

DER WEG ZUM PHYSIKALISCHEN KRAFTBEGRIFF VON ARISTOTELES BIS NEWTON

Das Wort Kraft verbindet man im Alltag häufig mit der Vorstellung einer Muskelanspannung (eine Kraft ausüben). Oft bezeichnet Kraft auch eine körperliche oder geistige Voraussetzung oder Eigenschaft zu bestimmten Handlungen (Muskel- beziehungsweise Geisteskraft. Kraft wird dabei auf Menschen als »Träger der Kraft« bezogen. Auch maschinell bereit gestellte Energie wird umgangssprachlich oft mit Kraft bezeichnet (»Kraftwerk«, »Kraftfahrzeug«).

Das griechische Wort für Kraft, δύναμις, lebt fort im Fachterminus Dynamik, was die Lehre von der Bewegung unter dem Einfluss von Kräften bezeichnet. In der physikalischen Fachsprache ist Kraft (beziehungsweise *force*) spätestens im 17. Jahrhundert gebräuchlich.

Die lange Zeit unscharfe und nach heutigem Verständnis zum Teil falsche Verwendung des Kraftbegriffs in der Physik geht größtenteils auf die Sichtweise von Aristoteles zurück. Demnach liegt jeder Bewegung eine wirkende Ursache, im heutigen Sprachgebrauch eine Kraft, zugrunde. Jede dadurch ausgelöste Bewegung endet automatisch, wenn die Kraft nicht mehr wirkt. Diese Kraft kann nur durch unmittelbaren Kontakt wirken und wird zudem mit der Geschwindigkeit des Körpers in eine Beziehung gebracht.

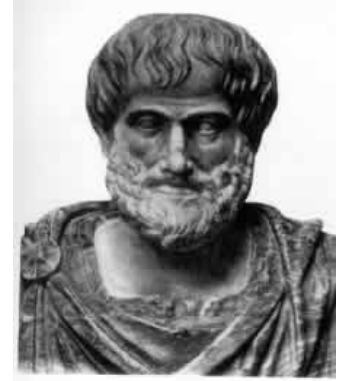
Im Mittelalter entstand aus der aristotelischen Lehre die Impetustheorie. Ihren Kern bildet die Idee einer »eingepägten Kraft«, dem *Impetus*, der einem Körper von einem »ersten Bewegter« mitgegeben wurde. Dieser im Körper befindliche *Impetus* erschlapft mit der Zeit, das wird durch den Widerstand des Mediums, zum Beispiel Luft, verstärkt. Auch hier endet jede Bewegung automatisch, wenn der Körper »keine Kraft mehr hat«. Im Gegensatz zu Aristoteles war kein externer Bewegter nötig. Die drängende Frage, auf welche Weise ein in die Luft geworfener Gegenstand in Bewegung gehalten wird, war damit scheinbar gelöst. Beibehalten wurde aber beispielsweise die Proportionalität von eingepägter Kraft und Geschwindigkeit.

Auch Galilei war in der aristotelischen Denkweise verwurzelt, kam aber dem Trägheitsgesetz schon sehr nahe. In diesem Gesetz drehten sich die Verhältnisse um, eine Kraft wurde nicht mehr zur Aufrechterhaltung einer Bewegung benötigt, nunmehr war zur Veränderung eines Bewegungszustandes eine Kraft nötig. Erst Newton beschrieb den Begriff Kraft in seinen 1687 veröffentlichten Bewegungsgesetzen in der Art, wie er heute noch verwendet wird. Bis weit ins 19. Jahrhundert benutzten Physiker das Wort Kraft jedoch auch in Bedeutungen, die nicht durch die newtonschen Gesetze gedeckt waren, insbesondere auch in der Bedeutung von Energie. Bis sich der moderne Energiebegriff herausgebildet hatte, wurde beispielsweise die kinetische Energie mit dem von Leibniz geprägten und im neunzehnten Jahrhundert noch von Helmholtz verwendeten Ausdruck der »lebendigen Kraft« (*vis viva*) bezeichnet.

Kraft wird heute dynamisch als Ursache der zeitlichen Änderung des Bewegungszustands eines Körpers definiert. Vor dieser auf Newton zurückgehenden Festlegung lagen viele Jahrhunderte, in denen andere Kraftkonzepte verfolgt wurden. Newton vollzog den entscheidenden Schritt, Kraft nicht mehr, wie bei Aristoteles oder in der Impetustheorie, zur Erklärung der Bewegung selbst einzuführen, sondern zur Beschreibung der **Änderung** eines Bewegungszustands. Aber auch nach Veröffentlichung der 'Principia' mit den drei berühmten Axiomen von Newton im Jahre 1687 dauerte es bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts, bis sich in der Physikergemeinschaft eine bewusste, klare Trennung zwischen den Konzepten Kraft und Energie etabliert hatte. Interessant ist die historische Genese des Zusammenhangs von Kraft und Bewegung auch durch die Parallelität mancher Schülervorstellungen zur Mechanik mit historischen Denkweisen. Die Ideengeschichte des Kraftkonzepts kann das Verständnis von Lernschwierigkeiten fördern, die in der Mechanik bekanntermaßen groß sind.

Die Bewegungslehre des Aristoteles

Aristoteles (384 bis 322 v.Chr.) teilt irdische Bewegungen in zwei Klassen ein: in "natürliche" und "erzwungene". Im geordneten Universum des Aristoteles hat jeder Körper die innere Tendenz, sich in natürlicher Bewegung dem ihm zukommenden Ort zu nähern: Das Leichte strebt nach oben, das Schwere nach unten. Aus diesem Grunde steigen Luftblasen im Wasser nach oben und fällt ein Stein zu Boden. Im Gegensatz zu den natürlichen Bewegungen erfordern erzwungene Bewegungen einen aktiven äußeren Beweger, bzw. eine ständig wirkende Kraft. Nur dadurch kann sich ein Körper von seinem natürlichen Ort entfernen oder von einer natürlichen Bewegung abweichen. Der Begriff "Kraft" bezeichnet in zwei miteinander verwobenen Bedeutungen eine Bewegungsfähigkeit, die vom speziellen Beweger abstrahiert ist. Zum einen ist Kraft das Vermögen, einen Körper in einer bestimmten Zeit über eine Strecke zu bewegen (Arbeits-/Leistungsfähigkeit gegen Reibungskräfte); zum anderen benennt Kraft die Fähigkeit, einen Körper aus dem "natürlichen" Ruhestand in Bewegung zu setzen (Kompensation der Haftreibungskraft). Das aristotelische Kraftkonzept ist in Alltagssituationen gut anwendbar. Bei Bewegung unter dem Einfluss starker Reibungskräfte liegt seine Verwendung näher als die des newtonschen Konzepts. Viele Schülervorstellungen entsprechen einer aristotelischen Sichtweise:



- Ein Körper bewegt sich nur bei ständiger Krafteinwirkung.
- Je größer die Kraft, desto größer die Geschwindigkeit.
- Kraft bedeutet Bewegungs- oder Wirkungsvermögen.
- Ruhe und Bewegung sind wesensmäßig zu unterscheidende Zustände.

Die Schriften des Aristoteles beherrschten nach ihrer Wiederentdeckung im 12. Jahrhundert das scholastische Denken bis hin zur kopernikanisch-galileischen Wende. In arge Probleme geriet die aristotelische Bewegungslehre bei der Erklärung der Wurfbewegung. Das Prinzip "Alles Bewegte wird von etwas bewegt" musste auch gelten, wenn der Stein die Hand des Werfers verlassen hat. Als Beweger kam nur das Medium, die Luft, in Frage. Wodurch aber wird wiederum die Luft bewegt? Die Wurfbewegung wurde zu einem zentralen Problem der antiken und mittelalterlichen Mechanik. Einen wesentlichen Erkenntnisfortschritt brachte die Impetustheorie.

Die Impetustheorie - Das Prinzip der eingprägten Kraft

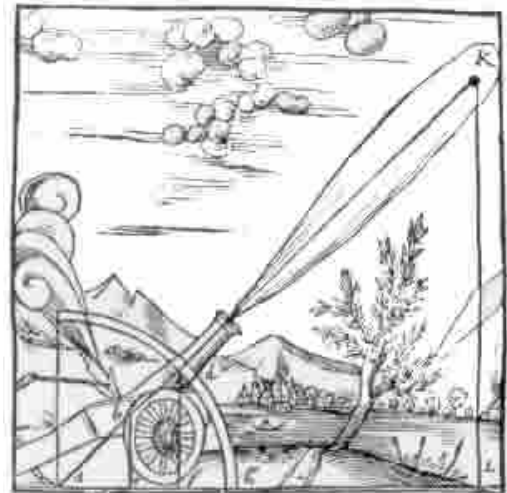
Unter dem Begriff Impetustheorie wird eine Gruppe von Bewegungslehren zusammengefasst, die im 13. und 14. Jahrhundert als Kritik an Aristoteles bedeutsam wurden. Ihren gemeinsamen Kern kann man in fünf Aussagen zusammenfassen:

- Ein Körper bewegt sich aufgrund einer ihm "eingprägten Kraft", dem Impetus.
- Diese Kraft wurde auf den Körper beim Vorgang des In-Bewegung-Setzens von einem ersten Beweger übertragen oder durch Kontakt (Stoß) von einem anderen bewegten Körper übermittelt.
- Ein Körper kann um so mehr Impetus aufnehmen, je schwerer er ist.
- Die Bewegungsstärke (Wucht) eines Körpers ist dem Impetus proportional.
- Der im Körper befindliche Impetus erschlapft mit der Zeit. Dies geschieht entweder von allein, oder es wird durch den Widerstand des Mediums bewirkt, bzw. verstärkt.

Dies ist gleichzeitig eine gute Beschreibung weit verbreiteter Schülervorstellungen. Der große Fortschritt gegenüber Aristoteles bestand im Fortfall des externen Bewegers. Durch den Übergang der Kraft auf den bewegten, bzw. "sich bewegenden" Körper wurde es möglich, das Medium als Widerstand gegen eine Bewegung zu betrachten. Der Widerstand wurde jedoch nicht als äußere Kraft konzeptualisiert, denn auch die Impetustheoretiker sahen in der Kraft noch die Ursache der Bewegung selbst, nicht der Bewegungsänderung. Die Impetustheorie brach nicht vollständig mit der aristotelischen Bewegungslehre. Beibehalten wurde die Proportionalität von (eingepprägter) Kraft und Geschwindigkeit. Es blieb offen, ob das Erschlaffen des Impetus durch das Medium bewirkt oder nur verstärkt wird. Die Existenz des Vakuums wurde kaum in Erwägung gezogen. Der Trägheitssatz lag noch in weiter Ferne. Seiner Entwicklung stand die Fesselung des Denkens durch die unmittelbare, augenscheinliche Erfahrung im Wege.

Ein Text zur Impetustheorie von Johannes Buridan (1295 – 1366)

Wir müssen schließen, dass ein Beweger, wenn er einen Körper bewegt, diesem einen bestimmten Impetus aufdrückt, eine bestimmte Kraft, die diesen Körper in der Richtung weiterzubewegen vermag, die ihm der Beweger gegeben hat, sei es nach oben, nach unten, seitwärts oder im Kreis. Der mitgeteilte Impetus ist in dem gleichen Maße kraftvoller, je größer der Aufwand an Kraft ist, mit dem der Beweger dem Körper Geschwindigkeit verleiht. Durch diesen Impetus wird der Stein weiterbewegt, nachdem der Werfer aufgehört hat, ihn zu bewegen. Aber wegen des Widerstandes der Luft und auch der Schwerkraft des Steins, die ihn ständig in eine dem Streben des Impetus entgegengesetzte Richtung zwingen möchte, wird der Impetus immer schwächer. Darum muss die Bewegung des Steins allmählich immer langsamer werden. Schließlich ist der Impetus so weit geschwächt oder vernichtet, dass die Schwerkraft des Steins überwiegt und den Stein abwärts zu seinem natürlichen Ort bewegt.



Galilei: Wegbereiter einer neuen Weise der Naturbe-trachtung

Die an den Namen Galilei und Newton festzumachende Wende des physikalischen Denkens besteht in der Annahme, die eigentliche Ordnung der Dinge erschließe sich erst durch die gedankliche Konstruktion prototypischer, reiner Phänomene, die in der Anfass- und Vorzeigerealität nicht unmittelbar vorfindbar sind. Man kann die newtonsche Dynamik nicht verstehen, ohne diesen grundlegenden Wandel mitzuvollziehen. Hier liegen verborgene Ursachen vieler Lernschwierigkeiten von Schülern. Das Problem lässt sich an einem Aristoteles-Zitat verdeutlichen. Aristoteles begründet darin seine Ablehnung der Existenz des leeren Raumes anhand der "absurden" Bewegungsformen, die Körper im Vakuum erfahren müssten:

"Niemand wäre in der Lage, einen Grund anzugeben, weshalb dasjenige, das in Bewegung gesetzt worden ist, irgendwo einmal stehen bleiben sollte. Denn wieso sollte dies eher hier als dort geschehen? Also wird (im Vakuum) alles entweder immer in Ruhe bleiben oder notwendigerweise ins Unbegrenzte weiterbewegt werden."



Diese Schlussfolgerung stimmt mit dem Trägheitssatz überein. Aristoteles dient sie jedoch als Beweis für die Unsinnigkeit, von der Existenz des Vakuums auszugehen, denn die unmittelbare Erfahrung lehrt, dass alle Bewegungen zur Ruhe kommen. Galilei (1564 bis 1642) konstruiert im Gegensatz dazu seine Gedankenexperimente unter idealen, nirgendwo in Vollkommenheit realisierbaren Randbedingungen. Wir illustrieren die Methode an Überlegungen, die Galilei zu einer Vorstufe des Trägheitssatzes führten: "Wir müssen die Annahme machen, dass die Ebene sozusagen immateriell ist, oder zumindest sehr sorgfältig geglättet und absolut fest.. Und der in Bewegung befindliche Körper muss absolut glatt sein, von einer Gestalt, die der Bewegung keinen Widerstand entgegengesetzt, z.B. von perfekter Kugelgestalt, und er muss aus dem härtesten Material bestehen oder sonst aus einer Flüssigkeit wie Wasser. Wenn alle diese Vorkehrungen getroffen sind, dann wird jeder Körper auf einer Ebene, die parallel zum Horizont verläuft, von der kleinsten Kraft bewegt werden, ja von einer Kraft, die geringer ist als jegliche gegebene Kraft. "

Im Dialog über die Weltsysteme benutzt Galilei diesen Gedankengang um zu beweisen, dass ein Stein der von der Mastspitze eines fahrenden Schiffes fällt, am Mastfuß aufkommt und nicht etwa am Heck, obwohl keine bewegende Kraft auf ihn einwirkt.

Newton: Die Grundsätze oder Gesetze der Bewegung

In der berühmten Schrift "Principia" lautet der *Trägheitssatz*

Jeder Körper beharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.



Eine von jeglichen Einzelkräften freie Bewegung kann nur ein gedanklicher Entwurf sein – dennoch ist sie Ausgangspunkt der newtonschen Dynamik. Der newtonsche Kraftbegriff beruht auf dem Entschluss, alle Einwirkungen auf einen Körper, die zu Änderungen seines Bewegungszustands führen, als Kräfte zu konzeptionalisieren, auch die bisher als ‚Widerstände‘ ausgeblendeten hemmenden Einflüsse eines Mediums.

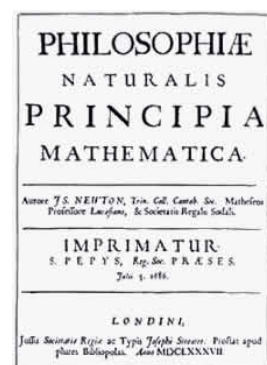
Die newtonsche Kraft beschreibt die Intensität und Richtung der Wechselwirkung zweier Körper. Kraft ist keine Eigenschaft eines Körpers, sie ist im Gegensatz zum Impetus weder speicher- noch übertragbar.

Newton arbeitet mit geometrischen Darstellungen der Grenzwerte von Strecken- und Flächenverhältnissen. Man findet in den ‚Principia‘ Gleichungen des Typs " $F = m \cdot a$ " nicht. Wie folgt formuliert Newton dortdas

2. Newton'sche Gesetz (das Newton'sche Bewegungsgesetz)

Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.

"Einwirkung der bewegenden Kraft" verweist auf die zeitliche Dauer der Impulsänderung. In Formelschreibweise lautet die angemessene Fassung $\Delta p \sim F \cdot \Delta t$ (die Formel $F = m \cdot a$ stammt von Euler). Die Verwendung des Wortes "Kraft" ist in den ‚Principia‘ jedoch nicht eindeutig. Kraft ist wohl nicht als Wechselwirkungsintensität zu deuten, sonder als Kraftstoß $F \cdot \Delta t$, der einen Zusatzimpuls Δp bewirkt.



Auch das 3. Axiom ist einer näheren Betrachtung wert:

Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper aufeinander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.

Es ist nicht sinnvoll, das 3. Gesetz auf die Kurzformel "actio gleich reactio" zu bringen. "Actio" und "reactio" legen eine zeitliche Abfolge von Ursache und verzögerter Wirkung nahe, während in den Erläuterungen zum 3. Axiom gerade die Gleichzeitigkeit hervorgehoben wird. "Actio" und "reactio" implizieren außerdem eine Wertung von aktiver Ursache und passiver Folge, die nahe legt, in der Gegenwirkung nur eine Art "passiven Widerstand" zu sehen und keine Kraft, die "aktiv" am Wechselwirkungspartner angreift.

Quelle: http://www.leifiphysik.de/web_ph11/lesestoff/02_bewegung/bew.htm

DER KRAFTBEGRIFF UND DIE NEWTON'SCHEN AXIOME

Während im vorangehenden Text die historische Entwicklung des Kraftbegriffs im Focus stand, steht in der nachfolgenden Ausarbeitung der heute in der Physik verwendete Newton'sche Kraftbegriff im Mittelpunkt.

1. WOZU WIRD DER KRAFTBEGRIFF IN DER PHYSIK VERWENDET?

Die klassische Mechanik untersucht das Verhalten von Körpern:

- Bewegungsverhalten und
- Formänderungen

Dabei bearbeitet sie

sog. **Wie-Fragen** (Wie bewegt sich ein Körper? Z.B. geradlinig und mit konstanter Geschwindigkeit oder mit konstanter Beschleunigung, kreisförmig mit konstantem Bahngeschwindigkeitsbetrag in einer Ebene, ...)

und sog. **Warum-Fragen** (Warum bewegt sich ein Körper gerade so wie wir es beobachten? Z.B. warum bewegt sich ein frei fallender Körper gerade geradlinig und mit konstanter Beschleunigung?).

Die Frage, warum ein Körper gerade die Bewegung ausführt, die wir beobachten (also z.B. warum ein Stein geradlinig und beschleunigt zu Boden fällt oder warum die Erde um die Sonne kreist) ist in der Physik eine ganz alte und grundlegende.

Wenn man laienhaft denkt, könnte man fragen: Warum bewegt sich ein Körper?

Bei genauerem Hinsehen stellt man fest, dass diese Frage zu ungenau gestellt ist. Sie muß präziser gestellt werden. Nämlich: Warum bewegt sich ein Körper so wie er sich bewegt (also z.B. mit konstanter Geschwindigkeit oder beschleunigt)?

Newton erkannte, dass die geradlinige Bewegung eines Körpers mit konstanter Geschwindigkeit ein natürlicher Zustand ist und dass sich der Bewegungszustand eines Körpers nur ändert, wenn es eine Wechselwirkung dieses Körpers mit einem anderen Körper seiner Umgebung gibt (z.B. Stoß zweier Billiardkugeln oder eine Billiardkugel mit der Bande).

Auch die Form eines Körpers ändert sich nur bei Wechselwirkung mit anderen Körpern.

In der **Physik** wird der **Kraftbegriff nur zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Körpern** verwendet.

Damit ist unterscheidet sich der in der Physik verwendete Kraftbegriff deutlich von dem, was man in der Alltagssprache unter Kraft versteht. Dort wird die Kraft oft als eine Körpereigenschaft angesehen (z.B. ein Mensch oder ein Fahrzeug hat viel Kraft).

Wenn die Physik den Kraftbegriff als ein Konzept zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen zwei Körpern verwendet ist auch klar, dass ein einzelner Körper kann ganz allein aus sich heraus weder eine Kraft ausüben, noch eine Kraftwirkung erfahren.

Wenn man dennoch oft von der **“Kraft, die auf einen Körper wirkt“** (z.B. der Gewichtskraft auf einen fallenden Körper)spricht, dann tut man dies deshalb, weil man **nur an einem Wechselwirkungspartner interessiert** ist und den Wechselwirkungspartner nicht in den Blick nimmt.

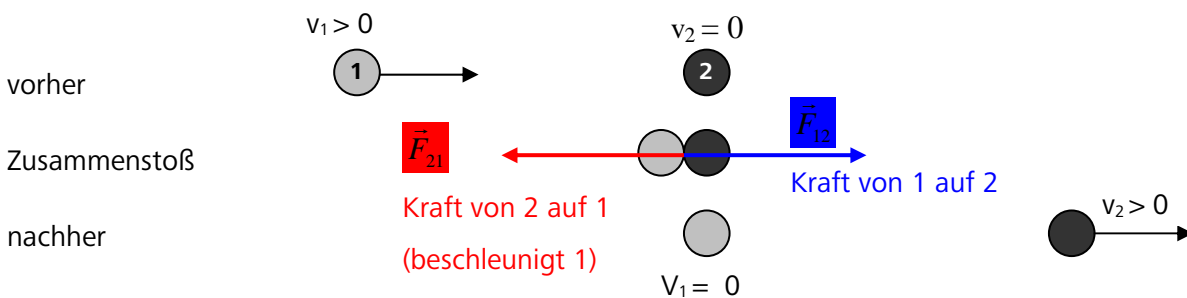
2. FESTLEGUNG DES KRAFTBEGRIFFS IN DER PHYSIK (SCHULGEMÄßE DARSTELLUNG)

Physiker sprechen von einer an einem Körper angreifenden Kraft,

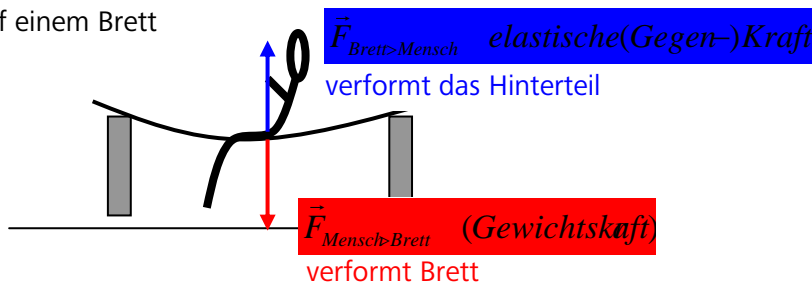
- wenn dieser Körper seinen Bewegungszustand ändert, d.h. wenn er beschleunigt, also schneller/langsamer wird oder seine Bewegungsrichtung ändert
Kraft als die Ursache für eine Bewegungszustandsänderung (dynamischer Kraftbegriff)
- oder wenn dieser Körper verformt wird.
Kraft als die Ursache für die Verformung eines Körpers (statischer Kraftbegriff).

Dabei ist die Kraft auf einen Körper immer von der Wechselwirkung mit einem Körper seiner Umgebung verbunden.

z.B. Zusammenstoß zweier Kugeln



z.B. Sitzen auf einem Brett



Die Wechselwirkung zwischen zwei Körpern ist manchmal offensichtlich:

- beim Anschieben mit Muskelkraft
- bei der Verformung bei einem Zusammenstoß
- ...

Oft kann die Wechselwirkung zwischen zwei Körpern nicht direkt sinnlich wahrgenommen werden:

- ein Magnet zieht Eisen an
- Anziehung / Abstoßung el. geladener Körper

- Massenanziehung (immer da)
- bewegungshemmende Kräfte (z.B. Reibungskräfte; auch immer da)
- elastische (Gegen-)Kräfte (z.B. wenn ein Körper mit der Gewichtskraft auf den Tisch drückt, wirkt auch der Tisch mit der betragsmäßig gleichen Kraft auf den Körper)

Entscheidend:

Jede Wirkung von einem Körper auf einen anderen Körper ist verknüpft mit einer gleichzeitigen Wirkung des anderen Körpers auf den einen (**Wechselwirkungsgesetz**): z.B.

- Ziehen am Gummi → Gummi zieht zurück
- Schieben an einem Wagen → Widerstand spürbar
- An die Wand drücken → Gegenkraft spürbar
- ...

Das heißt: **Ein einzelner Körper kann ganz allein aus sich heraus weder eine Kraft ausüben, noch eine Kraftwirkung erfahren.**

Oft ist man **nur an einem Wechselwirkungspartner interessiert** und rückt diesen ins Blickfeld. Man spricht dann von der "Kraft, die auf einen Körper wirkt" (z.B. der Gewichtskraft auf einen fallenden Körper).

3. DER TRÄGHEITSSATZ (1. AXIOM VON NEWTON)

Wirkt keine äußere Kraft auf einen Körper, oder befinden sich die an einem Körper angreifenden Kräfte im Gleichgewicht, so bleibt dieser entweder in Ruhe oder er bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit.

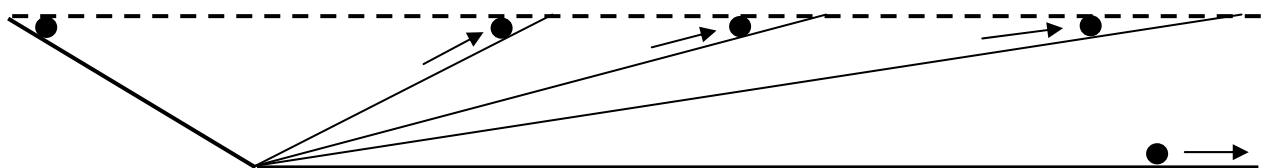
Newton formulierte das so: „Die Trägheit der Materie bewirkt, dass jeder Körper von seinem Zustand der Ruhe oder der Bewegung nur schwer abgebracht werden kann.“

REALVERSUCH



Könnte die Kugel reibungsfrei über der Unterlage schweben, würde sie sich unendlich weit bewegen.

GEDANKENVERSUCH VON GALILEI

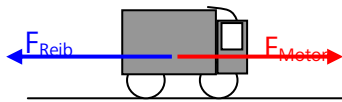


Grenzfall: Völlig waagrechte Ebene → Kugel bleibt in gleichförmiger Bewegung

Die Einsicht in die Konsequenzen des Trägheitssatzes bereitet oft Schwierigkeiten. Im Alltag sind wir nämlich gewohnt, dass wenn sich etwas ändert (hier der Ort) eine Ursache für diese Änderung anzunehmen. Die Vorstellung, dass ein Körper seinen Ort ohne erkennbare Ursache ändern kann, erscheint daher dem Alltagsdenken fremd. Der Erfolg der Mechanik rechtfertigt es jedoch, nicht den Ort, sondern die Geschwindigkeit als das anzusehen, was sich ohne äußeren Einfluß nicht ändert. Das bedeutet, die geradlinige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit ist ein natürlicher Zustand, der keiner äußeren Einwirkung bedarf. Die Ruhe ist nur ein Spezialfall davon ($v=0$). Das ist für den gesunden Menschenverstand ein absurder Gedanke, weil er der alltäglichen Erfahrung widerspricht.

Welche Konsequenzen hat der Trägheitssatz für die klassische Physik? (Zusammenfassung)

- Ein Körper kann durch seine Bewegung charakterisiert werden.
- Wenn ein Körper völlig unbeeinflusst ist und bleibt, verharrt er in Ruhe oder in gleichförmiger Bewegung (geradlinig und $v = \text{konst.}$)
- Wenn er sich beschleunigt bewegt, muß eine Kraft auf ihn wirken.
- Solange eine resultierende Kraft auf ihn wirkt, wird er beschleunigt, das heißt der Körper ändert seine Geschwindigkeit.



$$F_{\text{Motor}} > F_{\text{Reib}} \rightarrow v \text{ wird größer}$$

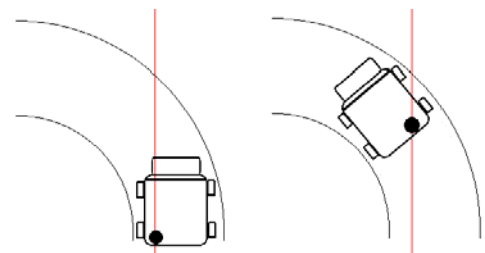
$$F_{\text{Motor}} = F_{\text{Reib}} \rightarrow v \text{ bleibt gleich}$$

$$F_{\text{Motor}} < F_{\text{Reib}} \rightarrow v \text{ wird kleiner}$$

- Die Trägheit ist eine universelle Eigenschaft von Körpern.

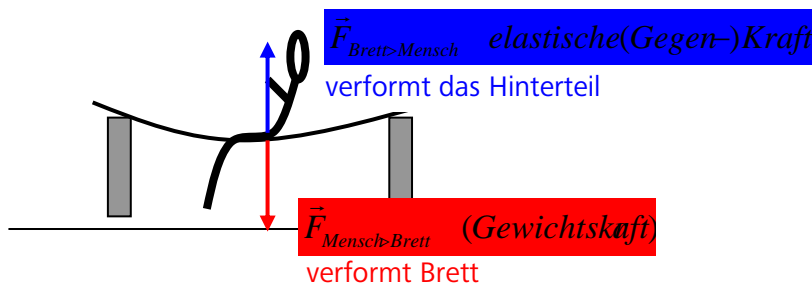
Auswirkungen der Trägheit von Körpern bei zweidimensionalen Bewegungen

Die Abbildung zeigt ein beladenes Fahrzeug, das eine Kurve fährt. Die Haftkraft von der Unterlage auf die Reifen bewirkt die Richtungsänderung der Fahrzeuggeschwindigkeit. Auf die Ladung wirkt dagegen keine Kraft. Deshalb behält sie ihre Geschwindigkeit bei und bewegt sich geradeaus weiter. Das Fahrzeug fährt praktisch unter der Ladung weg. Hätte die Ladefläche keine Bordwand (sodass dann, wenn die Ladung sich in der rechten hinteren Ecke befindet eine beschleunigende Kraft auf sie wirkt), würde die Ladung verloren gehen, da sie sich gerade aus weiter bewegt, während das Fahrzeug eine Kurve fährt.



4. WECHSELWIRKUNGSGESETZ (3. NEWTONSCHES AXIOM) UND KRÄFTEGLEICHGEWICHT AUSEINANDER HALTEN!

Betrachten wir noch einmal einen auf einem Brett sitzenden Menschen und betrachten die Kräfte, die Mensch und Brett wechselseitig aufeinander ausüben:



Es ist aus dem Bild offensichtlich, dass nicht nur der Mensch mit „seinem Gewicht“ auf das Brett eine Kraft auswirkt, sondern umgekehrt auch das Brett mit einer elastischen Kraft auf den Menschen wirkt.

Newton erkannte diesen Sachverhalt und formulierte ihn im **Wechselwirkungsgesetz**:
Jede Wirkung von einem Körper auf einen anderen Körper ist verknüpft mit einer gleichzeitigen Wirkung des anderen Körpers auf den einen. Die beiden Kräfte haben den gleichen Betrag und sind entgegengesetzt gerichtet.

Die Situation kann man aber auch anders anschauen, indem man nur die auf den Menschen wirkenden Kräfte in den Blick nimmt. Auf den Menschen wirken zwei Kräfte:

- (i) Die Erdanziehungskraft
- (ii) Die elastische Kraft des Brettes.

Sind beide vom Betrag her gleich groß, so wirkt keine resultierende Kraft auf den Menschen. Man sagt dann, es herrscht **Kräftegleichgewicht**.

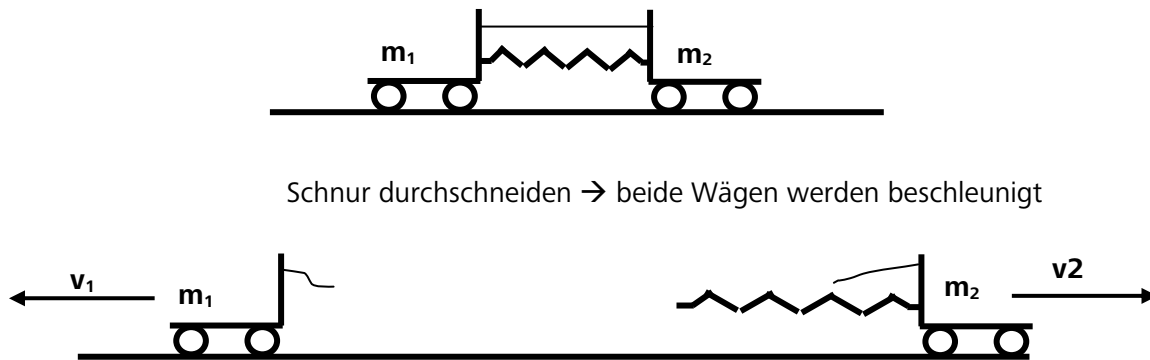
5. DIE TRÄGE MASSE EINES KÖRPERS

Die Trägheit ist eine universelle Eigenschaft von Körpern. Das Maß für die Trägheit eines Körpers ist seine **träge Masse**.

Frage: Wie groß ist die träge Masse eines Körpers?

Qualitativ ist folgende Festlegung sinnvoll: Derjenige Körper, der durch dieselbe Kraft in der gleichen Zeit auf eine größere Geschwindigkeit beschleunigt wird, hat die kleinere träge Masse.

Das Verhältnis der trägen Massen zweier Körper lässt sich z.B. mit folgendem Experiment bestimmen:



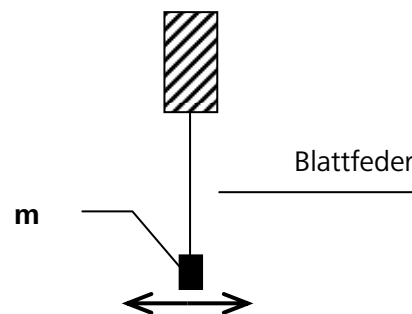
$$v_1 = v_2 \leftrightarrow m_1 = m_2 \text{ (Gleichheit träger Masse)}$$

$$|v_1| < |v_2| \leftrightarrow m_1/m_2 = v_2/v_1 \text{ (Vielfachheit)}$$

Einheit der trägen Masse: 1 kg

Ein anderes Gerät zum Vergleich träger Massen ist das abgebildete schwingungsfähige System:

Je größer m_t , desto kleiner ist die Eigenfrequenz mit der der Oszillator schwingt.



6. DER IMPULS EINES KÖRPERS ALS MAß FÜR SEINE BEWEGUNGSGRÖßE

In der Physik hat es sich als vorteilhaft erwiesen (die Gründe dafür sollen hier nicht näher erläutert werden), neben der Geschwindigkeit eines Körpers als Maß für den Bewegungszustand auch noch ein Maß für seine sog. Bewegungsgröße einzuführen, nämlich das Produkt aus seiner trägen Masse und seiner Geschwindigkeit. Dieses Produkt wird **Impuls \vec{p}** genannt: $\vec{p} := m \cdot \vec{v}$

Der Impuls eines Körpers ist ein Vektor, der dieselbe Richtung hat, wie seine Geschwindigkeit.

Die Wortwahl Impuls für dieses Produkt ist recht einleuchtend. Schreiben wird doch auch in unserer Alltagsvorstellung einem Körper mit großer Masse und großer Geschwindigkeit etwas großes – eben einen großen Impuls – zu.

$$\text{Einheit des Impulses: } [p] = \text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Mit Hilfe des Impulsbegriffs lässt sich der Trägheitssatz folgendermaßen formulieren:

Wirkt keine äußere Kraft auf einen Körper, oder befinden sich die an einem Körper angreifenden Kräfte im Gleichgewicht, so bleibt der Impuls des Teilchens konstant.

7. DAS KRAFTGESETZ (2. AXIOM VON NEWTON)

Als Konsequenz aus dem Trägheitssatz ergibt sich: Wenn wir eine Geschwindigkeitsänderung (=Beschleunigung) und mithin eine Impulsänderung eines Körpers beobachten, dann hat eine Wechselwirkung mit einem anderen Körper und damit eine Kraftwirkung auf den beschleunigten Körper stattgefunden hat. Dabei ändert sich der Impuls so lange, solange eine resultierende äußere Kraft auf den Körper wirkt.

Es ist plausibel, dass die **Impulsänderung umso größer** ist,

- **je größer die wirkende Kraft** und
- **je länger die Kraftwirkung dauert.**

Das legt folgende Festlegung nahe:

Das Produkt aus Kraft und Zeitdauer, die die Kraft wirkt, ist gleich der Impulsänderung des Körpers:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = \Delta \vec{p}$$

Das Produkt $\vec{F} \cdot \Delta t$ wird auch mit **Kraftstoß** bezeichnet.

Anders dargestellt ergibt sich:
$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

In Worten: **Die resultierende Kraft auf einen Körper entspricht gleich der zeitlichen Änderung seines Impulses.**

Diesen Zusammenhang bezeichnet man als **3. Axiom von Newton**.

Mit Hilfe einer Umformung kann dieser Zusammenhang auch anders geschrieben werden:

Mit $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ ergibt sich für einen Körper, dessen Masse konstant bleibt:

$$\vec{F} = \frac{\Delta(m \cdot \vec{v})}{\Delta t} = \frac{m \cdot \Delta \vec{v}}{\Delta t} = m \cdot \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = m \cdot \vec{a}$$

also:
$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad \text{oder} \quad \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

In dieser Form wird das 3. Newtonsche Axiom oft auch als **Kraftgesetz** bezeichnet.

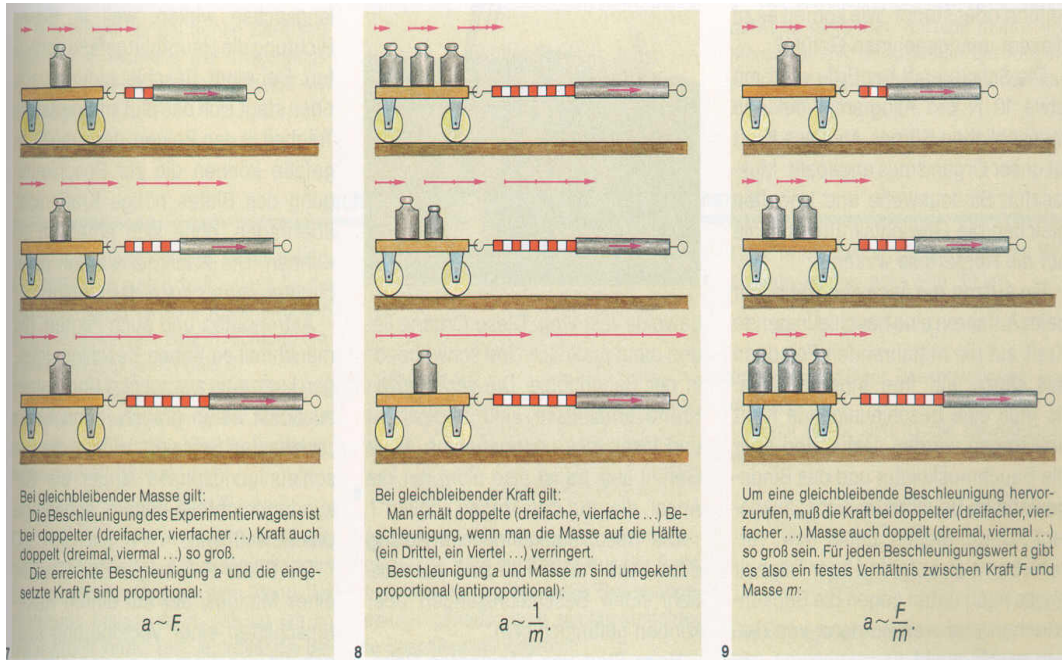
Bei genauem Hinschauen erkennt man, dass sich der Trägheitssatz aus dem Kraftgesetz folgern lässt. Denn wenn $F=0$, dann ist auch $a=0$ und somit $v=\text{konst.}$.

Das Kraftgesetz lässt sich auch experimentell bestätigen oder gewinnen:

Alltagserfahrungen:

- Je mehr Menschen ein Auto anschieben, d.h. je größer die auf das Auto wirkende Kraft ist, desto stärker wird es beschleunigt.
- Das Anschieben geht dabei umso leichter, je kleiner die Masse des Autos ist.

Genauere Messungen liefern folgende Ergebnisse:



Die Beschleunigung eines Körpers ist proportional zu dem Quotienten **aus der beschleunigenden Kraft F und der Masse m des Körpers**: $a \sim \frac{F}{m} \Rightarrow F \sim m \cdot a \Rightarrow F = k \cdot m \cdot a$

Mit der Festlegung $k=1$ erhält man:

$$F = m \cdot a$$

Kraft = Masse * Beschleunigung

Aus dem Kraftgesetz ergibt sich die **Einheit der Kraft**: $[F] = kg \cdot \frac{m}{s^2} = 1 \text{ Newton} = 1 N$

Die Rechnung $a = \frac{1N}{1kg} = \frac{1kg \frac{m}{s^2}}{kg} = 1 \frac{m}{s^2}$ zeigt, dass 1N gerade diejenige Kraft ist, die einem Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung $1ms^{-2}$ erteilt. D.h. die z.B. einen Körper der Masse 1kg in einer Sekunde aus der Ruhe auf die Geschwindigkeit 1m/s bringt.

Zusammenfassung

- Die resultierende Kraft, die an einem Körper angreift ist direkt proportional zu seiner Beschleunigung.
- Wenn die resultierende Kraft auf einen Körper nicht gleich Null ist, erfährt er eine Beschleunigung. Diese hängt bei gegebener Kraft von der trägen Masse des Körpers ab.
- Die Beschleunigung eines Körpers ist direkt proportional zur Kraft und hat dieselbe Richtung.
Vorsicht: Die Richtung der Kraft stimmt in der Regel nicht mit der Richtung der Geschwindigkeit überein!
- Eine an einem Körper auftretende Beschleunigung erfordert die Einwirkung einer resultierenden Kraft. Diese ist gleich dem Produkt aus der trägen Masse und der Beschleunigung des Körpers.
- Die Beschleunigung, die mit einer oder mehreren an einem Körper angreifenden Kräften verknüpft ist, ist proportional zum Betrag der Resultierenden Kraft.
Sie ist außerdem umgekehrt proportional zur trägen Masse des Körpers.
- Die träge Masse erscheint als Proportionalitätsfaktor zwischen Kraft und Beschleunigung. Das kann man so interpretieren, dass sie eine Maß für den Widerstand des Körpers gegen Änderung seines Bewegungszustandes darstellt.