du siehst auf Anhieb, dass der Flieger von Punkt 5 zu Punkt 6 die größte Strecke zurückgelegt hat. Das sind ungefähr 18 mm im Bild, das aber verkleinert ist: Der Flieger ist im Bild nur 5 mm, in Wirklichkeit aber 20 cm groß. Damit kannst du ausrechnen, wie lang die Flugstrecke Δs von Punkt 5 zu Punkt 6 war:

$\Delta s = (20\ \text{cm} : 5\ \text{mm}) \cdot 18\ \text{mm}$

$\Delta s = 72\ \text{cm} = 0{,}72\ \text{m}$

Weil du weißt, dass der Flieger für diese Strecke genau $\Delta t = 0{,}1\ \text{s}$ gebraucht hat, kannst du jetzt das Tempo berechnen:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{0{,}72\,\text{m}}{0{,}1\,\text{s}} = 7{,}2\,\frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

e) *Tempo in Natur und Technik*
In der Natur und der Technik gibt es ganz unterschiedlich schnelle Bewegungen. Ein Überblick ist in Bild 3.4 abgedruckt.

3.4 Tempo in Natur und Technik

3.2 Richtung

Du hast schon gelernt, dass es zur Beschreibung einer Bewegung nicht ausreicht, den Ort und das Tempo anzugeben, genauso wichtig ist die **Richtung**, in welche die Bewegung erfolgt. Das siehst du z. B. bei Navigationssystemen (Bild 3.5).

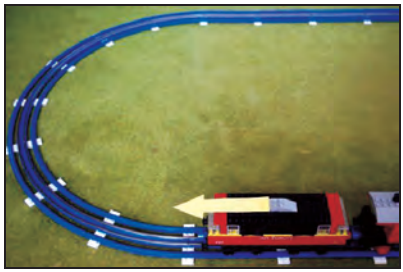
3.5 Vorschlag einer Änderung der Bewegungsrichtung

Die Bewegungsrichtung wird mit einem Pfeil angegeben.

3.6 Pfeile bei verschiedenen Fahrzeugen

Betrachte Bild 3.6 genau: Welche Fahrzeuge bewegen sich in die gleiche Richtung? Zum Beispiel haben die drei Autos mit den gelben Pfeilen die gleiche Bewegungsrichtung. Beachte aber, dass diese Autos nicht unbedingt das gleiche Ziel haben.
Umgekehrt haben die vier Autos, die auf den Kreisel zufahren, das gleiche Ziel, aber alle verschiedene Bewegungsrichtungen!

Die Bewegungsrichtung kann sich immer wieder ändern. In Bild 3.7 fährt eine Spielzeuglokomotive auf einem Rundkurs. Zur Veranschaulichung ist ein Pfeil aus Papier ausgeschnitten und aufgeklebt worden. Zunächst zeigt der Pfeil nach links, in der Kurve dreht er sich dann so lange, bis er nach rechts zeigt. In der nächsten Kurve verändert sich der Pfeil erneut so lange, bis er wieder nach links zeigt.



3.7 Pfeil auf einer Modelleisenbahn

Aufgaben

① Erkläre, was bei einer Bewegung außer den Orten noch angegeben werden muss.

② Erkläre, wie du das Tempo eines ferngesteuerten Autos mit einem Experiment bestimmen kannst.

③ Finde heraus, wie ein Fahrradtacho das Tempo misst. Überlege dir ein Experiment, um herauszufinden, ob der Tacho das richtige Tempo anzeigt.

④ Beim 400-m-Lauf starten die Athleten von ganz unterschiedlichen Positionen (Bild 3.8). Erkläre, weshalb nur so ein fairer Wettkampf möglich ist.

3.8 Leichtathletik-Mitteldistanzrennen

⑤ Beim Biathlon-Verfolgungsrennen starten die Läufer in der gleichen Reihenfolge und mit dem gleichen zeitlichen Abstand, mit dem sie am Tag vorher beim Sprint ins

Ziel gekommen sind. Der Sieger des Sprints startet also als erster. Der Zweitplatzierte des Sprints darf auch als zweiter in die Loipe, und zwar genau nach Ablauf der Zeit, die er am Tag zuvor zurücklag. Bei den Olympischen Spielen in Turin siegte der Deutsche Sven Fischer im Sprint und war dabei 2 min 11 s schneller als sein Teamkamerad Michael Greis. Am Ende des Verfolgungsrennens am nächsten Tag kam Sven Fischer nur 1 min 4s vor Michael Greis ins Ziel. Wer von den beiden hatte beim 12,5 km langen Verfolgungsrennen ein größeres (Durchschnitts-) Tempo?

Ⓒ a) Martin behauptet: „Immer wenn die Pfeile zweier bewegter Gegenstände die gleiche Richtung haben, haben sie auch das gleiche Ziel." Erkläre Martin, warum er nicht Recht hat.

b) Matthias sagt: „Haben zwei Autos das gleiche Ziel, dann zeigen ihre Pfeile auch in die gleiche Richtung". Auch Matthias hat nicht Recht. Warum?

Für Spezialisten:
Bisher haben wir die Bewegungen so beschrieben, wie du sie bezüglich der Erdoberfläche beobachten kannst. Dies ist auch für alle vorgestellten Fälle zweckmäßig.
Grundsätzlich können die gleichen Bewegungen aber ganz unterschiedlich aussehen, wenn du sie von verschiedenen Standpunkten aus beschreibst.
Stelle dir vor:
An einem windstillen Wintertag schweben Schneeflocken langsam senkrecht zur Erde hinunter. Aus einem fahrenden Auto siehst du aber etwas ganz anderes: Die Schneeflocken bewegen sich (vom fahrenden Auto aus beschrieben) nahezu horizontal und nicht mehr senkrecht zur Straße. Zur Beschreibung von Bewegungen gehört also eigentlich, in einem ersten Schritt festzulegen, von welchem Standpunkt aus die Bewegung beschrieben wird.

3.3 Geschwindigkeit

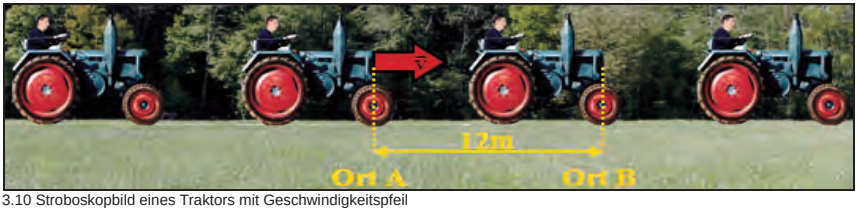
Du hast bereits gelernt, wie du die Richtung einer Bewegung darstellen kannst: Du zeichnest einfach einen Pfeil. Du hast aber auch gelernt, dass das Tempo und die Richtung angegeben werden müssen, um eine Bewegung zu beschreiben. Wie könnte man das nun darstellen?
Eine Möglichkeit wäre es, zu jedem Pfeil das Tempo dazuzuschreiben. Es gibt aber eine einfachere Methode:
Man kann den Pfeil unterschiedlich lang zeichnen. Je größer das Tempo, desto länger der Pfeil. (Ähnlich ist das auch bei der Lautstärkeregelung einer Stereoanlage: Je lauter der Ton, desto höher die Balken der Anzeige.)

In Bild 3.9 sind die Pfeile entsprechend eingezeichnet. Alle drei Fahrzeuge haben unterschiedliches Tempo aber die gleiche Bewegungsrichtung.

3.9 Geschwindigkeitspfeile verschiedener Fahrzeuge

In der Physik werden die beiden Informationen Tempo und Richtung zusammengefasst: Die **Geschwindigkeit** $\vec{v}$ eines Gegenstands setzt sich zusammen aus seinem Tempo und seiner Bewegungsrichtung. Sie wird durch einen **Geschwindigkeitspfeil** dargestellt. Seine Richtung gibt die Richtung der Bewegung, seine Länge gibt das Tempo der Bewegung an.

Geschwindigkeit $\vec{v}$ — Tempo
Geschwindigkeit $\vec{v}$ — Richtung



3.10 Stroboskopbild eines Traktors mit Geschwindigkeitspfeil

Um die Begriffe Tempo und Geschwindigkeit nicht zu verwechseln, schreibt man immer einen kleinen Pfeil über den Buchstaben, wenn die Geschwindigkeit $\vec{v}$ gemeint ist, dagegen schreibt man nie einen Pfeil über den Buchstaben, wenn das Tempo v gemeint ist. Der kleine Pfeil erinnert dich daran, dass die Geschwindigkeit aus Tempo und Bewegungsrichtung besteht. Zwei Geschwindigkeiten sind nur dann gleich, wenn sie das gleiche Tempo und die gleiche Richtung haben! (Die Geschwindigkeitspfeile sind dann gleich lang und zeigen in die gleiche Richtung.)

Beachte: Im Alltag wird oft „Geschwindigkeit“ gesagt, wenn eigentlich das Tempo gemeint ist. In der Physik besteht jedoch ein wichtiger Unterschied. Du musst immer genau überlegen, ob es um die Geschwindigkeit oder das Tempo geht!

Beispiele

a) *Tempo und Geschwindigkeitspfeil*

Mit Geschwindigkeitspfeilen kann man das Tempo ganz genau angeben. Dazu ist ein Maßstab notwendig. So kannst du das Tempo des Sportwagens aus Bild 3.9 leicht herausfinden, wenn du weißt, dass 1 mm im Bild einem Tempo von 10 km/h entspricht: Der Geschwindigkeitspfeil des Sportwagens ist 1,7 cm lang. Deswegen hat der Sportwagen das Tempo 170 km/h.

b) *Geschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild*

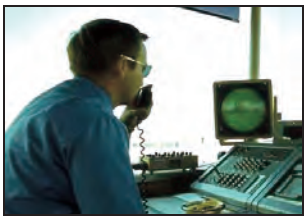
-Umkehrt kann man (mit einem vorgegebenen Maßstab) auch Geschwindigkeitspfeile in Stroboskopbilder einzeichnen. So soll z.B. der Maßstab für Bild 3.10 so sein, dass 1 mm einem Tempo von 2 m/s entspricht. Zuerst wählst du die Orte aus, an denen du die Geschwindigkeit bestimmen möchtest. Danach errechnest du das Tempo. Der Traktor benötigt zwischen Ort A und Ort B (Δs = 12 m) 2 s und hat somit ein Tempo von 6 m/s. Deswegen zeichnest du an den Punkt A einen Geschwindigkeitspfeil von 3 mm Länge, der in Richtung des Ortes B zeigt.

-Wie du merkst, ist dieses Verfahren recht mühsam. Es ist praktisch, dass es Computerprogramme gibt, die Geschwindigkeitspfeile direkt in Stroboskopbilder einzeichnen: Betrachte die Bilder 3.11 und 3.12: In das Stroboskopbild der Bewegung des Fliegers und des Fußballes sind die Geschwindigkeitspfeile eingezeichnet. Du erkennst, dass sich sowohl Tempo als auch Richtung ständig ändern.

3.11 Geschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Spielzeugfliegers

2.12 Geschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Fußballes

c) *Fluglotsen bei der Arbeit*
Ein Fluglotse (Bild 3.13) beobachtet auf seinem Kontrollschirm die Bewegungen zweier Flugzeuge, deren Flugbahnen sich offensichtlich schneiden werden.


3.13 Fluglotse bei der Arbeit

Von 13:17 Uhr bis 13:18 Uhr haben sich die beiden Flugzeuge wie in Bild 3.14 bewegt. Muss der Lotse die Piloten warnen?
Nein, die Flugzeuge stoßen bei diesen Bewegungen nicht zusammen, obwohl sich die Flugbahnen kreuzen. Denn B fliegt deutlich schneller als A. (Bild 3.15)

3.14 Geschwindigkeitspfeile der beiden Flugzeuge

3.15 Geschwindigkeitspfeile der beiden Flugzeuge

Aufgaben

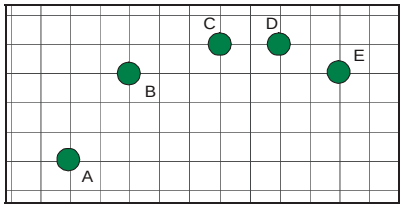
① Erläutere den Unterschied zwischen Geschwindigkeit und Tempo.

② Zeichne ein Bild, in das du zwei Autos mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ und außerdem zwei LKWs mit gleicher Geschwindigkeit $\vec{v}_3$ und $\vec{v}_4$ einzeichnest!

③ Zeichne jeweils drei Fahrräder mit
a) gleicher Bewegungsrichtung aber unterschiedlichen Geschwindigkeiten $\vec{v}$,
b) gleichem Tempo v, aber unterschiedlichen Geschwindigkeiten $\vec{v}$!

④ Zeichne die Geschwindigkeitspfeile für Flugzeuge, die
a) mit 610 km/h nach Nordwesten,
b) mit 470 km/h nach Süden,
c) mit 380 km/h nach Osten
fliegen. (1 cm entspricht dabei 100 km/h)

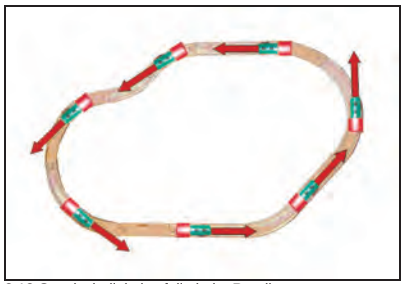
⑤ Übertrage das Stroboskopbild (Bild 3.16) ins Heft. Zeichne Geschwindigkeitspfeile an den Punkten A, B, C und D. Die Zeit zwischen zwei Bildaufnahmen beträgt eine Sekunde.



3.16 Stroboskopbild

⑥ Betrachte die Stroboskopbilder in den Bildern 3.17 und 3.18 Beschreibe jeweils, wie sich die Geschwindigkeit im Verlauf der Bewegung verändert!

3.17 Geschwindigkeitspfeile beim Hammerwurf


3.18 Geschwindigkeitspfeile beim Rundkurs

4. Die Zusatzgeschwindigkeit

4.1 Die Zusatzgeschwindigkeit als Folge einer Einwirkung

4.1 Anna beim Torschuss

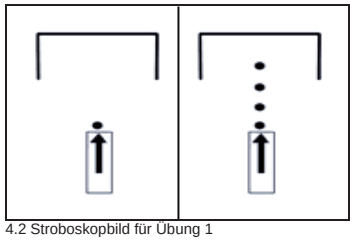
Im Fußballtraining werden verschiedene Situationen geübt. Bei der ersten Übung zum Elfmeterschießen sollen die Spielerinnen und Spieler den Ball aus der Ruhe so ankicken, dass das Tor getroffen wird. Bei der nächsten Übung wird der Ball den Spielerinnen und Spielern von der Seite (parallel zum Tor) zugepasst (Bild 4.1) und soll wieder genauso angekickt werden, wie eben beim Elfmeterschießen. Allerdings darf der Ball nicht gestoppt werden.

V1: Probiert die beiden Übungen paarweise auf dem Sportplatz aus.

V2: Simuliert die beiden Übungen mit einem kleinen Versuch: Nehmt eine Kugel (z.B. eine Murmel), baut aus Stiften ein Tor und versetzt der Kugel einen Stoß, indem ihr sie mit einem Lineal anschnippt. Führt ebenfalls beide Übungen durch.

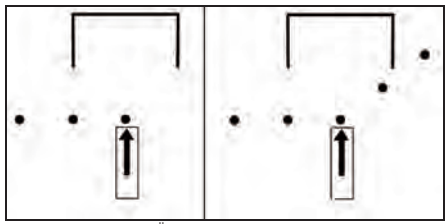
Was könnt ihr jeweils feststellen? Landet der Ball bzw. die Kugel bei beiden Übungen im Tor? Wir simulieren ebenfalls beide Fußballübungen im Experiment mit einer Kugel und stoßen sie beide Male mit einem Brett in Pfeilrichtung (Bilder 4.2 und 4.3).

Beobachtung: Bei der ersten Übung landet die Kugel immer im Tor.



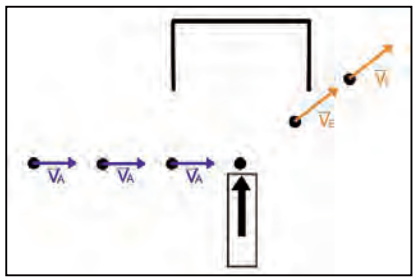
4.2 Stroboskopbild für Übung 1

Bei der zweiten Übung verfehlt die senkrecht zur Bewegungsrichtung gestoßene Kugel das Tor (Bild 4.3).



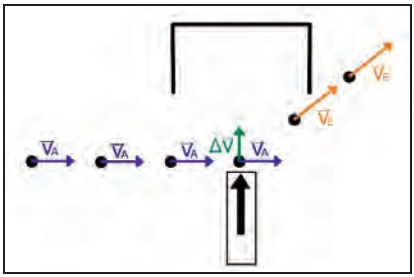
4.3 Stroboskopbild für Übung 2

Woran liegt das? Der Grund ist, dass die Kugel nach dem Stoß in einem gewissen Sinn zwei Bewegungen gleichzeitig ausführt: die Bewegung in der Anfangsrichtung wird beibehalten, zusätzlich wird eine Bewegung in der Stoßrichtung ausgeführt. Betrachten wir dies genauer: Die Geschwindigkeit vor dem Stoß nennen wir die Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ (blauer Pfeil), die Geschwindigkeit nach dem Stoß nennen wir die Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ (oranger Pfeil) (Bild 4.4).



4.4 Anfangs- und Endgeschwindigkeit der Kugel

Was ist beim Stoßen passiert? Durch den Stoß erhält die Kugel eine **Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$. Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ zeigt in die gleiche Richtung wie der Stoß** (Bild 4.5)**.**

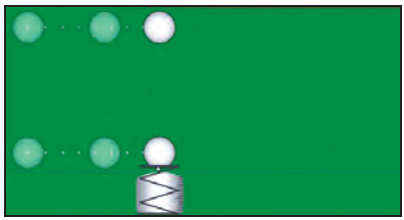


4.5 Die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ zeigt in Stoßrichtung.

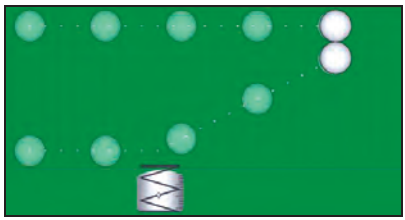
Du kannst dir das so vorstellen: Die Kugel bewegt sich nach dem Stoß mit $\vec{v}_A$ weiter nach rechts und gleichzeitig zusätzlich mit der Geschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ auf das Tor zu. Die beobachtete Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ ist aus $\vec{v}_A$ und $\Delta\vec{v}$ zusammengesetzt und zeigt schräg rechts am Tor vorbei.

V3: Wir lassen zwei identische Kugeln auf einer ebenen Unterlage mit gleicher Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ nach rechts rollen. Nur eine der beiden Kugeln wird senkrecht zur Bewegungsrichtung gestoßen. In Bild 4.6 ist dies anhand einer Computersimulation gezeigt.

Beobachtung: Die gestoßene Kugel trifft immer auf die andere Kugel (Bild 4.7). Sie erhält eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$, und bewegt sich mit genau dieser Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ nach oben und gleichzeitig weiterhin mit $\vec{v}_A$ nach rechts. Da sich die andere Kugel ebenfalls mit $\vec{v}_A$ nach rechts bewegt, treffen sie sich in jedem Fall.

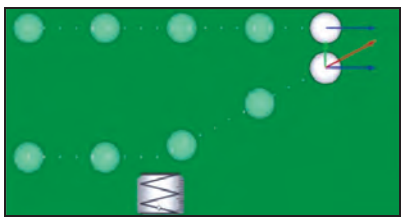


4.6 Senkrechter Stoß zur Bewegungsrichtung



4.7 Die Kugeln treffen sich nach einem senkrechten Stoß.

In eine Stroboskopaufnahme wie Bild 4.7 können die Geschwindigkeitspfeile für $\vec{v}_A$, $\Delta\vec{v}$ und $\vec{v}_E$ (wie in Kap. 3.3 beschrieben) eingezeichnet werden (Bild 4.8).

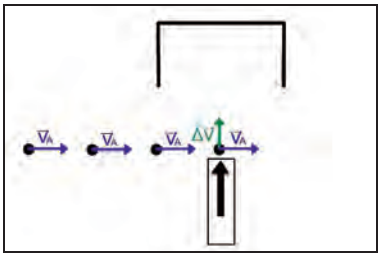


4.8 Zusammensetzung der Geschwindigkeitspfeile von $\vec{v}_A$, $\Delta\vec{v}$ und $\vec{v}_E$

Wie du die drei Geschwindigkeitspfeile richtig verknüpfst wird im folgenden Abschnitt erklärt.

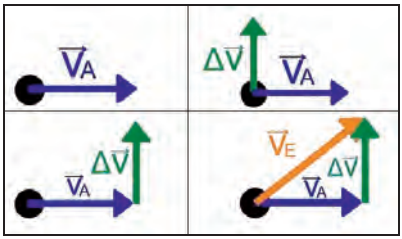
4.2 Konstruktion der Endgeschwindigkeit

Ausgangssituation: Manchmal kennst du die Anfangs- und die Zusatzgeschwindigkeit (wie in Bild 4.9) und möchtest die Endgeschwindigkeit konstruieren.



4.9 Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeitspfeil sind gegeben. Der Pfeil der Endgeschwindigkeit ist gesucht.

Die Zusammensetzung von $\vec{v}_A$ und $\Delta\vec{v}$ kannst du mit den Geschwindigkeitspfeilen nachvollziehen (Bild 4.10).



4.10 Konstruktion des Pfeils von $\vec{v}_E$

Konstruktion:

a) Die Kugel hat eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$.

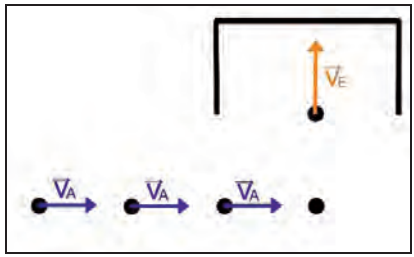
b) Durch den Stoß erhält die Kugel zur Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ eine bestimmte Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$, die in Richtung des Stoßes zeigt.

c) Zur Zusammensetzung von $\vec{v}_A$ und $\Delta\vec{v}$ hängst du $\Delta\vec{v}$ an die Pfeilspitze von $\vec{v}_A$.

d) Verbindest du den Pfeilfuß von $\vec{v}_A$ mit der Pfeilspitze von $\Delta\vec{v}$, so erhältst du den Pfeil der Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$.

4.3 Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit

Ausgangssituation: Manchmal kennst du die Anfangs- und die Endgeschwindigkeit, (wie in Bild 4.11) und möchtest die Zusatzgeschwindigkeit konstruieren.



4.11 Anfangs- und Endgeschwindigkeitspfeil sind gegeben. Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit ist gesucht.

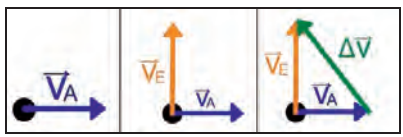
V4: Anna trifft nach einer Flanke ihrer Mitspielerin häufig ins Tor. In welche Richtung kickt sie dann den Ball (Bild 4.12)?

Stelle die Situation wieder mit einer Kugel nach. Überlege dir dabei in welche Richtung du die Kugel schnippen musst, damit sie im Tor landet.

4.12 Anna beim Torschuss nach Flanke

Es ist nach der Richtung des Stoßes gefragt. Du weißt jetzt schon, dass dieser in die gleiche Richtung wie der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ zeigt. Du musst also den Pfeil von $\Delta\vec{v}$ herausfinden, wobei die Geschwindigkeitspfeile $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ bekannt sind (Bild 4.11).

Die Bestimmung von $\Delta\vec{v}$ aus $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ kannst du wieder mit den Geschwindigkeitspfeilen nachvollziehen (Bild 4.13):



4.13 Konstruktion des Pfeils von $\Delta\vec{v}$

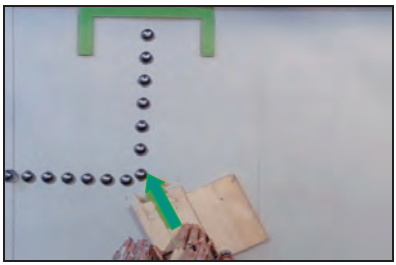
Konstruktion:

a) Die Kugel hat eine bestimmte Geschwindigkeit $\vec{v}_A$.

b) Nach dem Stoß soll der Geschwindigkeitspfeil $\vec{v}_E$ direkt in Torrichtung zeigen. Gesucht ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$.

c) Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ wird wieder an die Pfeilspitze von $\vec{v}_A$ gehängt und muss auf die Pfeilspitze von $\vec{v}_E$ zeigen.

Auflösung zu **V4**:
Der grüne Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ zeigt in die Richtung, in die Anna den Ball kicken muss, damit dieser direkt im Tor landet (Bild 4.14).



4.14 Der grüne Pfeil zeigt in die gesuchte Stoßrichtung.

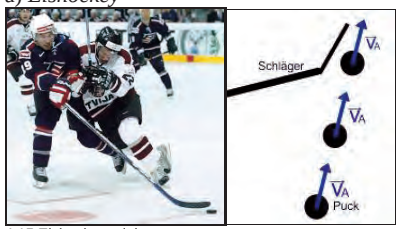
Durch eine **Einwirkung** erhält ein Körper eine **Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$**. Die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind gleich.
Die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ wird durch einen Pfeil dargestellt. Der Pfeil von $\Delta\vec{v}$ zeigt von der Pfeilspitze von $\vec{v}_A$ zur Pfeilspitze von $\vec{v}_E$.

Konstruktionstipp: Wenn du einen der Geschwindigkeitspfeile konstruierst, dann kannst du die vorgegebenen Geschwindigkeitspfeile beliebig verschieben. Beachte, dass du dabei die Richtung und die Länge der Pfeile nicht veränderst.

So kannst du es dir vielleicht leichter merken: „Der Pfeil von $\Delta\vec{v}$ zieht die Pfeilspitze von $\vec{v}_A$ in die Pfeilspitze von $\vec{v}_E$ “.

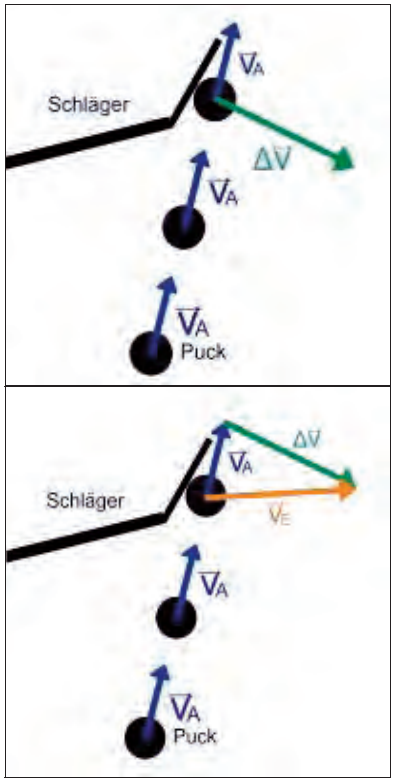
Beispiele

a) *Eishockey*



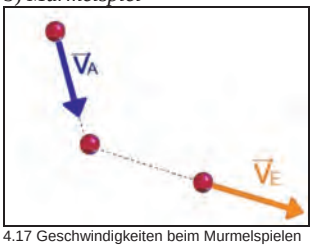
4.15 Eishockeyspieler

Ein Eishockeyspieler versetzt mit dem Schläger dem Puck einen Stoß und der Puck erhält damit eine Zusatzgeschwindigkeit (Bild 4.15). Bei bekannter Anfangsgeschwindigkeit und Zusatzgeschwindigkeit, lässt sich der Pfeil der Endgeschwindigkeit konstruieren (Bild 4.16):



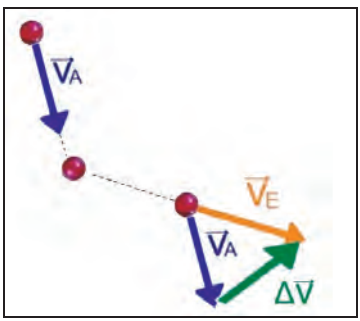
4.16 Konstruktion von $\vec{v}_E$

b) *Murmelspiel*

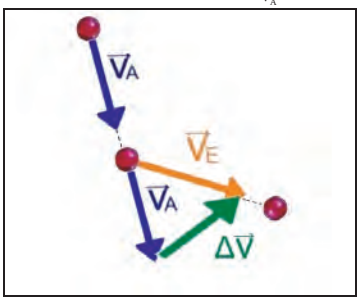


4.17 Geschwindigkeiten beim Murmelspielen

Welche Zusatzgeschwindigkeit hat die rote Murmel in Bild 4.17 an der markierten Stelle erhalten? Um die Zusatzgeschwindigkeit für die Murmel zu ermitteln, werden die gegebenen Pfeile $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ verschoben und der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ durch die Verbindung der Pfeilspitzen von $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ eingezeichnet. Dabei kommt es nicht darauf an, an welcher Stelle im Bild du die Konstruktion anfertigst. Die Richtung und die Länge der Zusatzgeschwindigkeit, die du erhältst, sind jeweils gleich. (Bild 4.18, Bild 4.19).

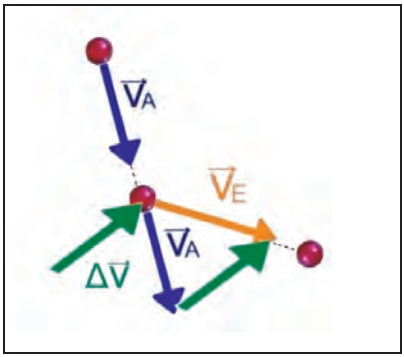


4.18 Konstruktion von $\Delta\vec{v}$; der Vektor $\vec{v}_A$ wird verschoben



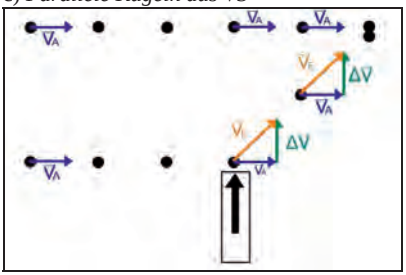
4.19 Konstruktion von $\Delta\vec{v}$, die Vektoren $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ werden verschoben

Da die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit und die Richtung der Einwirkung gleich sind, weißt du nun auch in welche Richtung auf die Murmel eingewirkt wurde. (Bild 4.20)



4.20 Die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ ist die Richtung, in die die Murmel gestoßen wurde.

c) *Parallele Kugeln aus V3*



4.21 Die Zusatzgeschwindigkeit als „zusätzliche“ Geschwindigkeit

Um die Endgeschwindigkeit der gestoßenen Kugel aus V3 zu ermitteln hängst du wieder den Pfeil von $\Delta\vec{v}$ an die Pfeilspitze von $\vec{v}_A$ und verbindest den Pfeilfuß von $\vec{v}_A$ mit der Pfeilspitze von $\Delta\vec{v}$ (Bild 4.21).

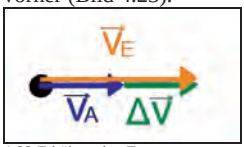
4.4 Sonderfall: Eindimensionale Bewegungen

Eine Bewegung heißt eindimensional, wenn die Geschwindigkeitspfeile von $\vec{v}_A$, $\vec{v}_E$ und $\Delta\vec{v}$ entweder in die gleiche Richtung oder in die entgegengesetzte Richtung zeigen:

4.22 Situationen beim Fußballspiel

1) *Einwirkung in Richtung der Anfangsgeschwindigkeit*

Ein Stürmer kickt einen bereits rollenden Fußball in Richtung der ursprünglichen Bewegung. Die Richtung des Fußballs ändert sich dabei nicht. Allerdings ist das Tempo des Balls nach dem Stoß größer als vorher (Bild 4.23).



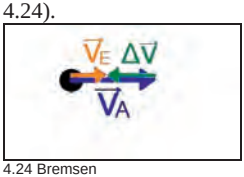
4.23 Erhöhen des Tempos

Ein weiteres Beispiel für diese Situation ist, wenn du mit deinem Fahrrad fährst und schon etwas schlapp bist. Dein Freund möchte dir helfen und schiebt dich einmal kräftig an. Du fährst kurz nach dem Schub in die gleiche Richtung weiter, allerdings mit größerem Tempo.

2) *Einwirkung entgegengesetzt zur Richtung der Anfangsgeschwindigkeit*

a) *Bremsen*

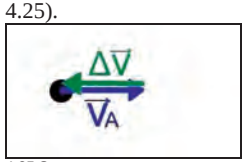
Ein Torwart versucht den Ball zu fangen, dieser gleitet dabei durch seine Hände. Der Ball bewegt sich nach der Berührung durch den Torwart in die gleiche Richtung wie zuvor, hat aber ein geringeres Tempo (Bild 4.24).



4.24 Bremsen

b) *Stoppen*

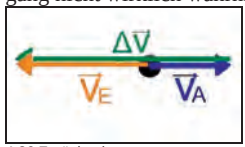
Ein Fußball rollt auf einen Spieler zu. Der stoppt ihn mit seinem Fuß. Das Tempo v_E ist dann null: Die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ hatte das gleiche Tempo wie $\vec{v}_A$, zeigte aber die entgegengesetzte Richtung. Dann wird die Bewegung gestoppt (Bild 4.25).



4.25 Stoppen

c) *Zurückgeben*

Ein Fußballer kickt den Ball in die Richtung zurück, aus der der Ball kam. Dann war die Zusatzgeschwindigkeit so groß, dass die Endgeschwindigkeit in die entgegengesetzte Richtung der Anfangsgeschwindigkeit gerichtet ist (Bild 4.26). Das kannst du dir so vorstellen: Durch die Einwirkung erhält der Ball in einem ersten Schritt gerade eine solche Zusatzgeschwindigkeit in Gegenrichtung zur ursprünglichen Bewegung, dass der Ball zur Ruhe kommt. In einem zweiten Schritt erhält er durch eine Einwirkung eine weitere Zusatzgeschwindigkeit. Das geht so schnell ineinander über, dass du den Übergang nicht wirklich wahrnimmst.



4.26 Zurückgeben

Ein weiteres Beispiel für diese Situation ist ein Tennisball, der mit einer Anfangsgeschwindigkeit auf den Spieler zufliegt. Dieser versetzt dem Ball mit dem Schläger einen so starken Stoß, dass die Endgeschwindigkeit in die entgegensetzte Richtung zeigt und der Ball zum Mitspieler zurückfliegt.

Aufgaben

① Überlege dir $\vec{v}_A$, $\vec{v}_E$ und $\Delta\vec{v}$ beim Elfmeterschießen und beschreibe jeweils das Tempo.

② Beschreibe eine Bewegung für die gilt:
a) $v_A = 0$, Δv und $v_E \neq 0$
b) $v_E = 0$, Δv und $v_A \neq 0$
c) $\Delta v = 0$, $v_A \neq 0$ und $v_E \neq 0$

③ Kim schwimmt mit konstantem Tempo an einer Düse im Schwimmbad vorbei. Durch die Düse erhält sie eine Zusatzgeschwindigkeit. Zeichne drei Bilder, aus denen die Bewegung deutlich wird und stelle die drei Geschwindigkeitspfeile $\vec{v}_A$, $\Delta\vec{v}$, und $\vec{v}_E$ dar.

(Tipp: Betrachte Bild 4.15)

④ Diskutiere mit deinen Mitschülern folgende Behauptungen:
Hannah sagt: „Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit und der Pfeil der Endgeschwindigkeit zeigen bei allen Bewegungen immer in die gleiche Richtung."
Leonie sagt: „Der Pfeil der Endgeschwindigkeit kann nie länger sein als der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit."
Aische sagt: „ Beim Tennis muss der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger sein als der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit, damit der Ball zum Gegner zurückfliegt."

⑤ Dein Freund spielt dir einen ziemlich schwachen Ball zu. Du nimmst die Gelegenheit wahr und schmetterst den Ball ins andere Eck der Tischtennisplatte zurück. Zeichne für diese Situation eine mögliche Anordnung der Pfeile von $\Delta\vec{v}$, $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ kurz nach dem Stoß.

⑥ Kevin spielt gern Flipper. Er trifft die Kugel ziemlich gut, katapultiert sie damit zurück in den Flipperkasten und bekommt eine Menge Punkte. Zeichne eine Situation ins Heft, wenn Kevin die Kugel trifft und diese wieder zurück in den Kasten fliegt. Zeichne eine mögliche Anordnung der Pfeile von $\vec{v}_A$, $\Delta\vec{v}$, und $\vec{v}_E$ ein.

⑦ Tims Hobby ist Surfen. Auf dem Gardasee fährt er mit seinem Surfbrett bei leichter Brise schön gemächlich dahin. Plötzlich kommt eine starke Windböe. Tims Tempo wird größer und es treibt ihn ein Stück von seinem Kurs ab. Skizziere das Surfbrett in dein Heft und zeichne eine mögliche Anordnung der Pfeile von $\vec{v}_A$, $\Delta\vec{v}$, und $\vec{v}_E$ ein.

5. Die Newtonsche Bewegungsgleichung

5.1 Franziska wirkt mit ihrem Schläger auf den Tischtennisball ein.

Franziska übt Tischtennis (Bild 5.1), aber oft fliegt der Ball ganz anders als geplant. Franziska überlegt: Wenn sie mit dem Tischtennisschläger den Ball trifft, ändert sie durch diese Einwirkung seine Bewegung, denn die Einwirkung fügt zur Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ des Balls eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ hinzu. So ergibt sich die Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ des Balls. Franziska weiß auch, dass die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit gleich sind.
Damit es ihr gelingt die Platte zu treffen, muss ein bestimmter Zusammenhang zwischen Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit bestehen.

5.1 Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit

V1: Lass dir einen Tischtennis-Ball zuwerfen. Schlage unterschiedlich stark gegen den Ball. Versuche, jeweils eine Aussage über die Zusatzgeschwindigkeit zu machen.

V2: Wiederhole den „Kugelstoßversuch“ (V2) von Seite 10. Stoße zwei Mal gegen die rollende Kugel. Versuche, beim zweiten Mal ungefähr doppelt so stark zu stoßen. Kannst du wieder eine Aussage über die Zusatzgeschwindigkeit machen?

Beobachtung: Bei einer stärkeren Einwirkung ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit größer.

Das gilt ganz allgemein:
Je größer die Einwirkungsstärke auf einen Gegenstand ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die der Gegenstand erhält.

Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsstärke ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger.

Nun müssen wir den Begriff der Einwirkung noch präziser festlegen: Eine Einwirkung ist gekennzeichnet durch ihre Stärke und ihre Richtung. So wie man Tempo und Richtung mit dem Begriff Geschwindigkeit zusammenfasst, kann man auch die Stärke und die Richtung einer Einwirkung mit einem Begriff bezeichnen:

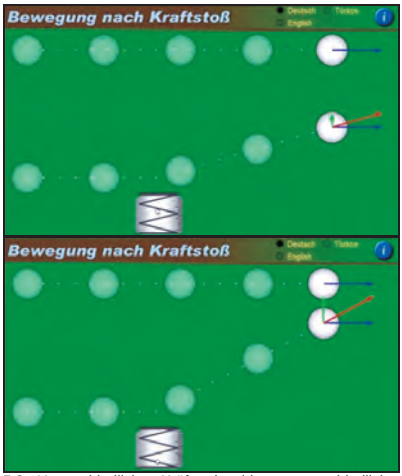
In der Physik werden die „Einwirkungsstärke“ und die „Einwirkungsrichtung“ zusammengefasst; dafür verwendet man den Begriff **Kraft** (Symbol $\vec{F}$, vom englischen Wort force)

Kraft $\vec{F}$ — Einwirkungsstärke
Kraft $\vec{F}$ — Einwirkungsrichtung

Damit können wir formulieren:

Je größer die Einwirkungsstärke einer **Kraft** ist, die auf einen Körper ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$, die der Körper erhält.
Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsstärke einer Kraft ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger.

In der Computersimulation „Bewegung nach Kraftstoß“ wird dies veranschaulicht: Lassen wir eine gespannte Feder mit doppelter Kraft gegen eine Kugel schlagen, wird das Tempo von $\Delta\vec{v}$ doppelt so groß (Bild 5.2).

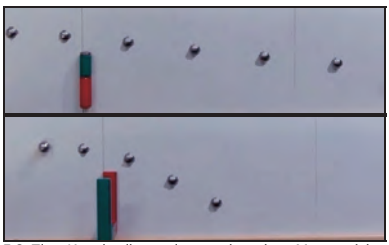


5.2 Unterschiedliche Kräfte bewirken unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten (grüner Pfeil).

Beispiele

a) *Magnet*

Eine Kugel rollt an einem schwachen Magneten vorbei (Bild 5.3). Dabei ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit kleiner als wenn sie an einem starken Magneten vorbeirollt.


5.3 Eine Kugel rollt an einem schwachen Magnet (oben) und an einem starken Magnet (unten) vorbei.

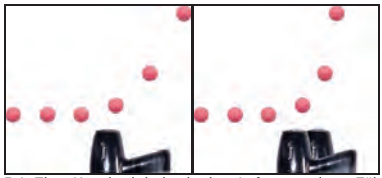
b) *Formel 1*

Je stärker ein Formel 1-Fahrer auf das Gaspedal tritt, desto größer ist die Kraft auf das Rennauto und desto größer ist auch das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die das Auto in jeder Sekunde erhält. Dadurch wird die Endgeschwindigkeit des Rennautos größer.

Es spielt aber auch eine Rolle, wie lange der Fahrer das Gaspedal tritt.

5.2 Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit

V3: Führe wieder einen Versuch mit Kugeln durch. Dieses Mal sollst du aber nicht gegen die Kugel stoßen, sondern sie mit einem Gebläse ablenken (Bild 5.4). Verwende dabei zunächst einen Föhn, und dann zwei gleiche Föhns nebeneinander um die Einwirkungsdauer des Gebläses auf die Kugel zu erhöhen.


5.4 Eine Kugel wird durch den Luftstrom eines Föhns (links) bzw. zwei nebeneinander liegender Föhns (rechts) abgelenkt.

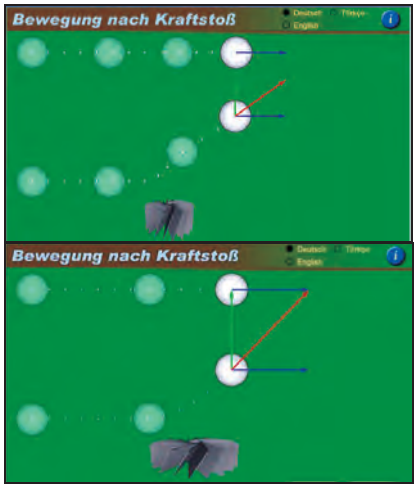
Beobachtung: Das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit wird umso größer, je länger der Luftstrom der Föhns auf die Kugel einwirkt.

Allgemein gilt:

Je länger die **Einwirkungsdauer** einer Kraft ist, die auf einen Gegenstand ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$, die der Körper erhält.

Auch dieser Zusammenhang kann durch die Simulation „Bewegung nach Kraftstoß“ veranschaulicht werden. Anstelle der Feder bewirkt hier ein Ventilator eine Kraft auf die Kugel. Der Ventilator kann durch seine unterschiedliche Breite unterschiedlich lange auf die Kugel einwirken. Damit wird das Tempo der Zusatzgeschwindigkeiten unterschiedlich groß (Bild 5.5).

Eine kleine Kraft, die über einen langen Zeitraum aufgeübt wird, kann die gleiche Zusatzgeschwindigkeit zur Folge haben wie eine große Kraft, die nur einen kurzen Moment lang wirkt.



5.5 Unterschiedliche Einwirkungsdauern bewirken unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten (grüner Pfeil).

Beispiele

a) *Seitenwind*

Beim Skispringen beeinflusst der Seitenwind den Sprung der Sportler. Wenn nur ein kurzer Windstoss kommt, ist die Zusatzgeschwindigkeit in Windrichtung klein. Durch einen dauerhaften Seitenwind mit gleicher Stärke wie der kurze Windstoß erhält der Skispringer eine große Zusatzgeschwindigkeit in Windrichtung.

b) *Formel 1*

Wie du gerade erkannt hast, spielt die Dauer der Einwirkung eine wichtige Rolle: Wenn der Formel 1-Fahrer 5 s lang mit Vollgas anfährt, und sein Teamkollege mit dem gleichen Rennwagen 10 s mit Vollgas anfährt, dann ist das Tempo der Endgeschwindigkeit, welche der Wagen des Teamkollegen erreicht, deutlich größer. Daher muss auch das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit dieses Wagens deutlich größer sein.

5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit

V4: Tritt etwa gleichstark (aber vorsichtig!) gegen einen Fußball und dann gegen einen Medizinball.

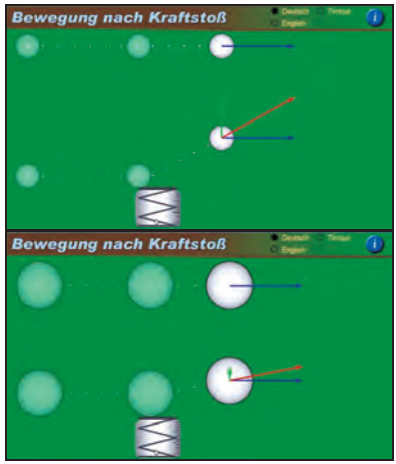
V5: Wiederhole den „Kugelstoßversuch“ (V2) von Seite 10 mit verschieden schweren Kugeln. Achte darauf, immer etwa gleich zu stoßen.

Beobachtung: Das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit wird umso größer, je leichter die Kugel ist. Bei einem „massigeren“, schwereren Gegenstand ist bei gleichstarker Einwirkung die Zusatzgeschwindigkeit kleiner. Diese Eigenschaft des Körpers nennt man **Masse** (Symbol m). Man gibt sie in der Einheit 1 kg an.

Allgemein gilt:

Je größer die **Masse** eines Gegenstands ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$, die der Körper erhält.

Das kannst du auch wieder in der Simulation beobachten (Bild 5.6).



5.6 Unterschiedliche Massen bewirken unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten (grüner Pfeil).

Beispiel
Leichtathletik
Beim Schlagball kannst du viel größere Weiten erzielen als beim Kugelstoßen. Das liegt daran, dass das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit beim leichten Schlagball viel größer ist als bei der schweren Kugel.

5.4 Die Newtonsche Bewegungsgleichung

Du hast jetzt alle Einflussfaktoren kennengelernt, welche die Zusatzgeschwindigkeit bestimmen. Im Einzelnen weißt du, dass die Kraft (Richtung und Stärke der Einwirkung), die Zeitdauer und die Masse eine Rolle spielen. Weitere Einflussfaktoren gibt es nicht. Alle Einflussfaktoren werden in der **Newtonschen Bewegungsgleichung** (abgekürzt NBG) zusammengefasst:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$$

Sir Isaac Newton hat als erster diese Grundgleichung der Mechanik formuliert. Deswegen wurde sie nach ihm benannt.

Die Newtonsche Bewegungsgleichung $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ sagt aus:

1. Wenn auf einen Körper eine Kraft $\vec{F}$ ausgeübt wird, erhält dieser eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (d.h. die Geschwindigkeit des Körpers ändert sich).
2. Die Richtung der Kraft und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind gleich.
3. Je größer die Einwirkungsstärke der Kraft $\vec{F}$ ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (bei jeweils gleicher Einwirkungsdauer und Masse).
4. Je länger die Einwirkungsdauer Δt ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (bei jeweils gleicher Kraft und Masse).
5. Je größer die Masse m des Körpers ist, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (bei jeweils gleicher Kraft und Einwirkungsdauer).

Die Maßeinheit für die Kraft heißt Newton (N). Diese Einheit kann mit Hilfe der Einheiten der Einwirkungsdauer Δt (Sekunde s), der Masse m (Kilogramm kg) und der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (Meter pro Sekunde m/s) ausgedrückt werden:

$1N \cdot 1s = 1\ kg \cdot 1\ m/s.$

Also gilt:

$$1N = 1\frac{kg\,m}{s^2}$$

Aufgaben
① Gib Beispiele aus dem Alltag für die Aussagen der Newtonschen Bewegungsgleichung an.

② Diskutiere den Einfluss der Einwirkungsdauer auf die Zusatzgeschwindigkeit.

③ Diskutiere den Einfluss der Masse auf die Zusatzgeschwindigkeit.

④ Erkläre, was eine Kraft ist. Gib Beispiele aus dem Alltag an.

6. Anwendungen der Newtonschen Bewegungsgleichung

6.1 Alltagsanwendungen

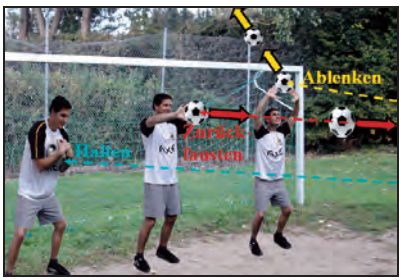
Im letzten Kapitel hast du die Newtonsche Bewegungsgleichung (NBG) kennen gelernt. Sie lautet: $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$

Du hast auch schon gelernt, dass du mit dieser Gleichung viele Vorgänge in deinem Alltag erklären kannst.

a) Fausten oder Stoppen?

Beim Elfmeterschießen erreicht ein Fußball ein Tempo von 120 km/h. Soll der Torhüter den Ball halten, zurückfausten oder ablenken, um sein Verletzungsrisiko zu minimieren? (Bild 6.1)

Diese Frage kannst du mit der NBG beantworten. Wir nehmen dabei an, dass die Einwirkungsdauer immer gleich ist. Die Masse des Fußballs verändert sich auch nicht. Um herauszufinden welche Kraft der Torhüter auf den Ball ausüben muss, überlegen wir uns welche Zusatzgeschwindigkeit der Ball in den drei Situationen erhält:



6.1 Was soll der Torwart tun?

Die Anfangsgeschwindigkeit ist in allen drei Situationen gleich. Überlege dir mit den Pfeilbildern:

Beim Halten ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit dem Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit entgegengesetzt und genauso lang.

Beim Zurückfausten ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit wieder dem Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit entgegengesetzt, aber länger.

Beim Ablenken hingegen hat der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit eine andere Richtung und ist wesentlich kürzer. Dementsprechend ist in diesem Fall auch die Kraft, die der Torhüter auf den Ball ausübt kleiner. Das Verletzungsrisiko ist im dritten Fall am geringsten.

b) Auffahrunfall eines Autos

Vergleichen wir die Auswirkungen zweier Unfälle: Ein Auto fährt mit 40 km/h gegen eine Betonwand, ein Auto gleichen Typs fährt mit gleicher Geschwindigkeit (gleiches Tempo und gleiche Richtung) in einen Drahtzaun. Beide Autos kommen dadurch zum Stillstand. Gefühlsmäßig erwarten wir, dass die Kräfte auf die Autos und ihre Fahrer unterschiedlich sein werden, obwohl Anfangs- und Endgeschwindigkeit in beiden Fällen gleich sind.

Unsere Erwartung trifft tatsächlich zu, denn es gibt einen wichtigen Unterschied: die Einwirkungsdauer Δt der Wand bzw. des Zauns auf das Auto. Das Abbremsen durch den Drahtzaun dauert mehr als 10-mal so lange wie das Abbremsen durch die Betonmauer. Dann ist die durchschnittliche Kraft die der Zaun ausübt 10-mal kleiner als die durchschnittliche Kraft die die Mauer ausübt.

Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus der Newtonschen Bewegungsgleichung. Der auf der rechten Seite stehende Wert des Produktes $m \cdot \Delta v$ ist ja für beide Autos gleich groß und gleich dem Wert von $F \cdot \Delta t$. Für den Fall, dass Δt 10-mal größer ist, muss also die Kraft F 10-mal kleiner sein, damit das Produkt den gleichen Wert behält.

c) Knautschzone

Nun kannst du auch verstehen, wie man Autos konstruieren muss, damit das Verletzungsrisiko bei Unfällen für die Insassen möglichst klein ist: Es muss dafür gesorgt werden, dass die Zeit vom Auffahren bis zum Stillstand möglichst lange dauert. Das erreicht man dadurch, dass „Knautschzonen“ eingebaut werden, die sich verformen. Dieser Vorgang des Verformens verlängert die Einwirkungsdauer und verringert dadurch die durchschnittliche Kraft.

Die Fahrgastzelle konstruiert man sehr steif, sie soll sich beim Unfall möglichst nicht verformen, damit die Insassen nicht eingeklemmt werden (Bild 6.2).

6.2 Crashtest mit einem Auto

d) Fahrradhelme
Genau diese Funktion haben auch Fahrradhelme. Sie sorgen dafür, dass die Einwirkungszeit bei einem Stoß gegen deinen Kopf verlängert wird. Dann wirkt eine kleinere Kraft.
Gleichzeitig sorgt der Helm dafür, dass die Kraft nicht punktuell auf die Schädeldecke wirkt, sondern sich auf eine größere Fläche verteilt. Wie groß diese Unterschiede sind, kannst du in einem Versuch überprüfen:

Ein rohes Ei wird aus ca. 1 m Höhe fallengelassen. Es zerbricht. Danach wird ein anderes rohes Ei mit einem „Helm“ ausgestattet (Bild 6.3) und ebenfalls aus ca. 1m Höhe fallengelassen. Das Ei bleibt unbeschädigt.

6.3 Crashtest mit einem Ei

e) Beladenes Auto
Ein leerer Kombi erreicht mit Vollgas in 12 s ein Tempo von 100 km/h. Vollbeladen erreicht er in gleicher Zeit – ebenfalls bei Vollgas - nur 75 km/h. Erkläre mit der Newtonschen Bewegungsgleichung, warum dies so ist.

f) Elastizität von Kletterseilen
Kletterseile sind bis zu einem gewissen Grad elastisch (Bild 6.4). Dies ist deshalb so wichtig, damit die Einwirkdauer groß genug und die Kraft möglichst klein wird, so dass man den Sturz ins Seil ohne schwere Verletzungen überlebt.

6.4 Sicherung mit dem Kletterseil

g) Abgang vom Hochreck
Für den Abgang vom Hochreck erhält der Sportler nach altem Reglement eine besonders hohe Punktzahl, wenn er mit durchgedrückten Knien auf den Boden aufkommt.
Jemand behauptet, dass dies für die Gelenke sehr schädlich sei, und dass es schonender sei beim Auftreffen auf den Boden „in die Knie zu gehen“.
Das ist deshalb richtig, weil dadurch die Einwirkungsdauer vergrößert, und deshalb nach der NBG die Kraft verkleinert wird.

h) Kurvenfahrt
Ein Auto fährt um die Kurve. Dabei ändern sich die Richtung, und damit die Geschwindigkeit des Autos. Das Auto erhält also eine Zusatzgeschwindigkeit. Nach der NBG muss eine Kraft auf das Auto ausgeübt werden. Diese Kraft übt die Straße auf das Auto aus.
Bei Glatteis kann die Straße keine Kraft auf das Auto ausüben. Man kann nicht um die Kurve fahren.

j) Huskies
Beim Schlittenhunderennen muss der Führer des Schlittens sorgfältig überlegen, wie viele Hunde er vor den Schlitten spannt. Das kannst du wieder mit der NBG verstehen: Je größer die Masse des Schlittens ist, desto größer ist die benötigte Zugkraft, um den Schlitten aus der Ruhe auf die Reisegeschwindigkeit zu bringen.

6.5 Huskies vor dem Schlittenrennen

Aufgaben
① Auch beim Volleyball-Aufschlag gilt die NBG. Beantworte: Wer übt eine Kraft aus? Auf wen wird diese Kraft ausgeübt? Kannst du Δt, $\Delta\vec{v}$, $\vec{F}$ und m zuordnen?

② Erkläre, warum ein Airbag bei einem Unfall die Überlebenschancen von Fahrer und Beifahrer erhöht!

③ Erkläre, weshalb in der Formel 1 bei einem Rennen Reifenstapel als Bande verwendet werden.

④ Ein Regentropfen trifft gegen ein fahrendes Auto. Natürlich erhält das Auto dadurch eine Zusatzgeschwindigkeit. Warum merkst du davon im Auto nichts?

⑤ Mountainbiker fahren oft „Fullies“. Schau nach was das bedeutet, und erkläre, warum das bei einem Downhill hilfreich ist.

6.2 Das Beharrungsprinzip

Wird auf einen Körper eine Kraft ausgeübt, erhält dieser eine Zusatzgeschwindigkeit. Das sagt uns die Newtonschen Bewegungsgleichung $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$.
Was können wir über die Bewegung eines Körpers aussagen, wenn **keine** Kraft auf ihn ausgeübt wird, wenn also die Kraft null ist?

Dann ist die linke Seite der Gleichung null. Also muss auch die rechte Seite null sein. Und das geht wiederum nur, wenn die Zusatzgeschwindigkeit null ist. Wird keine Kraft auf einen Körper ausgeübt, so erhält dieser auch keine Zusatzgeschwindigkeit. Und das ist gleichbedeutend damit, dass sich die Geschwindigkeit des Körpers nicht ändert!

Jeder Körper behält seine Geschwindigkeit (Tempo und Richtung) bei, solange auf ihn keine Kräfte ausgeübt werden.

Dass das so ist, kannst du in den folgenden Versuchen nachvollziehen:
V1: Auf einer Luftkissenbahn wird ein Gleiter angestoßen. Danach wirkt in Bewegungsrichtung keine Kraft mehr auf den Gleiter d.h. er bewegt sich mit gleich bleibender Geschwindigkeit bis zum Ende der Bahn.

V2: Auf einem langen Wagen steht ein kleines Wägelchen (Bild 6.6). Beide fahren gemeinsam mit konstanter Geschwindigkeit, bis der untere Wagen von einem Bremsklotz angehalten wird.

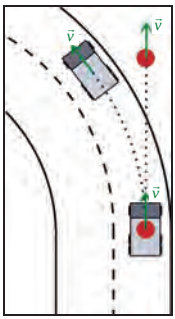
6.6 Kleines Wägelchen auf langem Wagen

Auf den unteren Wagen wurde durch den Bremsklotz eine Kraft ausgeübt, dadurch hat er eine Zusatzgeschwindigkeit erhalten. Wurde auf das kleine Wägelchen durch den Bremsklotz auch eine Kraft ausgeübt? Welche Bewegung führt es aus?

Beobachtung: Das Wägelchen fährt mit unveränderter Geschwindigkeit weiter. Da beim Zusammenstoß mit dem Bremsklotz auf das kleine Wägelchen keine Kraft ausgeübt wurde, hat es keine Zusatzgeschwindigkeit erhalten.

Beispiele
a) *Lastwagen*
Ein Lastwagen hat auf einer ebenen glatten Ladefläche ein ungesichertes Paket liegen.

Wie bewegt sich das Paket weiter, wenn der Lastwagen eine Linkskurve fährt?
Das Paket erhält keine Zusatzgeschwindigkeit d.h. es bewegt sich geradeaus weiter und fällt damit von der Ladefläche (Bild 6.7).



6.7 LKW in der Linkskurve

b) *Voyager*
Am 5. September 1977 wurde die Raumsonde Voyager 1 gestartet (Bild 6.8). Sie hat außer einigen Steuerdüsen keinen eigenen Antrieb.

6.8 Raumsonde Voyager 1

Dennoch gelang es – aufgrund des Beharrungsprinzips – die Sonde auf eine beeindruckende Reise zu schicken: In den Jahren 1979 und 1980 nahm sie Fotografien von Jupiter und Saturn auf. Inzwischen ist Voyager 1 mehr als 100-mal so weit von der Sonne entfernt wie die Erde. Die Raumsonde kann so lange im All fliegen, da (fast) keine Kräfte auf sie ausgeübt werden. Dadurch erhält sie keine Zusatzgeschwindigkeit und ihre Anfangsgeschwindigkeit ändert sich (fast) nicht. Sie wird noch viele tausend Jahre lang so weiter fliegen. Inzwischen ist Voyager 1 das am weitesten von der Erde entfernte von Menschen geschaffene Objekt. (Erst wenn die Raumsonde in etwa 40000 Jahren wieder in die Nähe eines Sternes kommen wird, wird dieser Stern eine Kraft auf sie ausüben. Erst dann erhält sie eine Zusatzgeschwindigkeit und ändert ihre Bewegung.

Aufgaben
① Eine Straßenbahn hält plötzlich an und Maja, die sich nicht festgehalten hat, fällt um. Erkläre warum!

② Eine Straßenbahn fährt an und Maja, die sich nicht festgehalten hat, fällt um. Maja behauptet, dass auf ihren Oberkörper eine große Kraft nach hinten gewirkt habe. Erkläre es richtig.

③ In der Zeitung ist zu lesen: „Matthias K. war am Freitag Nacht mit hoher Geschwindigkeit von Strümpfelbach nach Tückelhausen unterwegs. In einer vereisten Rechtskurve flog sein Opel aus der Kurve und Matthias K. verletzte sich schwer.“ Nimm zu dieser Aussage Stellung und erkläre das Verhalten des Autos korrekt.

④ Wenn der Kopf eines Hammers locker ist, schlägt man den Hammer mit dem unteren Stielende fest auf den Boden, so dass der Hammerstiel stark abgebremst wird. Warum sitzt der Hammerkopf danach wieder weiter unten fest auf dem Stiel?

Für Spezialisten
- Wenn auf einen Körper keine Kraft ausgeübt wird, ändert sich seine Geschwindigkeit nicht.
- Wenn auf einen Körper eine Kraft ausgeübt wird, ändert sich seine Geschwindigkeit, denn er erhält eine Zusatzgeschwindigkeit. Man sagt in der Physik, dass der Körper beschleunigt wird. Es ändert sich dann das Tempo oder die Richtung (oder beides); der Körper wird also schneller, langsamer oder bewegt sich um die Kurve (oder beides).

Achtung: Beschleunigung bedeutet in der Physik etwas anderes als im Alltag.

7. Das Wechselwirkungsprinzip

7.1 Eisstockschießen

Eva sieht beim Eisstockschießen zu (Bild 7.1). Sie beobachtet Folgendes:
Ein grüner Eisstock wird auf einen ruhenden roten Eisstock geschossen. Nach dem Zusammenstoß bewegen sich beide Eisstöcke. Eine Stroboskopaufnahme eines Modellversuchs ist in Bild 7.2 zu sehen.

7.2 Eisstockschießen im Modellversuch

„Das ist doch ganz klar“, denkt sich Eva: Die Geschwindigkeit des roten Eisstockes (speziell sein Tempo) hat sich geändert. Der rote Eisstock hat eine Zusatzgeschwindigkeit bekommen, da der grüne Eisstock auf ihn eingewirkt hat. Und: Auch die Geschwindigkeit des grünen Eisstockes (sein Tempo und seine Richtung) hat sich geändert. Also hat auch der grüne Eisstock eine Zusatzgeschwindigkeit bekommen. Aber wer hat auf ihn eingewirkt? Das kann nur der rote Eisstock gewesen sein!
Wenn der grüne Eisstock auf den roten Eisstock eine Kraft ausübt, dann übt auch der rote Eisstock auf den grünen Eisstock eine Kraft aus.

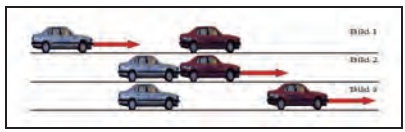
Das gilt ganz allgemein:

Wenn ein Körper eine Zusatzgeschwindigkeit erhält (und sich seine Geschwindigkeit ändert), hat auf diesen ersten Körper ein zweiter Körper eine Kraft ausgeübt. Dann erhält auch der zweite Körper eine Zusatzgeschwindigkeit (und ändert seine Geschwindigkeit), denn auf den zweiten Körper hat der erste Körper eine Kraft ausgeübt.

Wechselwirkungsprinzip:
Übt ein Körper 1 auf einen Körper 2 eine Kraft $\vec{F}_{1\to 2}$ aus, so übt Körper 2 auf Körper 1 eine gleichgroße, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft $\vec{F}_{2\to 1}$ aus.

Wichtig: Die beiden Kräfte $\vec{F}_{1\to 2}$ und $\vec{F}_{2\to 1}$ greifen an verschiedenen Körpern an! $\vec{F}_{1\to 2}$ wirkt auf Körper 2 ein, dies führt zu einer Zusatzgeschwindigkeit für Körper 2, $\vec{F}_{2\to 1}$ wirkt auf Körper 1 ein, dies führt zu einer Zusatzgeschwindigkeit für Körper 1.

V1: Ein silbernes Spielzeugauto fährt auf ein gleich gebautes rotes Spielzeugauto. Du siehst, das silberne Auto bleibt stehen und das rote Auto fährt mit der Geschwindigkeit weg, die das silberne Auto vor dem Zusammenstoß hatte (Bild 7.3). Beide Autos haben eine Zusatzgeschwindigkeit erhalten.



7.3 Versuch mit Spielzeugautos

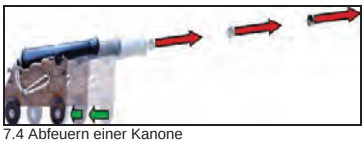
Das silberne Auto hat das rote Auto angestoßen. Dadurch hat das rote Auto eine Zusatzgeschwindigkeit erhalten. Aber auch das silberne Auto hat eine Zusatzgeschwindigkeit bekommen, denn das rote Auto hat auch auf das silberne Auto eingewirkt. Bei beiden Autos hat sich die Geschwindigkeit geändert. Also hat während des Zusammenstoßes jedes Auto eine Kraft auf das andere Auto ausgeübt. Diese Kräfte sind gleich groß und entgegengesetzt.

Beispiele

a) *Fluch der Karibik*

Auch im Kino kann man das Wechselwirkungsprinzip beobachten. Im Film „Fluch der Karibik“ wird die „Black Pearl“ von Soldaten verfolgt. Deshalb lässt Jack Sparrow die Kanonen abfeuern (Bild 7.4).

Die Kanone übt eine Kraft auf die Kugeln aus. Dadurch erhalten die Kugeln eine Zusatzgeschwindigkeit und fliegen nach vorne aus dem Rohr. Aber auch die Kugeln üben eine Kraft in entgegengesetzter Richtung auf die Kanone aus. Die Kanone erhält dadurch eine Zusatzgeschwindigkeit und rollt nach hinten.



7.4 Abfeuern einer Kanone

Das Abfeuern einer Kanonenkugel kannst du in einem Versuch nachvollziehen:

Setze dich mit einem Medizinball auf ein Skateboard. Wirf den Medizinball weg.

Du übst eine Kraft auf den Medizinball aus und gibst ihm eine Zusatzgeschwindigkeit, deshalb fliegt er weg. Aber gleichzeitig übt der Medizinball eine Kraft in der entgegengesetzten Richtung auf dich aus und du erhältst eine Zusatzgeschwindigkeit. Deshalb rollst du auf dem Skateboard in die entgegengesetzte Richtung.

b) *Karate*

Du hast dich sicher schon einmal gefragt, wie man mit der bloßen Hand oder Faust ein Holzbrett durchschlagen kann (Bild 7.5). Auch das kannst du mit der NBG und dem Wechselwirkungsprinzip verstehen:

7.5 Bruchtest beim Karate

Ein Karateka möchte eine möglichst große Kraft auf das Holzbrett ausüben. Das ist der Fall, wenn die Hand durch den Aufprall auf das Brett sehr schnell von einem hohen Tempo abgebremst wird: Dann übt das Brett eine große Kraft auf die Hand aus und nach dem Wechselwirkungsprinzip die Hand auf das Brett. Dazu muss das Tempo der Anfangsgeschwindigkeit der Hand möglichst groß sein. Karate-Meistern gelingt das so gut, dass sie nicht nur ein Holzbrett, sondern sogar mehrere Betonplatten durchschlagen können.

c) *Autocrash*

Stelle dir einen Frontalzusammenstoß zwischen einem Lastwagen (LKW) und einem Kleinwagen (PKW) vor. Auch in diesem Fall gilt: Der LKW übt eine Kraft auf den PKW aus, gleichzeitig übt der PKW eine Kraft auf den LKW aus. Diese beiden Kräfte sind gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet.

Aber das Tempo der Zusatzgeschwindigkeiten, die der LKW und der PKW erhalten ist sehr unterschiedlich. Warum?

Für Spezialisten

Die Kraft $\vec{F}_{1\to 2}$ die der Körper 1 auf den Körper 2 ausübt, ist zwar genauso groß wie die Kraft $\vec{F}_{2\to 1}$ die der Körper 2 auf den Körper 1 ausübt. Trotzdem ändern sich oft die Geschwindigkeiten der beiden Körper unterschiedlich stark. Woran liegt das?

Aus der NBG wissen wir: Das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die ein Körper durch eine Kraft erhält, hängt von der Masse des Körpers ab. Je größer die Masse m des Körpers ist, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$.

Beim LKW ist wegen seiner größeren Masse das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit kleiner.

Aufgaben

① Wie lautet das Wechselwirkungsprinzip? Gib an, mit welchen Versuchen man seine Gültigkeit untermauern kann.

② Gib für die folgenden Situationen jeweils an, ob Kräfte wirken. Bestimme gegebenenfalls welche zwei Körper Kräfte aufeinander ausüben:

a) Ein Hundertmeterläufer startet aus dem Startblock.
b) Kemal fährt mit einem Ruderboot.
c) Ein Hubschrauber startet.
d) Ein Rennwagen startet.
e) Ein Eisstock gleitet mit gleich bleibender Geschwindigkeit.
f) Ein Eisstock prallt gegen einen anderen Eisstock.
g) Ein Basketball wird geprellt.
h) Eine Rakete hebt ab.
i) Beim Boxen schlägt Joe Frazier seinem Gegner Muhammad Ali ins Gesicht.

③ Begründe mit der Bewegungsgleichung und mit dem Wechselwirkungsprinzip, warum die Kräfte beim Versuch mit den Spielzeugautos (V1) gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet waren.

④ Was passiert, wenn man aus einem kleinen Ruderboot heraus an Land springt? Begründe, warum bei einem Kreuzfahrtschiff der Effekt praktisch nicht beobachtet wird.

⑤ Stoßen ein Auto und ein Hase zusammen, sind die Kraft des Autos auf den Hasen und die Kraft des Hasen auf das Auto gleich groß. Warum ändert sich die Geschwindigkeit des Autos aber viel weniger als die Geschwindigkeit des Hasen?

⑥ Jonathan stellt sich mit einer vollen Gießkanne auf sein Skateboard und lässt das Wasser hinter sich auf die Straße laufen, um so vorwärts zu kommen. Überlege, ob das funktioniert.

8. Kraftarten

8.1 Gravitationskraft

Hochgehobene Gegenstände fallen senkrecht zum Erdboden hin, wenn man sie nicht festhält. Wird zum Beispiel ein Apfel nicht mehr vom Ast des Baums gehalten, fällt er ebenfalls senkrecht nach unten (Bild 8.1). Solange der Apfel hängt, ist er in Ruhe. Sobald er fällt erhält er eine Zusatzgeschwindigkeit, also muss ein anderer Körper eine Kraft auf ihn ausüben.
Dieser andere Körper ist die Erde, die alle Gegenstände in ihrer Nähe anzieht.

8.1 Gravitationskraft

Die Erde übt auf alle Gegenstände in ihrer Nähe eine anziehende Kraft aus, die Gravitationskraft genannt wird. Dadurch erhalten diese Gegenstände eine Zusatzgeschwindigkeit in Richtung des Erdbodens.

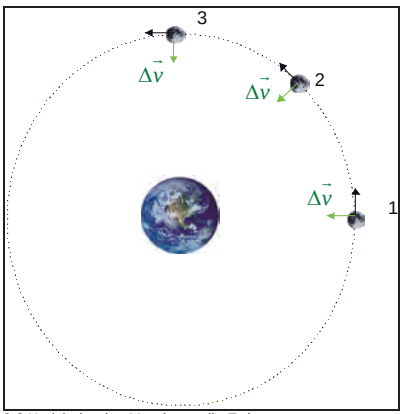
Beachte: In der Nähe der Erde ist die Gravitationskraft auf einen Gegenstand immer gleich groß.

Betrachte den Pfeil der Gravitationskraft, die auf den fallenden Apfel wirkt (Bild 8.1). Er ist zu jedem Zeitpunkt gleich lang, d.h. die Gravitationskraft auf den Apfel ist immer gleich groß.

Du spürst diese Kraft auch, wenn du einen Gegenstand hochhebst. Je größer die Masse eines Gegenstandes ist, umso größer ist die Gravitationskraft, welche die Erde auf ihn ausübt.

Nicht nur die Erde zieht Gegenstände an, auch der Mond, die Sonne und sogar du selbst: Immer wenn zwei Körper eine Masse haben, ziehen sie sich gegenseitig an. Spürbar wird diese anziehende Kraft aber erst dann, wenn die Masse des Körpers sehr groß ist, wie z.B. die Masse der Erde, der Sonne oder des Monds.

Beispiel
Mondumlaufbahn
Der Mond wird durch die Erde angezogen. Deshalb umläuft der Mond die Erde. Das kannst du dir so erklären (Bild 8.2):
Durch die Kraft der Erde auf den Mond, erhält der Mond in allen Punkten seiner Umlaufbahn eine Zusatzgeschwindigkeit in Richtung Erde.
Im Punkt 1 hat der Mond eine Anfangsgeschwindigkeit. Hängst du den Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit (die immer in Richtung Erde zeigt) an den Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit erhältst du die Endgeschwindigkeit des Mondes im Punkt 2.
Im Punkt 2 bewirkt die Erde ebenfalls eine Zusatzgeschwindigkeit auf den Mond in Richtung Erde. So ergibt sich die Geschwindigkeit des Mondes im Punkt 3 usw.
Ohne die Gravitationskraft der Erde würde sich der Mond geradlinig weiterbewegen.



8.2 Kreisbahn des Monds um die Erde

Die Erde (und auch der Mond) werden von der Sonne angezogen und umlaufen deshalb die Sonne.

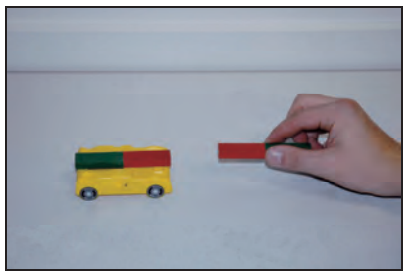
8.2 Magnetische Kraft

Dauermagnete üben auf bestimmte Materialien eine Kraft aus.

V1: Versuche mit einem Stabmagneten eine Eisenkugel, eine Holz- und Papierkugel zu beeinflussen.

Beobachtung: Der Magnet übt eine Kraft auf die Eisenkugel aus, sie erhält eine Zusatzgeschwindigkeit. Der Magnet übt keine Kraft auf die Holz- und die Papierkugel aus. Es kommt auf das Material an, ob ein Dauermagnet eine Kraft auf einen Gegenstand ausübt.

V2:. Lege einen Stabmagnet auf ein Wägelchen. Einen weiteren Stabmagnet hast du in der Hand. Nähere dich mit dem einen Magnet in der Hand dem Magnet auf dem Wägelchen (Bild 8.3).

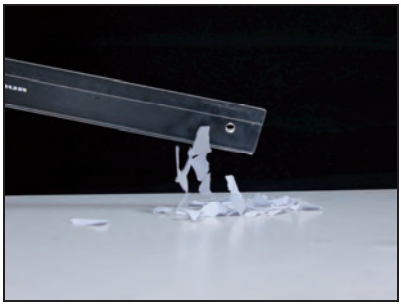

8.3 Der Magnet auf dem Wägelchen erhält eine Zusatzgeschwindigkeit.

Beobachtung: Bringst du zum Beispiel den Nordpol des Stabmagneten in die Nähe des Südpols so ziehen sich die Magneten an: der Magnet auf dem Wägelchen bekommt eine Zusatzgeschwindigkeit. Bringst du dagegen den Nordpol des Stabmagneten in die Nähe des Nordpols, stoßen sich die beiden Stabmagnete ab: der Magnet auf dem Wägelchen bekommt eine entgegen gerichtete Zusatzgeschwindigkeit.

8.3 Elektrische Kraft

Auch elektrische Ladungen üben Kräfte aufeinander aus. Das kannst du in den folgenden Versuchen überprüfen:

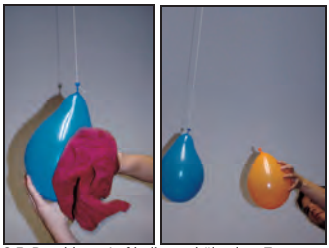
V3: Reibe dein Lineal an einem Wollpullover. Halte nun das Lineal über kleine Papierschnipsel (Bild 8.4)



8.4 Die Papierschnipsel erhalten eine Zusatzgeschwindigkeit.

Beobachtung: Die Papierschnipsel werden von dem Lineal angezogen. Sie erhalten eine Zusatzgeschwindigkeit, d.h. das Lineal hat auf sie eine Kraft ausgeübt.

V4: Hänge einen Luftballon auf und reibe ihn mit einem Wolllappen. Reibe einen zweiten Luftballon mit dem Wolllappen und halte den zweiten Luftballon in die Nähe des ersten Luftballons (Bild 8.5).



8.5 Der blaue Luftballon erhält eine Zusatzgeschwindigkeit.

Beobachtung: Die beiden Luftballone stoßen sich ab. Sie erhalten Zusatzgeschwindigkeiten d.h. sie haben eine Kraft aufeinander ausgeübt.

8.4 Reibungskraft

Wenn du eine Bocciakugel wirfst rollt sie eine Weile. Irgendwann bleibt dann die Kugel liegen (Bild 8.6).

8.6 Auf eine rollende Bocciakugel wirkt die Reibungskraft.

Das ist nichts Außergewöhnliches. Nach unseren alltäglichen Erfahrungen kommen in der Regel Gegenstände, die sich mit einer gewissen Geschwindigkeit bewegen, irgendwann zur Ruhe. Es ändert sich also die Geschwindigkeit der Bocciakugel. Es muss deshalb ein anderer Gegenstand eine Kraft ausgeübt haben, so dass die Bocciakugel eine Zusatzgeschwindigkeit erhält. Wer übt während des Rollens eine Kraft auf die Kugel aus? Es ist die Unterlage, in diesem Fall die Wiese.

Immer wenn sich ein Körper bewegt und er dabei andere Gegenstände berührt (wie zum Beispiel die Unterlage), wirken auf den Körper Kräfte an der Berührungsfläche. Man nennt diese Kräfte **Reibungskräfte**. Reibungskräfte bewirken Zusatzgeschwindigkeiten. Diese können wie bei der Bocciakugel der Anfangsgeschwindigkeit entgegengerichtet sein. Der Körper wird in diesem Fall stetig langsamer.

Reibungskräfte werden immer ausgeübt, wenn sich Körper während der Bewegung berühren.

Reibungskräfte sind sehr oft auch nützlich: Ohne Reibung würde der Fahrradreifen beim Treten am Boden durchdrehen. Auch Autos könnten weder starten noch stoppen, noch eine Kurve fahren. Und man könnte auch nicht laufen, wenn der Boden nicht eine Kraft auf die Schuhsohle ausüben würde.

Beispiele

a) *Fahrradfahren*

Hört man beim Fahrradfahren auf in die Pedalen zu treten, wird das Fahrrad langsamer. Reibungskräfte wirken auf das Fahrrad, das dadurch eine Zusatzgeschwindigkeit erhält. Die Zusatzgeschwindigkeit zeigt dabei in die entgegengesetzte Richtung der Anfangsgeschwindigkeit (Bild 8.7).

8.7 Konstruktion der Endgeschwindigkeit bei Zusatzgeschwindigkeit entgegen der Fahrtrichtung

b) *Lenkdrachen*

8.8 MS Beaufort mit Lenkdrachen

Um Treibstoff zu sparen, werden im Schiffsverkehr Lenkdrachen eingesetzt. Die Zusatzgeschwindigkeit, die ein Schiff wie die „Beaufort“ (Bild 8.8) dadurch erhält, ist viel geringer als die Zusatzgeschwindigkeit, die ein Drachen-Surfer durch den Lenkdrachen erhält. Das liegt daran, dass die Masse der MS Beaufort viel größer ist als die des Surfers, selbst wenn die Kraft auf den Lenkdrachen jeweils gleich groß ist.

Dass das Schiff durch die ständig vom Lenkdrachen ausgeübte Kraft nicht immer schneller wird, liegt an der Reibungskraft. Wenn Antriebskraft und Reibungskraft gleich groß sind, bewegt sich das Schiff mit gleichbleibender Geschwindigkeit.

Aufgaben

① Diskutiere: Übt der Fußball, der auf den Boden fällt eine Kraft auf die Erde aus?

② Auf einen vom Baum fallenden Apfel wirkt die Gravitationskraft. Erkläre anhand des Stroboskopbildes (Bild 8.1), dass der Apfel eine Zusatzgeschwindigkeit erhält.

③ Diskutiere die Bewegung des Fußballs aus Bild 2.4 in Kapitel 2 mit Hilfe der Gravitationskraft.

④ Im Bild 8.2 ist die Bewegung des Mondes um die Erde dargestellt. Im Punkt 1 hat der Mond eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit und im Punkt 3 eine Endgeschwindigkeit. Konstruiere aus diesen beiden Geschwindigkeiten die Zusatzgeschwindigkeit, die der Mond durch die Erde zwischen Punkt 1 und Punkt 3 erhält.

⑤ Auf dem Mond und der Erde wird ein Weitsprungwettbewerb durchgeführt. Wo wird man weiter springen? (Dass man auf dem Mond einen Weltraumanzug tragen muss, der beim Springen sehr hinderlich ist, soll vernachlässigt werden.)

⑥ Die Erde wird von einer großen Zahl von Satelliten umkreist. Warum entfernen sich diese nicht von der Erde?

⑦ Astronomen haben eine Reihe von Doppelsternen entdeckt. Doppelsterne bestehen aus zwei Sternen, die sich gegenseitig umkreisen. Warum entfernen sich Doppelsterne nicht voneinander?

⑧ Beschreibe, wie Reibungskräfte dazu führen, dass die geworfene Bocciakugel schließlich liegen bleibt.

⑨ Benutze die NBG um zu erklären, dass du mit dem Fahrrad irgendwann stehen bleibst, wenn du aufhörst zu treten.

⑩ Finde jeweils drei Beispiele, in denen Reibungskräfte beabsichtigte und unbeabsichtigte Effekte haben.

⑪ Erkläre mit der NBG, wieso man auf Glatteis so gut rutschen kann.

⑫ Kann die Gravitationskraft wie die magnetische Kraft oder die elektrische Kraft „abstoßend“ wirken?

⑬ Zeige mit zwei Stabmagneten auf Wägelchen das Wechselwirkungsprinzip.

9. Januar 2008, Neue Zürcher Zeitung

Ein schwer berechenbarer Kleinplanet

Neue Erkenntnisse zu den Begegnungen von Apophis mit der Erde

Eine Teleskop-Aufnahme des Kleinplaneten Apophis (Bildmitte) (Bild: PD)

Die künftige Bahn des Planetoiden Apophis ist nur schwer vorherzusagen. Zwar gilt als gesichert, dass der kosmische Gesteinsbrocken im Jahr 2029 in etwa fünf Erdradien Abstand an der Erde vorbeifliegen wird. Dass es bei der folgenden Erdbegegnung 2036 zu einer Kollision kommt, können die Forscher jedoch immer noch nicht ausschliessen.

Thorsten Dambeck

8.9 Zeitungsmeldung zum Asteroiden Apophis

⑭ Was haben sich die Wissenschaftler überlegt, um eine Kollision zwischen Apophis und Erde zu verhindern (Bild 8.9)?

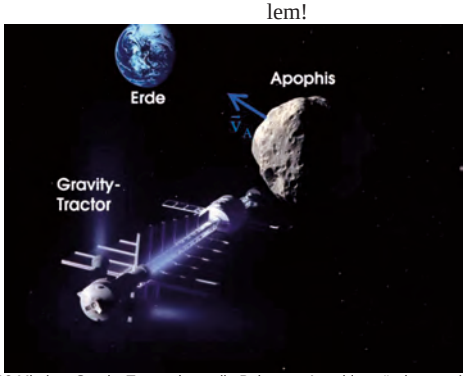
Eine mögliche Lösung wäre der „Gravity Tractor“. Das ist ein sehr schweres Raumschiff, das den Asteroiden eine Zeitlang begleitet. Das Raumschiff übt auf Apophis eine Gravitationskraft aus. Dadurch erhält Apophis eine Zusatzgeschwindigkeit. Nach einer Einwirkungsdauer von einem Tag, beträgt diese Zusatzgeschwindigkeit 0,22 Mikrometer pro Sekunde. Dadurch ändert sich die Geschwindigkeit des Asteroiden, und zwar sein Tempo **und** seine Richtung. Durch diese Richtungsänderung verfehlt der Asteroid die Erde.

a) Benenne die Kraftart, mit der die Wissenschaftler Apophis ablenken wollen!

b) Warum ist es notwendig, dass der „Gravity Tractor“ Apophis eine Zeitlang begleitet? Begründe mit der Newtonschen Bewegungsgleichung!

c) In der Skizze (Bild 8 10) bewegt sich Apophis mit der Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ auf den Kollisionspunkt mit der Erde zu. Erkläre anhand der Darstellung, in welche Richtung die Gravitationskraft wirkt. Beschreibe die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit und der Endgeschwindigkeit von Apophis.

d) Aktuell sehen die Wissenschaftler noch ein Problem, das sich durch die Wechselwirkung zwischen Apophis und dem „Gravity Tractor“ ergibt. Diskutiere das Problem!



8.10 Mit dem Gravity Tractor kann die Bahn von Apophis geändert werden.

9. Wenn mehrere Kräfte wirken

9.1 Kraftpfeile aneinander hängen

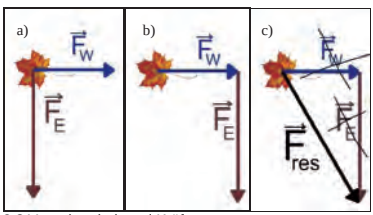
9.1 Blätter im Herbst

Die Blätter fallen im Herbstwind kreuz und quer von den Bäumen (Bild 9.1). Jedes Blatt kommt irgendwann am Boden an. Bei Windstille fällt jedes Blatt senkrecht nach unten. Den Grund dafür weißt du schon: Die Gravitationskraft wirkt auf das Blatt. Weht der Wind von der Seite (wie zum Beispiel in Bild 9.1) übt nicht nur die Erde, sondern auch der Wind eine Kraft auf das Blatt aus.

Wie können wir die Zusatzgeschwindigkeit eines Körpers mit der Newtonschen Bewegungsgleichung bestimmen, wenn zwei Kräfte auf ihn ausgeübt werden?

Dazu müssen wir die beiden Kräfte ersetzen durch eine einzelne Kraft, die **resultierende** Kraft genannt wird. Sie hat die gleiche Wirkung, wie die beiden einzelnen Kräfte zusammen.

Die resultierende Kraft wird grafisch nach dem gleichen Verfahren bestimmt, das du von der Bestimmung der Endgeschwindigkeit schon kennst (Bild 9.2).



9.2 Vorgehen bei zwei Kräften

Vorgehen:

a) Zuerst zeichnest du die **an dem Körper angreifenden** Kräfte ein.

Ähnlich wie die Geschwindigkeit wird auch die Kraft durch einen Pfeil dargestellt: Die Länge des Pfeils gibt die Stärke der Einwirkung, die Richtung des Pfeils gibt die Richtung der Einwirkung an. (Im Beispiel ist das die Gravitationskraft der Erde $\vec{F}_E$ und die Kraft des Windes $\vec{F}_W$.

b) Die Kraftpfeile setzt du in gleicher Weise zusammen wie die Geschwindigkeitspfeile, d.h. du hängst den einen Kraftpfeil an die Spitze des anderen Kraftpfeils. Es spielt keine Rolle, mit welchem Pfeil du beginnst. (Im Beispiel wurde der Pfeil von $\vec{F}_E$ an die Spitze des Pfeils von $\vec{F}_W$ gehängt.)

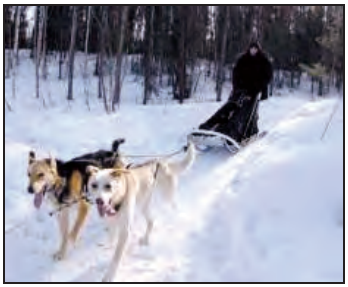
c) Jetzt verbindest du den ersten Pfeilfuß (im Beispiel den Pfeilfuß von $\vec{F}_W$) mit der letzten Pfeilspitze (im Beispiel die Pfeilspitze von $\vec{F}_E$). Diese Verbindung ist der Pfeil der resultierenden Kraft. Du weißt nun sowohl ihre Stärke, als auch ihre Richtung.

Da die resultierende Kraft die gleiche Wirkung hat, wie die beiden einzelnen Kräfte zusammen, musst du nun nur noch die resultierende Kraft betrachten. Du kannst so tun, als ob nur eine einzige Kraft (die resultierende Kraft) auf den Körper ausgeübt wird. Damit du nicht durcheinander kommst, musst du aber die anderen Kräfte im Bild ausstreichen.

Im Beispiel erkennst du durch die resultierende Kraft, dass das Blatt eine Zusatzgeschwindigkeit nach schräg rechts unten erhält.

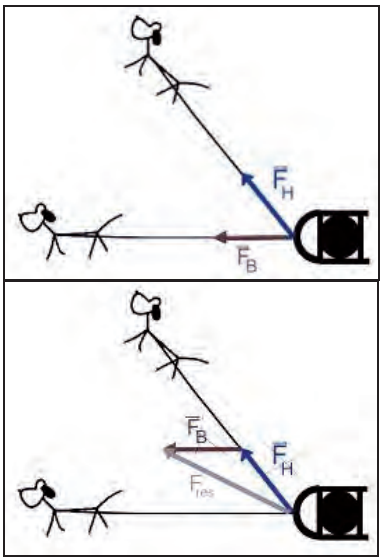
Die resultierende Kraft:
Finde alle Kräfte, **die auf den Körper ausgeübt werden**. Hänge die Kraftpfeile aneinander. Der Pfeil der resultierenden Kraft ist die Verbindung des Pfeilfußes des ersten Kraftpfeils mit der Pfeilspitze des letzten Kraftpfeils. Du kannst nun so tun, als ob alle Kraftpfeile durch den Pfeil der resultierenden Kraft ersetzt werden. Die resultierende Kraft liefert dir die Zusatzgeschwindigkeit, die der Körper bekommt.

Beispiel
Hundeschlitten



9.3 Hundeschlitten

Sven aus Schweden bindet seine beiden Hunde Bello und Hasko vor einen Schlitten. Die Hunde ziehen den Schlitten mit Sven (Bild 9.3). Plötzlich sieht Hasko einen Hasen. Er zieht für einen kurzen Moment mit großer Kraft nach rechts. In welche Richtung erhält der Schlitten nun durch die beiden Hunde eine Zusatzgeschwindigkeit?



9.4 Resultierende Kraft beim Hundeschlitten

Die beiden Kraftpfeile $\vec{F}_H$ und $\vec{F}_B$ von den Hunden werden aneinander gehängt (Bild 9.4). Man kann sich vorstellen, dass diese Kräfte durch die resultierende Kraft $\vec{F}_{\text{Res}}$ ersetzt werden. In Richtung der resultierenden Kraft erhalten Sven und sein Schlitten eine Zusatzgeschwindigkeit.

9.2 Kräftegleichgewicht

Warum erhält die Schale auf dem Tisch keine Zusatzgeschwindigkeit (Bild 9.5), obwohl doch die Gravitationskraft auch auf sie ausgeübt wird?

9.5 Obstschale

Du musst zunächst alle Körper finden, die eine Kraft auf die Schale ausüben: Die Erde übt die Gravitationskraft auf die Schale aus und der Tisch übt auch eine Kraft auf die Schale aus. Wenn du diese beiden Kraftpfeile aneinander hängst siehst du, dass die resultierende Kraft gleich null ist.

In diesem Fall, wenn die resultierende Kraft gleich null ist, spricht man von einem **Kräftegleichgewicht**.

Beispiele
a) *Fallschirmspringer*

9.6 Fallschirmspringer

Welche Kräfte wirken auf einen Fallschirmspringer, der seinen Schirm noch nicht geöffnet hat (Bild 9.6)?

Es wirken zwei Kräfte auf ihn: Die Gravitationskraft der Erde und die Reibungskraft der Luft. Sind die beiden Kräfte gleich groß, wird die resultierende Kraft null. Das bedeutet, dass der Fallschirmspringer keine Zusatzgeschwindigkeit erhält. In diesem Fall bleibt seine Geschwindigkeit unverändert.

b) *Fahrradfahrer*
Beim Fahrradfahren kann man erleben, dass das Tempo unverändert bleibt, obwohl man kräftig in die Pedale tritt.
Welche Kräfte wirken auf den Fahrradfahrer: erstens eine Antriebskraft, zweitens eine Reibungskraft (Bild 9.7). Wenn Antriebskraft und Reibungskraft gleich groß sind, ist die resultierende Kraft null. Dann erhält der Fahrradfahrer keine Zusatzgeschwindigkeit, und seine Geschwindigkeit bleibt unverändert.

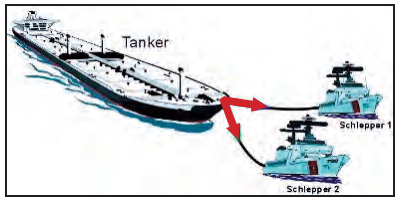
9.7 Kräfte beim Fahrradfahren

Aufgaben

① Diskutiere mit deinem Banknachbarn, welche Kräfte auf einen Skispringer wirken. Diskutiert auch, welchen Einfluss Wind aus unterschiedlichen Richtungen auf die resultierende Kraft auf den Skispringer hat!

② Welche Kräfte wirken auf einen Tennisball im Moment des Abschlags? Welche Kraft ist im Moment des Abschlags am größten? Beschreibe die resultierende Kraft auf den Tennisball.

③ Zwei Schlepper müssen einen Tanker aus dem Hafen ziehen (Bild 9.8). Beide ziehen mit gleich großer Kraft. Zeichne die Situation von oben gesehen in dein Heft. Der Winkel zwischen den Kraftpfeilen ist 50°. Konstruiere den resultierenden Kraftpfeil!



9.8 Abschleppen eines Tankers

④ Erkläre deinem Banknachbar, warum dein Federmäppchen auf dem Schreibtisch keine Zusatzgeschwindigkeit erhält, obwohl doch die Gravitationskraft auf das Federmäppchen wirkt.

⑤ Erkläre, warum der Tisch im Bild 9.5 ebenso wie die Schale im Gleichgewicht ist.

Zur Unterscheidung von Wechselwirkungsgesetz und Kräftegleichgewicht:

Beim Wechselwirkungsprinzip werden Aussagen über Kräfte gemacht, die an unterschiedlichen Körpern angreifen.
Beim Kräftegleichgewicht werden Aussagen über Kräfte gemacht, die am gleichen Körper angreifen.

Beispiel:
Wechselwirkung: Die Erde übt eine Gravitationskraft auf die Schale aus. Diese Kraft greift an der Schale an. Auch die Schale übt eine Kraft auf die Erde aus. Diese Kraft greift aber an der Erde an. Diese beiden Kräfte sind nach dem Wechselwirkungsgesetz gleich groß und entgegengesetzt gerichtet.
Kräftegleichgewicht: Die Erde übt eine Gravitationskraft auf die Schale aus. Auch der Tisch übt eine Kraft auf die Schale aus. Diese beiden Kräfte greifen an der Schale an. Wenn diese beiden Kräfte eine resultierende Kraft gleich null ergeben, ist die Schale im Kräftegleichgewicht.