

KAPITEL 3

DYNAMIK

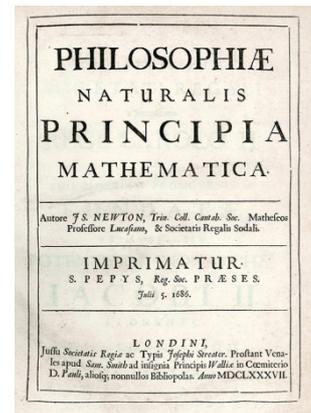
3.1 Einführung

In der Kinematik haben wir uns damit beschäftigt, Bewegungsabläufe zu *beschreiben*. Die Frage "warum bewegen sich Körper?" haben wir nicht gestellt. Genau mit dieser Frage beschäftigt sich die Dynamik. Es stellt sich heraus, dass Kräfte die Ursache von Bewegungen sind. Die Dynamik ist ein Teilgebiet der Mechanik. Sie befasst sich mit der Wirkung von Kräften. Das Wort Dynamik leitet sich denn auch vom griechischen *dynamis* = Kraft ab.



Das Kernstück der Dynamik sind die drei Axiome (Grundgesetze) von Sir Isaac Newton (1642 – 1727). Diese Grundgesetze hat Isaac Newton in seinem Werk *Mathematische Prinzipien der Naturlehre* (lateinischer Originaltitel: *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*) im Jahre 1686 eingeführt. In diesem Werk legte Newton den Grundstein für die klassische Mechanik. Bis heute

bildet die Newtonsche Mechanik den Kern der technischen Wissenschaften. Die *Principia* werden als eines der wichtigsten wissenschaftlichen Werke eingestuft. Neben der Mechanik hat Newton auch bahnbrechende Beiträge in der Optik und der Mathematik erbracht. Er gilt als einer der bedeutendsten Wissenschaftler aller Zeiten.



Die Eisenbibliothek im Klostersgut Paradies besitzt ein 1687 gedrucktes Exemplar der *Principia*.

Die Newtonsche Physik war ausserordentlich erfolgreich. Dank ihr gelang es, praktisch alle mechanischen Erscheinungen des täglichen Lebens, aber auch am Sternenhimmel mathematisch zu erfassen und so zu erklären. Kein physikalisches Werk hat die Naturwissenschaften vorher so stark geprägt und verändert wie die *Principia*. Erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts zeigte sich, dass die auf den *Principia* beruhende Mechanik Grenzen hat und im Bereich der Atome und Elementarteilchen sowie für extrem schnell bewegte Körper nicht mehr angewendet werden darf. Ein neues Gebiet der Physik, die sogenannte Quantenmechanik, welche in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt wurde, ist notwendig, um Atome und Elementarteilchen zu verstehen. Körper, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen oder mit ähnlich grosser Geschwindigkeit, werden durch die Relativitätstheorie beschrieben. Diese Theorie wurde von Albert Einstein 1905 (spezielle Relativitätstheorie) und 1916 (allgemeine Relativitätstheorie) veröffentlicht.



3.2 Kraft – eine Annäherung

Zähle einige Beispiele von Kräften auf!

Hier handelt es sich um verschiedene Kraftarten. Nun wollen wir die folgende – grundsätzlichere Frage beantworten: **Was ist eine Kraft?**

Glücklicherweise haben die Physiker gemerkt, dass es nicht notwendig ist, diese Frage zu beantworten. Es genügt, die bescheidenere Frage zu stellen: **Was bewirkt eine Kraft?** Betrachten wir dazu die folgenden Bilder. Auf allen Bildern wirken Kräfte. Was bewirken sie?



Auch bei diesen Beispielen wirken Kräfte, obwohl hier der Betrag der Geschwindigkeit konstant bleibt. Was bewirken die Kräfte hier?



Kräfte können aber nicht nur beschleunigen. Bei den nächsten Bildern zeigt sich eine weitere Wirkung von Kräften, welche?



Wirkung von Kräften

Kräfte können:

- Körper **beschleunigen**
Geschwindigkeit erhöhen / erniedrigen oder Richtung der Geschwindigkeit ändern
- Körper **verformen**

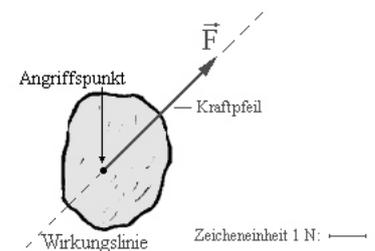
Die verformende und die beschleunigende Wirkung einer Kraft hängen ab von ihrem

- Betrag
- Richtung
- Angriffspunkt

Darstellung von Kräften durch Pfeile (sogenannte Vektoren)

Die **Länge** des Pfeils symbolisiert ihren **Betrag**. Wird ein Massstab angegeben (z. B. 1 cm entspricht 5 N), so kann der Betrag direkt aus der Zeichnung abgelesen werden.

- Der **Anfangspunkt** stellt den **Angriffspunkt** dar.
- Die **Richtung** des Pfeils zeigt die Richtung der Kraft an.



Kräftediagramme skizzieren:

Kräfte werden in der Physik mit dem Buchstaben F bezeichnet (englisch: force = Kraft). Die Einheit für die Kraft ist das Newton, abgekürzt N.

$$[F] = 1 \text{ N}$$

Um eine Tafel Schokolade ($m = 100 \text{ g}$) hochzuheben, braucht man eine Kraft von etwa einem Newton.

3.3 Vektorgrößen

In der Physik unterscheidet man zwischen Größen, welche eine Richtung haben (z. B. die Geschwindigkeit und die Kraft) und Größen, bei denen eine Richtungsangabe nicht sinnvoll ist (z.B. das Volumen, die Dichte oder die Zeit). So fährt das Auto in diejenige Richtung, in die seine Geschwindigkeit zeigt. Bei einem Volumen kann man keine Richtung angeben. Ein Volumen kann nicht in eine Richtung zeigen.

3.3.1 Vektorgrößen und skalare Größen

Definition: Vektorgröße

Eine Vektorgröße (oder kurz: ein Vektor) ist eine Größe, die sowohl einen Betrag als auch eine Richtung hat.

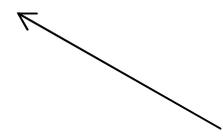
Vektorgößen werden mit einem Pfeil dargestellt. Die Länge des Pfeils ist proportional zum Betrag.

Beispiel:

$v = 5 \text{ km/h}$


Bei dieser Schreibweise ist keine Information zur Richtung vorhanden.

Der Pfeil gibt eine Information zur Richtung und zum Betrag (durch seine Länge)



Weitere Beispiele vektorieller Größen:

Definition: skalare Größe

Eine physikalische Größe, welche keine Richtung hat, nennt man skalare Größe.

Beispiele skalarer Größen:

3.3.2 Schreibweise von Vektorgrößen

Ab jetzt ist es wichtig, zwischen dem Vektor und seinem Betrag zu unterscheiden. Deshalb wird eine neue Schreibweise eingeführt:

\vec{F}, \vec{v} : bezeichnet den Vektor
 F, v : bezeichnet seinen Betrag

\vec{F} bezeichnet den Vektor, also zwei Informationen:

- die Richtung, in die der Vektor zeigt **und**
- den Betrag des Vektors (die Länge des Pfeils)

F bezeichnet nur den Betrag des Vektors:

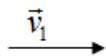
- F gibt den Betrag des Vektors an (z.B. 5 N oder 3 m/s)
- eine Information zur Richtung ist nicht vorhanden

Beispiele:



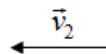
$$F_A = 5 \text{ N}$$

Die Kraft \vec{F}_A hat einen Betrag von 5 N.



$$v_1 = 6 \text{ m/s}$$

Die Geschwindigkeit \vec{v}_1 hat einen Betrag von 6 m/s.



$$v_2 = 6 \text{ m/s}$$

Die Geschwindigkeit \vec{v}_2 hat einen Betrag von 6 m/s.

3.3.3 Kräfte addieren

Was passiert, wenn mehrere Kräfte an einem Körper angreifen? Dann zählt man einfach alle Kräfte zusammen. Die Summe nennt man resultierende Kraft. Newton konnte zeigen, dass die resultierende Kraft entscheidend ist für die Beschleunigung eines Körpers.

Resultierende Kraft

Die resultierende Kraft \vec{F}_{res} ist die Summe aller Kräfte, welche auf einen Körper wirken:

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$$

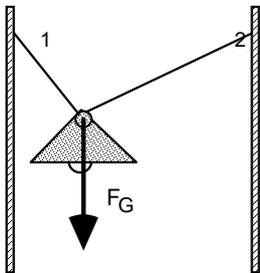
Die resultierende Kraft **ersetzt** also die anderen Kräfte.

Die Summe („Sigma“) wird auch folgendermassen geschrieben:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_{res} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$$

Kräftezerlegung

Das Seil ist nicht in Richtung der Gewichtskraft (F_G) gespannt. Dennoch muss das Seil auf die Lampe eine nach oben gerichtete Kraft ausüben, um ihre Gewichtskraft auszugleichen. Diese Kraft wird durch Teilkräfte erzeugt, die in Richtung der Seile wirken. Die Beträge der Seilkräfte können ermittelt werden, wenn wir die Konstruktion beim Zusammenwirken von Kräften umkehren.



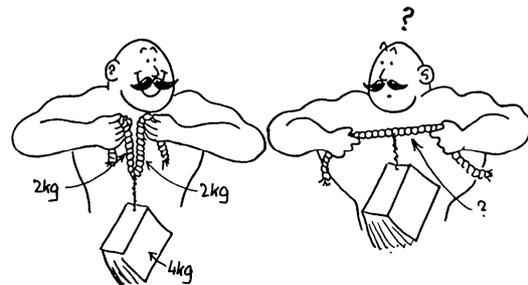
$$F_G = 6 \text{ N}$$

$$F_1 = \quad \text{N}$$

$$F_2 = \quad \text{N}$$

Kraftprotz

Wenn der Kraftprotz das 4 kg schwere Telefonbuch so wie in der Abbildung hält, beträgt die Spannung in jedem senkrecht verlaufenden Seil 20 N. Wenn der Kraftprotz das Telefonbuch an einem vollständig waagrecht gestrafften Seil halten könnte, wäre die Spannung in jedem Seilstück



- a) ca. 20 N
- b) ca. 40 N
- c) ca. 80 N
- d) mehr als eine Million Newton

Das Kräftegleichgewicht

Beim Tauziehen bewegt sich das Seil nicht, wenn beide Parteien mit gleichem Kraftbetrag gegeneinander ziehen. Der Betrag der resultierenden Kraft beträgt dann 0 N. In diesem Fall herrscht **Kräftegleichgewicht**.

Im allgemeinen Fall herrscht dann Gleichgewicht, wenn die Resultierende aller wirkenden Kräfte auf einen Körper Null wird.

3.4 Die drei Newton'schen Axiome („Grundgesetze“)

Die drei Axiome von Isaac Newton bilden das Fundament der klassischen Mechanik.

I. Newtonsches Axiom (Trägheitssatz)

Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe (das heisst $v = 0$) oder der gleichförmigen Bewegung (das heisst $v = \text{konstant}$), wenn keine resultierende Kraft auf ihn einwirkt.

2. Newtonsches Axiom

Wirkt eine resultierende Kraft \vec{F}_{res} auf einen Körper mit der Gesamtmasse m_{ges} , so beschleunigt sie ihn mit:

$$a = \frac{F_{res}}{m_{ges}} \quad \text{das heisst: } F_{res} = m_{ges} \cdot a$$

$$\text{Oder: } \quad \Sigma F = m_{ges} \cdot a$$

3. Newtonsches Axiom (actio = reactio)

Übt ein Körper A die Kraft \vec{F}_A auf einen Körper B aus (actio), dann übt der Körper B die Gegenkraft \vec{F}_B auf den Körper A aus (reactio). Dabei gilt:

$$\vec{F}_A = -\vec{F}_B$$

Beim ersten und zweiten Axiom sehen wir: entscheidend dafür, ob ein Körper beschleunigt oder nicht, ist jeweils die resultierende Kraft (**also die Summe aller angreifenden Kräfte**). Es ist nicht wichtig, was für Kräfte und wieviele Kräfte an einem Körper angreifen. Das einzige was zählt, ist ihre Summe. Besonders einfach ist die Situation, wenn die Summe aller Kräfte null ist. Man spricht in diesem Fall vom "Kräftegleichgewicht".

Kräftegleichgewicht

Ist die resultierende Kraft null, so herrscht am Körper Kräftegleichgewicht.

HINWEIS: das Kräftegleichgewicht hat NICHTS mit dem 3. Newtonschen Axiom zu tun.

3.4.1 Masse und Trägheit, das erste Newton'sche Axiom

Newtons I. Axiom wird auch Trägheitssatz genannt. Was bedeutet "Trägheit"? Betrachten wir die folgenden zwei Situationen:

- Ein Mann balanciert ein Auto auf seinen Füßen.
- Ein Mann bringt ein stehengebliebenes Auto ins Rollen.

Beides braucht viel Kraft. Warum?



Das Auto hat eine grosse Masse. Deshalb wirkt eine grosse Gewichtskraft (= Schwerkraft) auf das Auto.

Schwere Masse



Das Auto hat eine grosse Masse. Deshalb braucht es eine grosse resultierende Kraft, um das Auto zu beschleunigen.

Träge Masse

Physiker unterscheiden zwischen schwerer und träger Masse.

Schwere Masse: Ursache für die Schwerkraft (= Gewichtskraft)

Alle Körper werden von der Gewichtskraft der Erde angezogen. Ursache für die Gewichtskraft ist die schwere Masse. Je grösser die schwere Masse eines Körpers ist, desto stärker wird dieser Körper von der Erde angezogen. Das heisst, ein Körper mit einer grossen schweren Masse hat eine grosse Gewichtskraft. Die Gewichtskraft ist zum Erdmittelpunkt gerichtet.

Die Schwere eines Körpers wird durch seine Masse m beschrieben, d.h. je grösser die Masse eines Körpers, desto grösser ist seine schwere Masse.
Die Einheit für die ‚Schwerheit‘ oder Masse ist schon bekannt: das Kilogramm.

Träge Masse Ursache für die Trägheit

Die Trägheit ist ein Mass für das Beharrungsvermögen eines Körpers. Die träge Masse eines Körpers widersetzt sich dem Versuch, die Geschwindigkeit des Körpers zu verändern. Je grösser die träge Masse, umso grösser muss die resultierende Kraft sein, um eine bestimmte Beschleunigung zu erreichen.

Die Trägheit eines Körpers wird durch seine Masse m beschrieben, d.h. je grösser die Masse eines Körpers, desto grösser ist seine Trägheit.
Die Einheit für die Trägheit ist also dieselbe wie für die Masse: das Kilogramm.

3.4.2 Das zweite Newton'sche Axiom

Beim ersten und zweiten Axiom sehen wir: entscheidend dafür, ob ein Körper beschleunigt oder nicht, ist jeweils die resultierende Kraft (also die Summe aller angreifenden Kräfte). Es ist nicht wichtig, was für Kräfte und wieviele Kräfte an einem Körper angreifen. Das einzige was zählt, ist ihre Summe. Besonders einfach ist die Situation, wenn die Summe aller Kräfte null ist. Man spricht in diesem Fall vom "Kräftegleichgewicht".

Wirkt eine resultierende Kraft \vec{F}_{res} auf einen Körper mit der Gesamtmasse m_{ges} , so beschleunigt sie ihn mit:

$$a = \frac{F_{res}}{m_{ges}} \quad \text{das heisst: } F_{res} = m_{ges} \cdot a \quad \text{Oder:} \quad \Sigma F = m_{ges} \cdot a$$

Hinweis I: bewegt sich ein Körper nicht ($v=0$ m/s) oder bewegt er sich mit einer konstanten Geschwindigkeit ($a = 0$ m/s²), dann ist natürlich auch $\Sigma F = m_{ges} \cdot a = 0$

Hinweis II: zur Abschätzung der berechneten Grössen: der Mensch kann ungefähr sein eigenes Gewicht stemmen

Hinweis III: 100 kg entsprechen 981 Newton

Aufgabe: Schätze die Nettokraft ab, die erforderlich ist, um (a) ein Auto mit einer Masse von 1000 kg auf $\frac{1}{2}g$, (b) einen Apfel (Masse 200g) mit derselben Beschleunigung zu beschleunigen. (giancoli p. 109)

Aufgabe: Welche konstante Nettokraft ist erforderlich, um ein Auto (Masse 1500 kg) von einer Geschwindigkeit von 100 km/h innerhalb von 55 m zum Stehen zu bringen? (giancoli p. 110)



3.4.3 Das dritte Newton'sche Axiom

Übt ein Körper A die Kraft \vec{F}_A auf einen Körper B aus (actio), dann übt der Körper B die Gegenkraft \vec{F}_B auf den Körper A aus (reactio). Dabei gilt:

$$\vec{F}_A = -\vec{F}_B$$

Hinweise:

- Es ist egal, welche Kraft man als actio und welche man als reactio bezeichnet.
- Actio und reactio greifen an verschiedenen Körpern an.
→ **"actio = reactio" ist also nicht dasselbe wie das Kräftegleichgewicht.**
- Zu jeder Kraft gibt es **immer** eine Gegenkraft. D.h. reactio **muss** sein.

Dagegen muss ein Kräftegleichgewicht an einem Körper nicht immer vorhanden sein. Das Kräftegleichgewicht **kann** sein.



Wenn deine Hand gegen die Kante eines Tisches drückt (der Kraftvektor ist in rot dargestellt), drückt auch der Tisch wieder gegen deine Hand (dieser Kraftvektor ist in violett dargestellt, um zu verdeutlichen, dass diese Kraft auf einen anderen Körper wirkt).



(a)



(b)

(a) Wenn eine Schlittschuhläuferin gegen die Bande drückt, drückt die Bande zurück und diese Kraft veranlasst die Läuferin, sich von der Bande weg zu bewegen. (b) Start einer Rakete. Das Triebwerk der Rakete stößt die Gase aus und die Gase üben eine gleich grosse und entgegengerichtete Kraft zurück auf die Rakete aus und beschleunigen sie auf diese Weise



Wir können vorwärts gehen, weil, wenn ein Fuss nach hinten gegen den Boden drückt, der Boden diesen Fuss nach vorn schiebt. Die beiden dargestellten Kräfte wirken auf **verschiedene** Körper.