



Auf dem Jahrmarkt gibt es viele Fahrzeuge, in denen wir hin- und her-, auf oder niedergeschleudert werden. Oft werden wir von den Fahrzeugen beschleunigt oder gebremst. Damit wir diese ungleichmäßigen Bewegungen ausführen, muss stets eine Kraft auf unseren Körper ausgeübt werden.

## Trägheit von Körpern

Boxer sieht man manchmal beim Training an einem großen Sandsack (Bild 2). Der Sandsack ist frei an einem Seil aufgehängt, doch auch bei harten Schlägen bewegt er sich kaum. Anders verhält sich ein Punchingball, der bei jedem Schlag weit ausgelenkt wird (3).

Der Sandsack lässt sich nicht so leicht in Bewegung versetzen wie der Punchingball. Physiker sagen: Er hat eine größere Trägheit. Sandsack und Punchingball unterscheiden sich vor allem durch ihre Masse: Ein Sandsack wiegt bis zu 60 kg, ein Punchingball etwa 2 kg.

Die Trägheit eines Gegenstands zeigt sich nicht nur, wenn man ihn in Bewegung versetzt, sondern auch, wenn man ihn aus der Bewegung abbremst: Ein Handball lässt sich ohne Mühe auffangen und dabei abbremsen. Beim Fangen eines schnellen Medizinballs wird man dagegen fast umgeworfen. Der Medizinball hat eine größere Trägheit als der Handball, er hat auch eine größere Masse: etwa 8 kg im Vergleich zu 0,4 kg.

Beim Bowling sind 10 schwere Kegel in einer bestimmten Formation aufgestellt (Bild 4). Würde man versuchen, sie mit einer leichten Holzkugel umzuwerfen, so würde diese bereits von den vorderen Kegeln aus der Bahn gebracht, vielleicht würde sie auch zurückprallen. Daher werden massive Kugeln verwendet, die bis zu 7 kg wiegen. Aufgrund ihrer großen Trägheit können sie die Kegelanordnung fast ohne Richtungsänderung durchqueren.

Jeder Körper setzt einer Bewegungsänderung einen Widerstand entgegen. Diese Eigenschaft des Körpers nennt man Trägheit. Die Trägheit eines Körpers ist umso größer, je größer seine Masse ist.

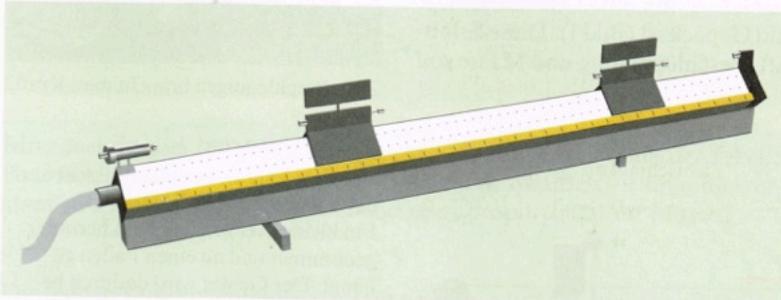
Unter dem Wort „Bewegungsänderung“ versteht man dabei die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages oder aber die Richtungsänderung einer Bewegung.



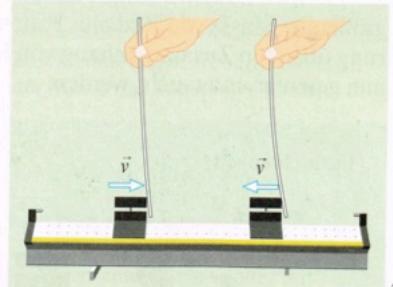
# Trägheitsgesetz (1. Newton'sches Gesetz)

Ein Ball, der auf dem Boden liegt, bleibt in Ruhe, solange keine Kraft auf ihn ausgeübt wird. Diese Erfahrung ist uns gut vertraut. Wir würden uns auch sehr wundern, wenn es anders wäre und sich ein Körper plötzlich ohne Ursache in Bewegung setzte.

Jeder rollende Ball bleibt irgendwann liegen, Reibungskräfte bewirken, dass er immer langsamer wird. Je geringer die Reibung ist, umso weiter rollt der Ball. Eine fast völlig reibungsfreie Bewegung kann auf einer Luftkissenbahn erreicht werden (Bild 1). Die Gleiter bewegen sich lange Zeit mit nahezu konstanter Geschwindigkeit zwischen den Fahrbahnen hin und her. Zum Aufrechterhalten dieses Bewegungszustandes bedarf es keiner Kraft.



Der Gleiter bewegt sich nahezu reibungsfrei zwischen den Umkehrpunkten auf der Luftkissenfahrbahn.



Abbremsen und Beschleunigen erfordert Kraft.

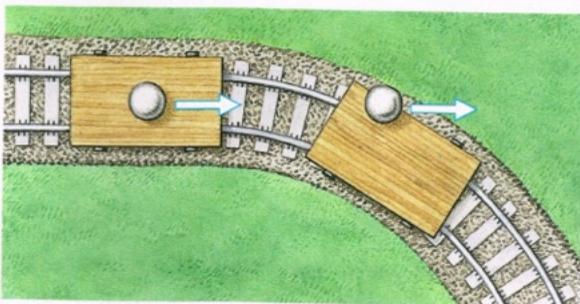
Der Gleiter bewegt sich gleichförmig geradlinig; wenn seine Geschwindigkeit vergrößert oder verringert werden soll, muss eine Kraft wirken. Man kann den Gleiter mit einem Lineal, an dem sich die Kraftwirkung durch Verformung zeigt, abbremsten und beschleunigen (Bild 2).

Damit lässt sich das Trägheitsgesetz formulieren:

## Trägheitsgesetz (1. Newton'sches Gesetz)

Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder gleichförmiger geradliniger Bewegung, solange keine äußeren Kräfte auf ihn einwirken.

Die Gültigkeit dieses Gesetzes zeigt sich auch bei der Kurvenfahrt: Aufgrund ihrer Trägheit bewegt sich die Kugel in Bild 3 geradeaus weiter. In der Rechtskurve fällt sie vom linken Wagenrand. Der Fahrer im Bild 4 wird dagegen durch eine Kraft, die die Seitenwand auf ihn ausübt, von der geradlinigen Bahn abgebracht. Diese Kraft ist auf den Kreismittelpunkt der Kurve gerichtet.



Geradlinige Bewegung einer Kugel



Kurvenfahrt im Auto

## Schon gewusst?

Lange Zeit hat man angenommen, dass zum Aufrechterhalten einer Bewegung immer eine Kraft notwendig ist. Daraus wurde gefolgert, dass die Ruhe der „natürliche Zustand“ aller Körper sei und die Körper diesem Zustand immer wieder zustrebten. Erst GALILEI kam in einem Gedankenexperiment zu dem Ergebnis, dass eine reibungsfreie Bewegung ewig fort dauern müsste.

# Grundgesetz der Mechanik (2. Newton'sches Gesetz)

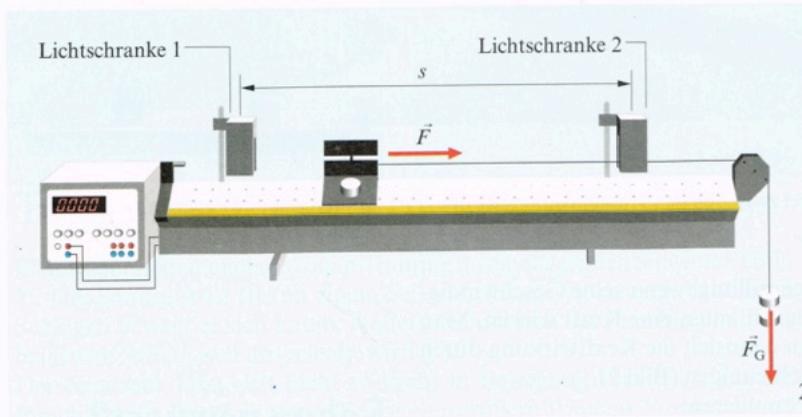
Eine Kraft kann einen Körper aus der Ruhe in Bewegung versetzen, sie kann seine Bewegung schneller oder langsamer machen: Ein Körper kann durch die Wirkung einer Kraft beschleunigt werden.

Wenn man Fahrrad fährt und schneller werden will, ändert man die Geschwindigkeit um einen bestimmten Betrag in einer bestimmten Zeit. Die Geschwindigkeitsänderung, d. h. die Beschleunigung, ist umso größer, je kräftiger man in die Pedale tritt, je größer also die wirkende Kraft ist.

Bei gleicher Kraftwirkung wird die Beschleunigung umso kleiner sein, je größer die Masse von Rad plus Fahrer und Gepäck ist (Bild 1). Diese Erfahrung über den Zusammenhang von Kraft, Beschleunigung und Masse soll nun genauer untersucht werden:



Zum Beschleunigen braucht man Kraft.



### EXPERIMENT 1

Auf dem Gleiter einer Luftkissenbahn befinden sich einige Wägestücke. Ein kleines Wägestück wird heruntergenommen und an einen Faden gehängt. Der Gleiter wird dadurch beschleunigt. Beim Start wird eine Uhr eingeschaltet, nach Durchlaufen der Messstrecke wird sie ausgeschaltet. Nach und nach werden weitere Wägestücke vom Gleiter genommen und an den Faden gehängt. Die beschleunigende Kraft wird dadurch größer, die Masse bleibt jedoch konstant.

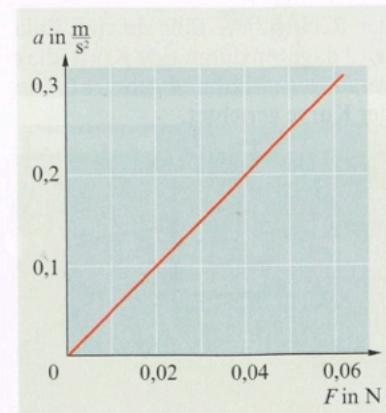
Man erhält eine Messwertetabelle wie die folgende. Mithilfe von Messungen an verschiedenen Orten  $s_1, s_2, s_3 \dots$  kann man nachweisen, dass es sich jeweils um gleichmäßig beschleunigte Bewegungen handelt. Die Beschleunigungen können daher mit der Gleichung

$$a = \frac{2s}{t^2} \text{ berechnet werden.}$$

Messwertetabelle				
$F$ in N	$m$ in kg	$s$ in m	$t$ in s	$a$ in $\frac{m}{s^2}$
0,02	0,190	0,80	4,0	0,10
0,03	0,190	0,80	3,3	0,15
0,04	0,190	0,80	2,9	0,19
0,05	0,190	0,80	2,5	0,26
0,06	0,190	0,80	2,3	0,30

Stellt man in einem Diagramm die Beschleunigung in Abhängigkeit von der Kraft dar, so erkennt man, dass Kraft und Beschleunigung einander proportional sind (Bild 3):  $F \sim a$ .

Ohne Kraft ( $F = 0$ ) gibt es auch keine Beschleunigung:  $a = 0$ .



Beschleunigung in Abhängigkeit von der Kraft (bei konstanter Masse)

In einem weiteren Experiment mit der Luftkissenbahn soll die zu beschleunigende Masse verändert, die Kraft jedoch konstant gehalten werden. Die zugehörigen Beschleunigungen werden aus den gemessenen Zeiten ermittelt und in eine Tabelle eingetragen.

Messwertetabelle				
$m$ in kg	$s$ in m	$t$ in s	$a$ in $\frac{m}{s^2}$	$m \cdot a$ in $kg \cdot \frac{m}{s^2}$
0,090	0,80	2,0	0,40	0,036
0,140	0,80	2,4	0,28	0,039
0,190	0,80	2,8	0,20	0,038
0,240	0,80	3,2	0,16	0,038
0,290	0,80	3,6	0,13	0,038

Mit zunehmender Masse wird die Beschleunigung geringer. Aus der Tabelle lässt sich ablesen, dass das Produkt aus Masse und Beschleunigung konstant ist: Die Beschleunigung ist umgekehrt proportional zur Masse,

$$a \sim \frac{1}{m}$$

Die beiden Zusammenhänge  $a \sim 1/m$  und  $F \sim a$  hat der englische Physiker ISAAC NEWTON vor über 300 Jahren in einer Gleichung zusammengefasst:

$$a = \frac{F}{m} \text{ bzw. } F = m \cdot a$$

Weil das eine fundamentale Beziehung zwischen Kraft, Masse und Beschleunigung ist, nennt man sie auch das Grundgesetz der Mechanik.

#### Grundgesetz der Mechanik (2. Newton'sches Gesetz)

Wirkt auf einen beweglichen Körper der Masse  $m$  die Kraft  $F$ , so wird er beschleunigt. Es gilt dabei:  $F = m \cdot a$ .

**Die Einheit Newton.** Anhand der Gleichung  $F = m \cdot a$  wird deutlich, dass die Einheit der Kraft sich auf die so genannten Basiseinheiten Kilogramm, Meter und Sekunde zurückführen lässt. Die abgeleitete Einheit Newton (N) wurde folgendermaßen festgelegt:

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

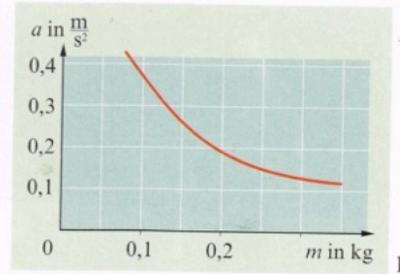
1 N ist also die Kraft, die bei einem Körper der Masse 1 kg eine Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  bewirkt.

**Schwere und träge Masse.** Die Masse charakterisiert zwei Eigenschaften eines Körpers: Je größer die Masse eines Körpers ist,

- umso größer ist seine Trägheit, d. h., umso mehr Kraft ist erforderlich, um ihn zu beschleunigen, und
- umso größer ist die Kraft, mit der er von der Erde angezogen wird.

Ein Körper A mit der Masse 2 kg wird von der Erde mit der Kraft 19,62 N angezogen, ein Körper B mit der Masse 1 kg wird nur mit 9,81 N angezogen (Bild 2). Nun ist Körper A doppelt so träge wie der Körper B: Um die gleiche Beschleunigung zu erreichen, muss auf ihn die doppelte Kraft wirken. Das Verhältnis aus Gewichtskraft und Masse ist bei beiden Körpern gleich.

Im freien Fall haben sie die gleiche Beschleunigung:  $g = 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .



Beschleunigung in Abhängigkeit von der Masse (bei konstanter Kraft)

### Schon gewusst?

Angenommen, ein Gleiter mit  $m_1 = 90 \text{ g}$  wird durch ein Wägestück mit  $m_2 = 10 \text{ g}$  beschleunigt. Dann wirkt im Ruhezustand eine Kraft von 0,1 N auf den Gleiter. Lässt man den Gleiter los, so beträgt die Beschleunigung

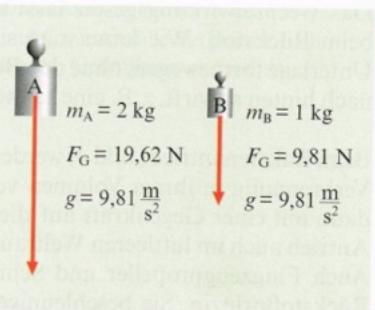
$$a = \frac{0,1 \text{ N}}{0,1 \text{ kg}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Daraus kann man die Kraft berechnen, mit der der Gleiter beschleunigt wird:

$$F = m_1 \cdot a = 0,09 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2 = 0,09 \text{ N}$$

Diese Kraft ist also kleiner als die Kraft im Ruhezustand.

Denselben Effekt kennt man aus dem Fahrstuhl: Wird die Kabine nach unten beschleunigt, fühlt man sich leichter. Eine Personenwaage zeigt in diesem Moment tatsächlich weniger an als im ruhenden Fahrstuhl.



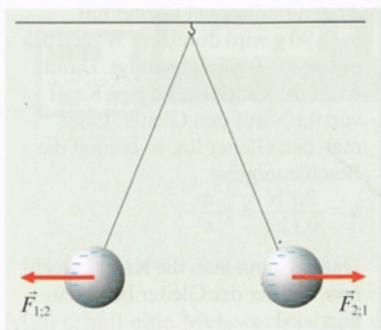
Beide Körper fallen gleich schnell.

## Wechselwirkungsgesetz (3. Newton'sches Gesetz)

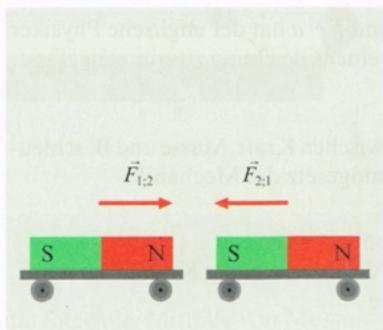


Zwei Personen stehen auf Skateboards und ziehen an einem Seil. Haben beide die gleiche Masse, so treffen sie sich in der Mitte. Aber auch wenn nur einer zieht und der andere sich das Seil um die Taille bindet, treffen sie sich in der Mitte. Die beiden Personen üben Kräfte aufeinander aus, die jeweils denselben Betrag haben, aber entgegengesetzt gerichtet sind.

Kraft und Gegenkraft treten stets gleichzeitig auf. Dabei kommt es nicht darauf an, ob die Körper direkt aufeinander einwirken, oder ob z. B. elektrische Kräfte, magnetische Kräfte oder die Kräfte einer gespannten Feder zwischen ihnen wirken.



Elektrische Kräfte



Magnetische Kräfte

### Wechselwirkungsgesetz (3. Newton'sches Gesetz)

Übt ein Körper A auf einen zweiten Körper B eine Kraft aus, so übt auch B eine Kraft auf A aus. Beide Kräfte sind gleich groß, sie sind einander entgegengesetzt gerichtet.

Kraft und Gegenkraft greifen an verschiedenen Körpern an.

Die Aussage dieses Gesetzes wird auch kurz mit *actio = reactio* bezeichnet. Das Wechselwirkungsgesetz lässt sich vielfältig ausnutzen, zum Beispiel beim Rückstoß: Wie kann man sich mit einem Skateboard auf ebener Unterlage fortbewegen, ohne den Boden zu berühren? – Indem man Ballast nach hinten abwirft, z. B. eine schwere Tasche.

Beim Raketenantrieb (Bild 4) werden die Treibgase im Raketenmotor durch Verbrennung in ihrem Volumen vergrößert und beschleunigt; sie wirken dann mit einer Gegenkraft auf die Rakete zurück. Das ermöglicht einen Antrieb auch im luftleeren Weltraum.

Auch Flugzeugpropeller und Schiffsschrauben funktionieren nach dem Rückstoßprinzip: Sie beschleunigen Luft bzw. Wasser nach hinten. Die jeweiligen Gegenkräfte bewirken den Vortrieb (Bild 5).



Rückstoß beim Raketenantrieb



Rückstoß beim Schiffsantrieb