

1 Werkstoffe der Elektrotechnik

Werden Naturstoffe, z.B. Erze, Kohle und Erdöl, gewonnen und aufbereitet, erhält man **Rohstoffe**.

Durch Weiterverarbeitung der Rohstoffe, z.B. bei der Eisengewinnung im Hochofen aus Eisenerz, entstehen die **Werkstoffe** als Produkte, aus denen man durch Be- und Verarbeitung Fertig- oder Halbfertigerzeugnisse herstellt.

Ein Stoff wird als Werkstoff verwendet, wenn er technisch verwertbare Eigenschaften zur Nutzbarmachung besitzt.

Die Werkstoffkunde basiert auf Grundlagen der Festkörperphysik, der Chemie und der Elektrochemie. Ihre Aufgaben zeigt **Bild 1**. Die Werkstoffe der Elektrotechnik werden, wie in **Bild 2** gezeigt, nach ihrer Verwendung eingeteilt:

Konstruktionswerkstoffe (ab Seite 60) sind Werkstoffe für Bauelemente und Bauteile, z.B. Baugruppenträger, Antennenmasten und Gehäuse. Sie übertragen vor allem mechanische Kräfte und erfüllen eine Schutzfunktion.

Hilfsstoffe (ab Seite 132), z.B. Lote und Flussmittel, Öle, Brenngase und Klebstoffe, werden zur Herstellung von Fertigprodukten benötigt.

Leiterwerkstoffe (ab Seite 141), z.B. Kupfer und Aluminium, dienen dem Transport des elektrischen Stromes. Die elektrische Leitfähigkeit ist die wichtigste Eigenschaft dieser Metalle. Je besser ein Werkstoff elektrischen Strom leiten kann, desto kleiner ist sein spezifischer elektrischer Widerstand (**Bild 3**).

Kontaktwerkstoffe (ab Seite 150), z.B. Silber, Wolfram und Gold, verwendet man für elektrische Kontakte.

Widerstandswerkstoffe (ab Seite 161), z.B. Konstantan, hemmen gezielt den elektrischen Stromfluss.

Isolierstoffe (ab Seite 171), z.B. Porzellan, sind nichtleitende Werkstoffe. Sie verhindern das Fließen eines elektrischen Stromes.

Halbleiterwerkstoffe (ab Seite 192), z.B. Silicium, sind Werkstoffe, deren elektrische Leitfähigkeit mit zunehmender Temperatur steigt.

Magnetwerkstoffe (ab Seite 236), z.B. Legierungen aus Eisen, Cobalt und Nickel, sind Werkstoffe, die magnetisiert werden können.

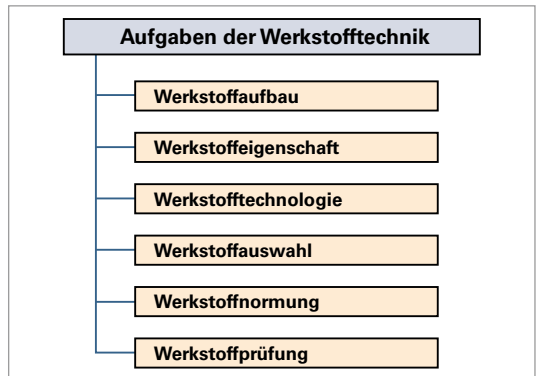


Bild 1: Aufgaben der Werkstoffkunde

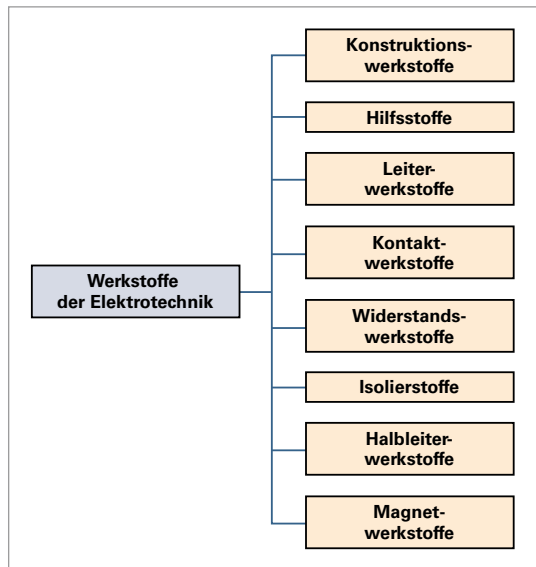


Bild 2: Werkstoffe der Elektrotechnik

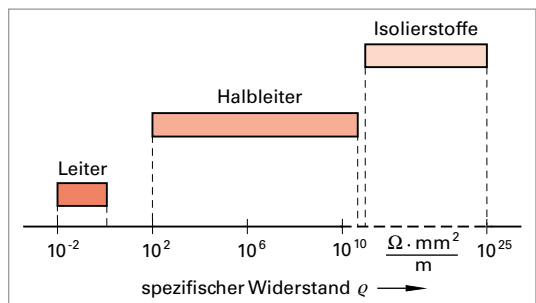


Bild 3: Spezifischer elektrischer Widerstand der Werkstoffe

Die Werkstoffe lassen sich nach Stoffgruppen in Metalle, Nichtmetalle, Halbleiterwerkstoffe und Verbundwerkstoffe unterteilen. Kombiniert man die Einteilung nach Stoffart und Verwendung, so erhält man eine Gesamtübersicht über die Werkstoffe der Elektrotechnik (**Bild 1**).

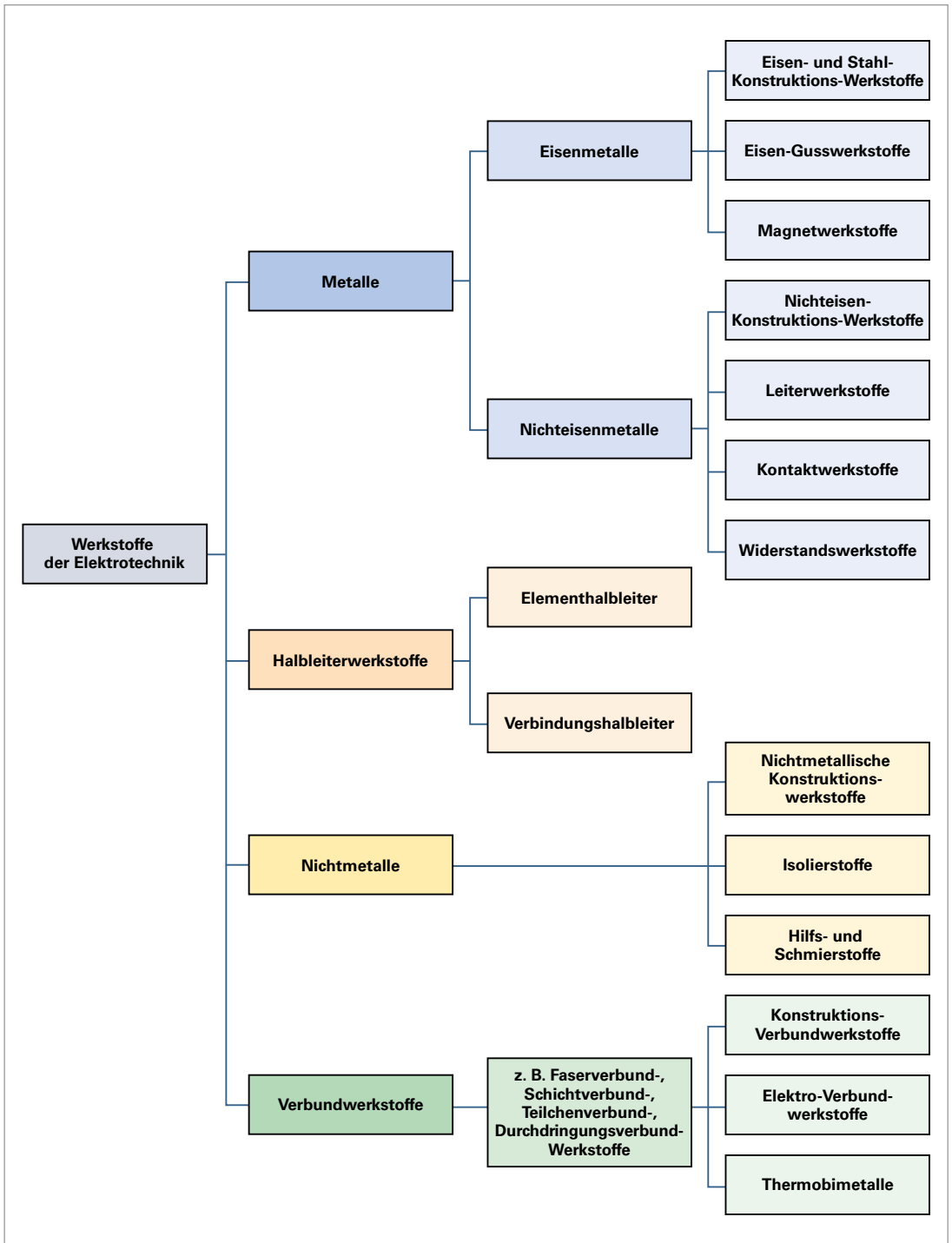


Bild 1: Werkstoffe der Elektrotechnik

Die Normung von Werkstoffen und Erzeugnissen

Normen haben im handwerklichen und industriellen Bereich eine große Bedeutung. Der überwiegende Teil der Werkstoffe und Werkstoffzeugnisse sind entweder direkt genormt oder unterliegen in der Zusammensetzung, den Abmessungen und Qualitätsanforderungen genormten Maßstäben.

Die Normung hat die Aufgabe, Vereinheitlichungen für Werkstoffe und deren Erzeugnisse (Halbzeuge), Massenteile, z. B. Schrauben, und Verfahren verbindlich festzulegen. Sie fördert die Rationalisierung in der Technik und Wirtschaft, schafft Qualitätsstandards und dient der Arbeits- und Planungssicherheit.

Erfüllt ein Werkstoff, ein Erzeugnis oder ein Verfahren die in der Norm vorgeschriebenen Anforderungen, so liegt eine Normenkonformität¹ vor.

Werkstoffe, Erzeugnisse oder Verfahren, die normenkonform sind, kennzeichnet man mit einem Zeichen (**Bild 1**). Es enthält z. B. das DIN-Symbol² oder das VDE³-Zeichen.

Normung gibt es auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene (**Bild 2**).

Die vom Deutschen Institut für Normung erarbeiteten Normen werden als DIN-Normen bezeichnet (deutsche Normen). Die EN-Norm ist eine europäische Norm. Sie wird vom europäischen Komitee für Normung (CEN⁴) erstellt und nach Prüfung durch die einzelnen europäischen Länder als nationale Norm übernommen. Für Deutschland heißt diese übernommene europäische Norm dann DIN-EN-Norm. Die nationalen Normen Europas, wie z. B. in Deutschland die DIN-Normen, werden im Laufe der Zeit von den DIN-EN-Normen abgelöst. Die internationalen ISO-Normen werden von der „International Organization for Standardization“ herausgegeben und haben weltweite Bedeutung. Werden sie in Deutschland Bestandteil der Normen, so heißen sie DIN-ISO-Normen.

Normgerechte Bezeichnung von Werkstoffen

Ein großer Teil der Werkstoffe wird heute schon nach der europäischen Norm DIN EN bezeichnet, z. B. die Stähle nach DIN EN 10127 (**Bild 3**).

Außerdem gibt es eine Kennzeichnung der Werkstoffe durch Nummern, z. B. für Stähle nach DIN EN 10 027. Die Werkstoffnummer besteht aus fünf oder sieben Ziffern und ist durch einen Punkt unterteilt (**Bild 4**).



Bild 1: Norm-Kennzeichnungen (Auswahl)

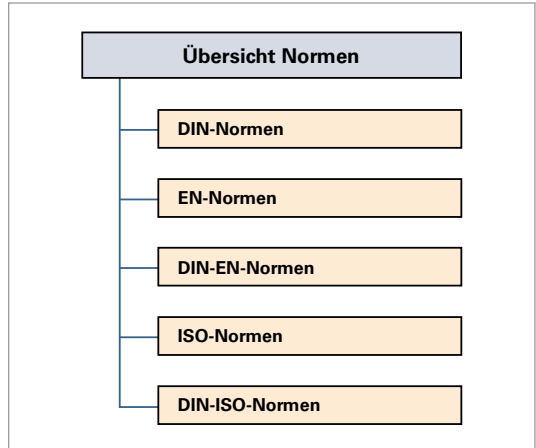


Bild 2: Verschiedene Normen

- Baustahl: S235JR
- Nichtrostender Stahl: X5CrNiMo 18-10
- Aluminiumlegierung: EN AW-5754 [AlMg3]
- Elektro-Kupfer: Cu-ETP

Bild 3: Beispiele für Werkstoffkurzbezeichnungen

- 1.0038: Baustahl S235JR
- CW 004A: Elektro-Kupfer Cu-ETP
- 3.3207: Elektroaluminium
EN AW-6101B [AlMgSi(B)]

Bild 4: Beispiele für Werkstoffnummern

¹ von con (lat.) = mit, zusammen und forma (lat.) = Form, Gestalt; Konformität = Übereinstimmung

² DIN, Abk. für: Deutsches Institut für Normung

³ VDE, Abk. für: Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V.

⁴ CEN, Abk. für Comité Européen de Normalisation (franz.)

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Körper und Stoff

Physikalische Größen

Die messbaren Eigenschaften eines Körpers, eines Zustands oder Vorgangs nennt man **physikalische Größen**, z. B. die Länge, die Masse oder die Zeit. Eine physikalische Größe setzt sich aus einer Zahl und einer Einheit zusammen:

$$\text{Größe} = \text{Zahlenwert} \times \text{Einheit}$$

Beträgt z. B. die Länge (Formelzeichen l) eines Werkstücks 0,6 Meter (Einheitenzeichen m), schreibt man statt Länge = 0,6 mal 1 Meter kurz: $l = 0,6 \text{ m}$. Zahlenwert und Einheit sind also durch Multiplikation miteinander verknüpft.

Alle physikalischen (und chemischen) Einheiten lassen sich auf nur 7 Grundeinheiten zurückführen (**Tabelle 1**). Sie heißen nach dem „Gesetz über die Einheiten im Messwesen“ auch SI¹-Basiseinheiten. Alle übrigen Einheiten sind aus den Basiseinheiten abgeleitet. Einige der zusammengesetzten Einheiten tragen, oft zu Ehren bestimmter Wissenschaftler, besondere Namen. Diese Einheiten wären sonst zu unübersichtlich. So lautet z. B. die Einheit der Leistung eigentlich $\text{m}^2\text{kg}/\text{s}^3$. Man bezeichnet sie aber kurz als „Watt“ (Einheitenzeichen W nach James Watt)².

Die Einheitenzeichen schreibt man groß, wenn sie von einem Eigennamen abgeleitet sind, z. B. Hertz (Hz), Siemens (S), Ohm (Ω) oder Volt (V). In allen anderen Fällen schreibt man sie klein, z. B. Meter (m), Sekunde (s) oder Liter (l).

Einheitenvorsätze für dezimale Teile und Vielfache

Vorsätze vor den Einheiten für dezimale Teile oder für dezimale Vielfache (**Tabelle 2**) ergeben bei der Angabe von Größen zweckmäßige und begreifbare Zahlenwerte zwischen 0,1 und 1 000, also z. B. 257,3 km statt 257 300 m oder 34 ns statt 0,000 000 034 s.

Vorsätze und Vorsatzzeichen darf man nur zusammen mit einem Einheitennamen und mit dem Einheitenzeichen verwenden. Eine Längeneinheit 1μ (ein „Mü“) z. B. gibt es nicht, man muss $1 \mu\text{m}$ (ein Mikrometer) sagen.

Das Vorsatzzeichen wird ohne Zwischenraum vor das Einheitenzeichen geschrieben, weil beide zusammen eine neue Einheit bilden. Ein Exponent am Einheitenzeichen gilt auch für das Vorsatzzeichen, z. B. $1 \text{ mm}^3 = 1 (\text{mm})^3 = 1 \cdot (10^{-3} \text{ m})^3 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$.

Tabelle 1: SI-Basisgrößen und -einheiten

Basisgröße	Formelzeichen	SI-Einheit
Länge	l	Meter (m)
Masse	m	Kilogramm (kg)
Zeit	t	Sekunde (s)
elektrische Stromstärke	I	Ampere (A)
thermodynamische Temperatur	T	Kelvin (K)
Stoffmenge	n	Mol (mol)
Lichtstärke	I_v	Candela (cd)

Tabelle 2: Einheitenvorsätze (SI-Vorsätze)

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor
Für große Zahlenwerte		
Deka	da	10^1
Hekto	h	10^2
Kilo	k	10^3
Mega	M	10^6
Giga	G	10^9
Tera	T	10^{12}
Peta	P	10^{15}
Exa	E	10^{18}
Für kleine Zahlenwerte		
Dezi	d	10^{-1}
Zenti	c	10^{-2}
Milli	m	10^{-3}
Mikro	μ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Piko	p	10^{-12}
Femto	f	10^{-15}
Atto	a	10^{-18}

¹ Système International d'Unités (franz.) = Internationales System der Einheiten

² James Watt 1736 bis 1819, Vater der Dampfmaschine

Mehrere Vorsätze dürfen nicht kombiniert werden; z.B. für $1 \cdot 10^{-12}$ F muss man 1 pF schreiben, $1 \mu\mu\text{F}$ ist falsch. Auf die SI-Basiseinheit 1 kg (Kilogramm) darf man daher keine Vorsätze anwenden, sondern nur auf die Einheit g (Gramm). Es heißt also 1 mg und nicht $1 \mu\text{kg}$.

Sind bei Produkten von Einheiten Verwechslungen mit Vorsatzzeichen möglich, so schreibt man einen Malpunkt zwischen die Einheiten; z.B. $1 \text{ m} \cdot \text{N}$ (1 Meternewton) anstelle von 1 mN (1 Millinewton). Verwechslungen vermeidet man noch besser mit 1 Nm (1 Newtonmeter) für das Kraftmoment.

Grundeigenschaften der Körper

Jeder Körper besteht aus Stoff, auch Materie¹ oder Substanz² genannt, z.B. aus Stahl, Holz, Glas, aus einem Kunststoff, Gummi, Wasser oder Luft. Ein Körper beansprucht Raum und besitzt eine Masse.

Volumen: Den Rauminhalt (das Volumen V) kann man als Längen in den drei Richtungen des Raumes messen, die senkrecht aufeinander stehen. Diese Längen haben die Einheit Meter. Das Volumen besitzt daher als Einheit $\text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{m}$, also Kubikmeter (m^3). Die Volumeneinheit ist als der Rauminhalt eines Würfels mit 1 m Kantenlänge festgelegt. Für Flüssigkeiten und Gase verwendet man die Einheit Liter, wobei 1 Liter so groß ist wie 1 Kubikdezimeter ($1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3$).

Das Volumen regelmäßiger Körper, z.B. Quader, Prisma oder Zylinder, lässt sich aus ihren Abmessungen berechnen. Länge, Breite und Höhe sind Längen.

Messen bedeutet das Vergleichen mit einer Einheit.

Die Einheit der Länge, das Meter, ist eine SI-Basiseinheit. Physikalisch exakt ist sie festgelegt als die Strecke, die das Licht in $1/299\,792\,458$ Sekunden im Vakuum zurücklegt (CGPM³ 2018).

Körper können einander verdrängen. Taucht man z.B. einen Stein unregelmäßiger Form vollständig in Wasser, verdrängt er gerade so viel von der Flüssigkeit, wie sein Volumen ausmacht.

Masse: Jeder Körper besitzt Masse (Formelzeichen m), eine weitere Grundeigenschaft aller Materie. Masse äußert sich in zwei Formen: einmal als schwere und einmal als träge Masse.

Die große Masse der Erde zieht jeden Körper an, der sich auf der Erdoberfläche oder in Erdnähe befindet. Diese Eigenschaft nennt man **Schwere** (Gravitation⁴).

Ändert sich der Bewegungszustand eines Körpers, wird also seine Geschwindigkeit oder seine Bewegungsrichtung verändert, setzt der Körper dieser Änderung einen Widerstand entgegen. Die **Trägheit**, auch als Beharrungsvermögen bezeichnet, wird durch die Masse verursacht.

Die SI-Einheit der Masse ist das Kilogramm ($1 \text{ kg} = 10^3 \text{ g}$).

Genau die Masse von 1 kg hat der internationale Kilogramm-Prototyp⁵, ein Zylinder von 39 mm Durchmesser und 39 mm Höhe aus einer Platin-Iridium-Legierung, der in Sèvres bei Paris aufbewahrt wird.

Die Masse eines Körpers misst man durch Vergleich mit der Masse von Wägestücken auf einer Waage, z.B. einer Balkenwaage (**Bild 1**). Seit der Einführung des Internationalen Einheitensystems SI⁶ im Jahr 2019 bezieht sich das Kilogramm nicht mehr auf den kg-Prototypen, sondern wird von einem festgelegten Wert für die Planck-Konstante h abgeleitet.

Neben dem Kilogramm sind als weitere Einheiten der Masse die Tonne ($1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg} = 1 \text{ Mg}$) und das metrische Karat ($1 \text{ Karat} = 1 \text{ Kt} = 0,2 \text{ g}$) in Gebrauch. In der Atomphysik und in der Chemie benutzt man die Masseneinheit u : $1 \text{ u} = 1,660\,565\,5 \cdot 10^{-24} \text{ g}$.

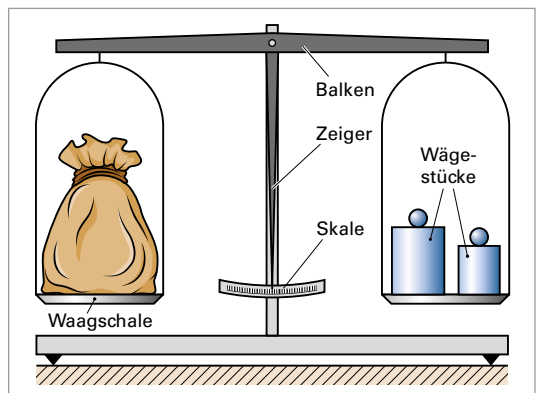


Bild 1: Balkenwaage

¹ materia (lat.) = Stoff

² substantia (lat.) = Wesenheit, Bestand

³ Conférence Général des Poids et Mesures (franz.) = Generalkonferenz für Maß und Gewicht

⁴ gravitas (lat.) = Schwere

⁵ Vorbild, Muster von protos (griech.) = der Erste und typus (lat.) = Gepräge, Muster

⁶ SI (franz.) = Système international d'unités

Dichte: Aus der Masse und dem Volumen eines Körpers ergibt sich eine seiner kennzeichnenden Eigenschaften: seine Dichte (**Formel 1**).

Die Einheiten der Dichte sind von den SI-Basis-einheiten abgeleitet: Für feste Stoffe gibt man die Dichte in kg/m^3 bzw. kg/dm^3 oder g/cm^3 an ($1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ g/cm}^3 = 10^{-3} \text{ kg/m}^3$).

Für Flüssigkeiten verwendet man kg/l oder g/ml und für Gase g/l : ($1 \text{ g/l} = 10^{-3} \text{ g/cm}^3$).

Allgemein versteht man unter Dichte das Verhältnis einer physikalischen Größe zum Volumen, z. B. in der Elektronik die Raumladungsdichte (= elektrische Ladung / Volumen). Am häufigsten rechnet man mit der Massendichte (**Tabelle 1**), kurz nur **Dichte** geheißen: $\rho = \text{Masse} / \text{Volumen}$.

Besondere Dichte-Benennungen: Die **Normdichte** eines Gases ist die Dichte (meist in g/l) bei Normbedingungen, d.h. bei einer Temperatur von 0°C und einem Druck von $1\,013,25 \text{ mbar}$ (= $101\,325 \text{ Pa}$). Unter der **Rohdichte** eines porösen Stoffes versteht man den Quotienten aus Masse und Volumen, das die Hohlräume mit einschließt. Ähnlich spricht man von der **Schüttdichte**, z. B. bei einer Ladung Kies. Die **relative Dichte**, d. h. das Verhältnis der Dichte ρ eines Stoffes zur Dichte ρ_0 eines Bezugsstoffes, wird nur noch bei Gasen benutzt. Als Bezugsdichte wählt man häufig die Dichte der trockenen Luft im Normzustand $\rho_L = 1,293 \text{ g/l}$.

Aggregatzustände: Je nach Druck und Temperatur ist ein Körper fest, flüssig oder gasförmig. Diese Zustände, in der sich der Körper befindet, nennt man seinen **Aggregatzustand**¹ (**Bild 1**).

Feste Körper haben eine feste, eindeutige Form und ein bestimmtes Volumen. Ihre kleinsten Teile sind entweder ungeordnet (amorph²) oder streng regelmäßig angeordnet (kristallin).

Flüssigkeiten haben keine feste Gestalt, sondern passen sich der Form des jeweiligen Gefäßes an, besitzen aber ein konstantes Volumen. Die Teilchen der Flüssigkeit lassen sich sehr leicht verschieben. Dadurch nehmen sie die Form des Gefäßes an und bilden durch die Erdgravitation eine horizontale Oberfläche.

Gase wollen sich ausdehnen und nehmen Form und Volumen des Gasbehälters an.

Den Molekülen eines Gases kann man ihre äußere Elektronenhülle wegnehmen, wenn man viel Energie zuführt, z. B. durch eine Gasentladung. Die Teilchen zerfallen in positiv geladene Ionen und freie Elektronen. Das Gas ist dann in einem **Plasmazustand**, der oft auch als vierter Aggregatzustand bezeichnet wird. Das Gasplasma besitzt eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Ein Plasma erzeugt man z. B. in Gasentladungslampen oder mit Lichtbögen. Das Magnetfeld, das sich bei der Entstehung des Plasmas bildet, schnürt es zu einem engen Schlauch zusammen.

Wiederholungsfragen

- | | |
|--|---|
| <p>1 Zählen Sie die sieben SI-Basisgrößen der Physik und Chemie auf!</p> <p>2 Was versteht man unter zusammengesetzten Einheiten physikalischer Größen?</p> <p>3 Wozu dienen die Einheitenvorsätze für dezimale Teile und Vielfache?</p> | <p>4 Was versteht man unter der Trägheit eines Körpers?</p> <p>5 Wodurch unterscheiden sich die Aggregatzustände der Materie?</p> <p>6 Was ist die Schüttdichte?</p> <p>7 Was ist ein Plasma?</p> |
|--|---|

¹ von aggregatus (lat.) = das Zu- oder Beigesellte

² formlos, gestaltlos; von a- (griech.) = nicht und morphe (griech.) = Gestalt

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

ρ (rho) Dichte
 m Masse
 V Volumen

Tabelle 1: Massendichte einiger Stoffe

Stoff	Dichte in g/cm^3
Kork	0,2
Holz	0,5 ... 1,2
Aluminium	2,70
Stahl	7,86
Kupfer	8,96
Silber	10,50
Blei	11,34
Gold	19,30
Alkohol	0,789
Wasser (bei 4°C)	1,00
Erdöl	1,65... 1,02
Quecksilber	13,55
Wasserstoff	0,000 089
Luft (bei 1013 mbar)	0,001 293

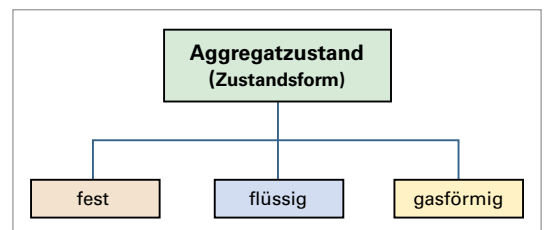


Bild 1: Aggregatzustände

2.1.2 Bewegung der Körper (Bewegungslehre)

Ein Körper ist in **Bewegung**, wenn er in einer bestimmten Zeit seinen Ort gegenüber der ruhenden Umgebung verändert, z.B. eine fahrende Lokomotive gegenüber den stillstehenden Schienen. Neben der Beschreibung und Messung seiner Bahn, auf der sich der Körper bewegt, gehört das genaue Messen der **Zeit** der Bewegung zu ihrer exakten Untersuchung.

Mit Uhren kann man Zeitpunkte und Zeitabstände bestimmen. Als Zeitmaß dienen periodische¹ Vorgänge, z. B. die Schwingungen eines Pendels oder eines Quarzkristalls.

Die SI-Basiseinheit der Zeit ist die **Sekunde**. Sie dauert 9 192 631 770 Perioden einer bestimmten Strahlung von Cäsium-Atomen (¹³³Cs).

Für größere Zeitspannen verwendet man die Minute (min), die Stunde (h), den Tag (d) und das Normaljahr (a) als Einheit (**Tabelle 1**), für kurze die Sekunde (s) mit Vorsätzen, z. B. ms oder μ s.

Ein **Zeitabstand** von 2,805 Stunden wird als 2 h 48 min 18 s geschrieben, der **Zeitpunkt** 7 Uhr 15 Minuten 6 Sekunden als $7^{\text{h}} 15^{\text{min}} 6^{\text{s}}$.

Die Bewegungslehre (**Kinematik**²) teilt die Bewegungen in mehrere Bewegungsformen und Bewegungsarten ein (**Tabelle 2**).

Geradlinig gleichförmige Bewegung: Ein Körper bewegt sich gleichförmig, wenn er in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurücklegt. Kennzeichen dieser Bewegung ist die **Geschwindigkeit**. Bei geradlinig gleichförmiger Bewegung berechnet man die Geschwindigkeit v aus dem zurückgelegten Weg s geteilt durch die dafür benötigte Zeit t (**Formel 1**).

Die abgeleitete SI-Einheit der Geschwindigkeit³ ist $[v] = \text{m/s}$. Bei dieser Bewegung bleibt die Geschwindigkeit stets gleich (**Bild 1, mittlere Kurve**).

Die Angabe von Fahrzeuggeschwindigkeiten erfolgt in Kilometer je Stunde (km/h): $1 \text{ km/h} = 5/18 \text{ m/s} = 0,2777 \dots \text{ m/s}$. Bei überschallschnellen Flugzeugen wird die Geschwindigkeit in Mach (M) angegeben. Mach (oder Machzahl) ist das Verhältnis der Geschwindigkeit des Flugkörpers zur Schallgeschwindigkeit in derselben Luft: $1 \text{ M} = 340 \text{ m/s} = 1200 \text{ km/h}$.

Gleichförmig beschleunigte Bewegung: Bei einer gleichförmig **beschleunigten** Bewegung vergrößern sich die in gleichen Zeitabständen zurückgelegten Wege (**Bild 1, untere Kurve**), die Geschwindigkeit nimmt also stetig zu. Verkürzen sich dagegen die Wege in gleichen Zeitintervallen, nennt man eine solche Bewegung **verzögert** (**Bild 1, obere Kurve**). Für den gesamten Ablauf der Bewegung lässt sich aus dem ganzen zurückgelegten Weg und der dafür nötigen Zeit eine **Durchschnittsgeschwindigkeit v** berechnen: $v = s/t$. Dabei macht es keinen Unterschied, ob die Bewegung beschleunigt oder verzögert ist, oder ob sie sich aus beschleunigter, gleichförmiger und verzögerter Bewegung zusammensetzt. Eine längere Autofahrt z. B. ist in verschiedene Bewegungsarten unterteilt.

¹ von periodos (griech.) = das Herumgehen, regelmäßige Wiederkehr

² von kinema (griech.) = Bewegung

³ $[v]$ = Einheit von v (der Geschwindigkeit, lat. velocitas)

Tabelle 1: Zeiteinheiten

Name	Einheitenzeichen	Erklärung
Minute	min	1 min = 60 s
Stunde	h	1 h = 60 min
Tag	d	1 d = 24 h
Normaljahr	a	1a = 365 d

Tabelle 2: Bewegungsformen und -arten

Bewegungsform	Bewegungsart
geradlinige Bewegung	gleichförmige Bewegung
krummlinige Bewegung	beschleunigte Bewegung
periodische Bewegung	verzögerte Bewegung

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} \quad v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

v Geschwindigkeit s Weg t Zeit

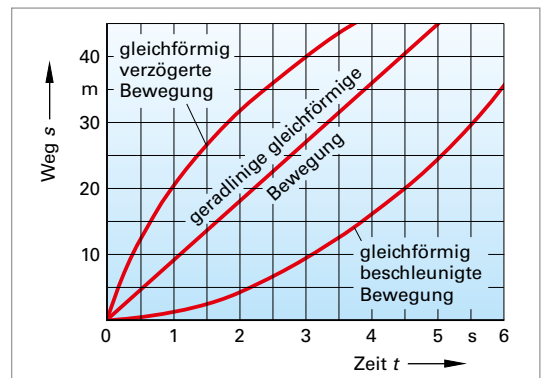


Bild 1: Weg-Zeit-Diagramm

Eine genauere Beschreibung des jeweiligen Bewegungszustandes liefert die **Momentangeschwindigkeit** für jeden Zeitpunkt der Bewegung (Bild 1). Zu ihrer Berechnung greift man eine genügend kleine Wegstrecke¹ Δs heraus und misst den zugehörigen Zeitabschnitt Δt .

Die zeitliche Änderung der Geschwindigkeit heißt **Beschleunigung** a^2 (Formel 1). Eine verzögerte Bewegung drückt man durch eine negative Beschleunigung aus. Die SI-Einheit der Beschleunigung ist $(\text{m/s})/\text{s} = \text{m/s}^2$.

Bleibt während einer Bewegung die Beschleunigung a konstant, spricht man von einer **gleichmäßig beschleunigten Bewegung**. Gleichmäßig beschleunigt wird z. B. ein Körper im freien Fall. Hierbei erteilt die Erdanziehung jedem Körper eine Fallbeschleunigung (Formelzeichen g) von durchschnittlich $g = 9,806\ 65 \text{ m/s}^2$. Die Fall- oder Erdbeschleunigung hängt auch vom Ort ab. Am Erdäquator ist die Fallbeschleunigung etwas geringer ($g = 9,78 \text{ m/s}^2$) als an den Polen ($g = 9,83 \text{ m/s}^2$).

Bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist die Durchschnittsgeschwindigkeit nur halb so groß wie die Endgeschwindigkeit (Bild 1). Daraus ergibt sich das Weg-Zeit-Gesetz (Formel 2).

Kreisbewegungen: Die Geschwindigkeit, mit der ein Körper auf einer Kreisbahn umläuft (Bild 2), nennt man seine **Umfangsgeschwindigkeit**.

Die Kreisbewegung ist gleichförmig, wenn der Körper oder ein Massepunkt am Umfang z. B. einer Scheibe in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurücklegt (Formel 3). Die Anzahl der Umdrehungen je Zeiteinheit heißt **Drehfrequenz** f (Einheit $1/\text{s}$ oder Hertz – Hz), früher auch als Drehzahl bezeichnet. Das Produkt $2 \cdot \pi \cdot f$ lässt sich zu einer neuen Größe zusammenfassen, der **Winkelgeschwindigkeit** ω . Auf einer krummlinigen Bahn wird ein Körper ebenfalls „beschleunigt“, auch wenn er sie mit gleich bleibender Geschwindigkeit durchläuft. Die **Änderung der Bewegungsrichtung** entspricht nämlich einer Beschleunigung. Bewegt sich ein Körper z. B. auf einer Kreisbahn mit Radius r und gleich bleibender Umfangsgeschwindigkeit v , wird er zum Kreismittelpunkt hin beschleunigt (**Radialbeschleunigung** a_r , Formel 4).

Zusammengesetzte Bewegungen: In der Technik sind einfache Bewegungen selten, meist überlagern sich mehrere Bewegungen. Durchquert z. B. ein Ruderboot einen Fluss, bemüht sich der Ruderer, das Boot auf kürzestem Wege zum gegenüberliegenden Ufer zu bewegen. Das strömende Wasser treibt aber auch das Boot flussabwärts. Die resultierende Bewegung des Bootes setzt sich daher aus zwei Bewegungen unterschiedlicher Richtung zusammen.

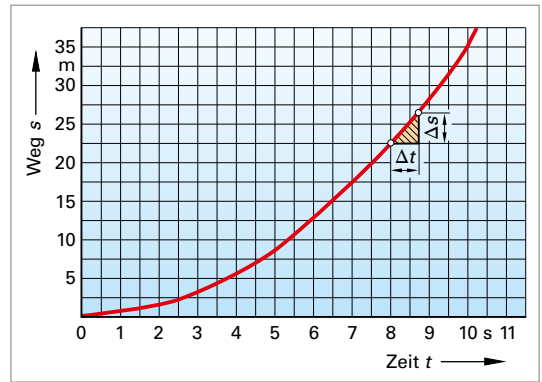


Bild 1: Momentangeschwindigkeit

$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ (1)	a Beschleunigung
	Δv Geschwindigkeitsänderung
	Δt Zeitänderung

$s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ (2)	s Weg
	a Beschleunigung
	t Zeit

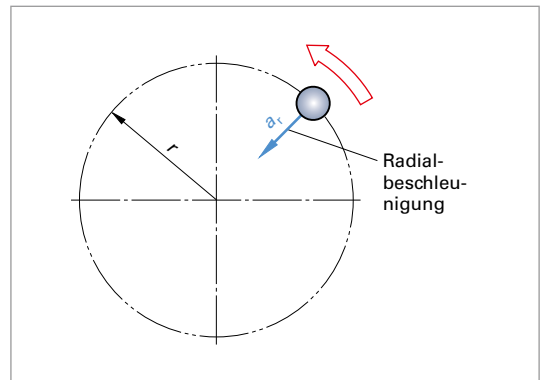


Bild 2: Kreisbewegung

$v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot r$ (3) $v = \omega \cdot r$	v Umfangsgeschwindigkeit
	f Drehfrequenz
	r Radius

$a_r = \frac{v^2}{r} = \omega^2 \cdot r$ (4)	ω Winkelgeschwindigkeit
	a_r Radialbeschleunigung

¹ Δ (Delta) ist das Zeichen für eine Differenz, also $\Delta s = s_2 - s_1$

² a acceleratio – Beschleunigung (lat.)

Das Boot bewegt sich im Ergebnis in einer bestimmten Zeit, z. B. in 1 s, bis zu einem Ort, der auch erreicht würde, wenn die beiden Bewegungen nacheinander in je 1 s erfolgten (**Bild 1**).

Überlagerungsprinzip: Führt ein Körper mehrere Teilbewegungen gleichzeitig aus, überlagern sich diese Bewegungen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Die Teilgeschwindigkeiten zeichnet man in Betrag und Richtung als Pfeillinien, z. B. im Maßstab $1 \text{ cm} \hat{=} 1 \text{ m/s}$. Dann lassen sich diese Geschwindigkeiten geometrisch addieren (**Bild 2**).

Diese Art der geometrischen Addition gilt auch für das Zusammensetzen von Beschleunigungen. Für die zeichnerische Lösung benutzt man dabei z. B. einen Maßstab von $1 \text{ cm} \hat{=} 1 \text{ m/s}^2$.

Ein gutes Beispiel für zusammengesetzte Bewegungen ist der waagrechte Wurf (**Bild 3**). Ein Körper (Punkt P) wird mit einer Anfangsgeschwindigkeit v_x waagrecht weggeschleudert. Er behält diese Geschwindigkeit bei, wenn man die Luftreibung vernachlässigt. Auf die Masse wirkt gleichzeitig die Erdbeschleunigung nach unten, in y -Richtung. Der Körper bewegt sich also waagrecht mit der Geschwindigkeit $v_x = x/t$, und senkrecht nach unten legt er den Weg $y = g \cdot t^2/2$ zurück. Mit $t = x/v_x$ ergibt sich $y = g \cdot x^2/(v_x^2 \cdot 2)$, also $y = [g/(2 \cdot v_x^2)] \cdot x^2$. Dies ist die Gleichung einer Parabel.

Weitere Beispiele für zusammengesetzte Bewegungen sind senkrechter und schräger Wurf, die Berechnung der ballistischen¹ Bahn von Geschossen oder von Raketen.

Das Überlagerungsprinzip (Superpositionsprinzip) gilt in der Natur z. B. auch für Schwingungen, die sich am gleichen Ort überlagern. Bei Licht oder anderen elektromagnetischen Wellen treten dann z. B. Interferenzen² auf. Dabei verstärken sich bei gleicher Phase die Wellen und werden bei entgegengesetzter Phase geschwächt.

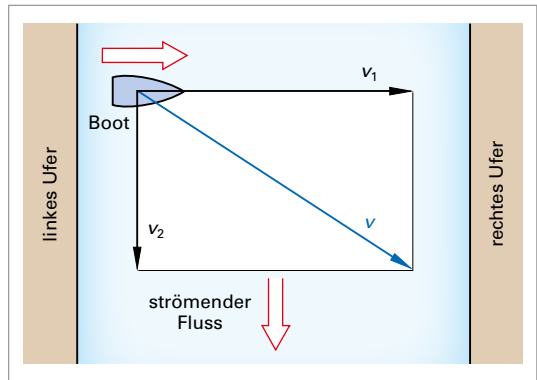


Bild 1: Zusammengesetzte Bewegungen

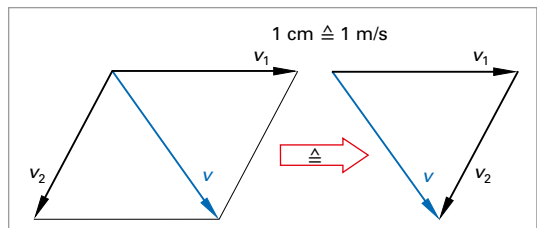


Bild 2: Geometrisches Zusammensetzen von Teilbewegungen

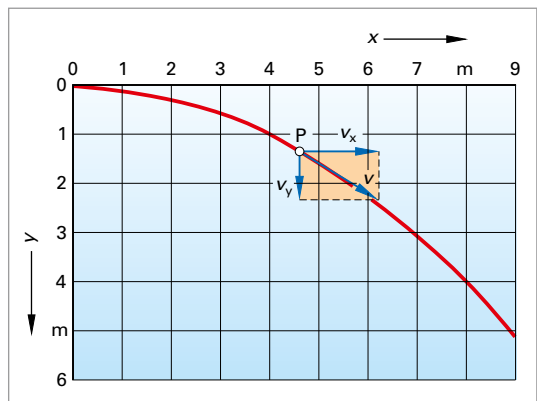


Bild 3: Waagrechter Wurf

Wiederholungsfragen

- 1 Welche physikalischen Vorgänge nutzt man zum Messen der Zeit?
- 2 Wodurch ist eine geradlinig gleichförmige Bewegung gekennzeichnet?
- 3 Geben Sie Beispiele an für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung!
- 4 Erklären Sie den Begriff „Beschleunigung“!
- 5 Geben Sie das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung an!
- 6 Wie verändert die Ortslage auf der Erde die Fallbeschleunigung?
- 7 Wie wirkt sich die Strömung eines Flusses auf ein Motorschiff aus, das stromaufwärts fährt?
- 8 Weshalb ist die gleichförmige Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung?
- 9 Welche Größen kennzeichnen eine gleichförmige Kreisbewegung?

¹ von ballista (lat.) = Wurf-, Schleudermaschine; Ballistik = Lehre von den Flugbahnen der Körper

² von inter- (lat.) = dazwischen und ferre (lat.) = tragen; Interferenz = Überlagerung, Beeinflussung

2.1.3 Kräfte

Messen von Kräften: Eine Kraft bewirkt die Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers, sie beschleunigt oder verzögert seine Bewegung. Wirkt keine Kraft mehr auf den Körper ein, beharrt er wegen seiner Trägheit im Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung. Eine Kraft kann auch einen Körper verformen, z. B. beim Pressen oder Schmieden. Die Verformung kann bleibend (plastische¹ Verformung) oder nur vorübergehend sein (elastische² Verformung).

Eine Kraft ändert die Geschwindigkeit eines Körpers oder seine Form.

Eine Kraft (Formelzeichen F) lässt sich mit einem Federkraftmesser bestimmen (**Bild 1**). In diesem Messgerät dehnt die zu messende Kraft eine Schraubenfeder. Die Längendehnung ist der Kraft proportional.

Die Einheit der Kraft ist das Newton³ (N). 1 Newton beschleunigt eine Masse von 1 kg um 1 m/s^2 : $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$.

Gewichtskraft (Schwerkraft): Die Erde zieht jeden Körper an. Diese Anziehungskraft verursacht das Gewicht des Körpers.

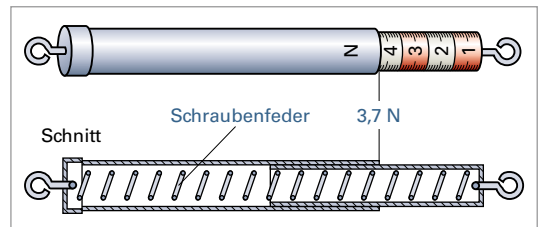


Bild 1: Federkraftmesser

Das Gewicht eines Körpers ist die Kraft, mit der er von der Erde angezogen wird.

Die Erdanziehung beschleunigt jeden Körper im freien Fall mit $9,80665 \text{ m/s}^2$ (Norm-Fallbeschleunigung). Eine Masse von 1 kg drückt also mit einer Kraft von $9,80665 \text{ N}$ ($\approx 10 \text{ N}$) auf ihre Unterlage.

Kraftrichtung: Eine Kraft hat immer auch eine **Richtung**, in der sie wirkt. Eine physikalische Größe, die durch ihren Betrag und zusätzlich durch ihre Richtung (sowie ihren Richtungssinn) gekennzeichnet ist, nennt man eine **vektorielle Größe**. Den Vektor⁴ kann man durch eine Pfeillinie (**Bild 2**)

veranschaulichen. Für die Zeichnung muss man noch einen Maßstab festlegen, z. B. $1 \text{ cm} \triangleq 5 \text{ N}$. Die Pfeillinie liegt in der Richtung der Kraft und die Pfeilspitze gibt den Richtungssinn an. Der Beginn der Pfeillinie markiert den Angriffspunkt der Kraft. Der Angriffspunkt darf bei einem starren Körper entlang der Wirkungslinie (**Bild 2**) verschoben werden: Dadurch ändert sich die Kraftwirkung nicht.

Jede Kraft hat eine Gegenkraft zur Folge. Ein Stein z. B., der auf der Erde liegt, drückt mit seiner Gewichtskraft auf den Boden und der Erdboden hält mit gleich großer Auflagekraft dagegen.

Zu jeder Kraft entsteht eine Gegenkraft von gleicher Größe, aber entgegengesetzter Richtung.

Zusammensetzen von Kräften: Greifen mehrere Kräfte an einem Körper an, lassen sie sich zu einer Gesamtkraft zusammenfassen. Diese Gesamtkraft nennt man resultierende Kraft oder kurz **Resultierende**⁵. Die Kräfte würden den Körper je nach ihren Richtungen beschleunigen, hielte ihn nicht eine Gegenkraft fest. Deshalb lassen sich Kräfte wie Bewegungen zusammensetzen.

Kraftpfeile können vektoriell addiert werden.

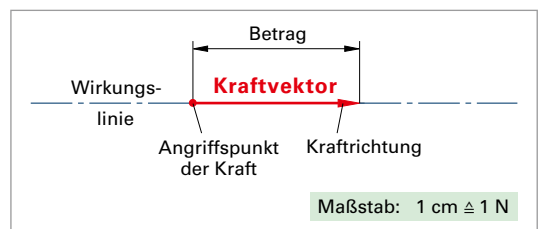


Bild 2: Kraft als Vektor

¹ von plastos (griech.) = gebildet, geformt

² von elastos (griech.) = dehnbar, biegsam

³ Sir Isaac Newton, 1643 bis 1727, englischer Universalgelehrter

⁴ von vector (lat.) = Träger, Fahrer

⁵ von résulter (franz.) = sich aus etwas ergeben, die Folge von etwas sein

Die Kraft F wird als vektorielle Größe mit einem Pfeil über dem Formelzeichen gekennzeichnet (**Bild 1**).

Der resultierende Vektor lässt sich durch Aneinanderreihen der Teilvektoren ermitteln. Umgekehrt kann man eine Kraft in Teilkräfte zerlegen. Durch Kräftezerlegungen bestimmt man z.B. Zug- und Druckkräfte in Maschinenteilen.

Die Gewichtskraft F_G einer Straßenlampe (**Bild 2**) z.B. zerfällt in Teilkräfte (**Komponenten**¹), die als Zugkräfte in den Aufhängeseilen wirken.

Die Seilzugkräfte F_1 und F_2 ergeben sich zeichnerisch als Parallelen zu den Seilstücken durch die Pfeilspitze der Gewichtskraft F_G .

Eine Kraft lässt sich in Teilkräfte zerlegen, wenn deren Wirkungslinien bekannt sind.

Kraft und Beschleunigung: Wirkt eine Kraft auf einen frei beweglichen Körper, wird er in die Richtung der Kraft beschleunigt. Die Kraft F ist proportional der Körpermasse m und der Beschleunigung a (**Formel 1**).

Ist die Resultierende aller Kräfte, die auf den Körper einwirken, gleich null, so ist er im Kräftegleichgewicht, d. h., er bleibt in Ruhe oder in geradlinig gleichförmiger Bewegung (**Trägheit**).

Greift bei einem Körper außerhalb seiner Drehachse eine Kraft an, will er sich drehen. Dieses Drehbestreben heißt **Drehmoment** (**Bild 3**). Das Drehmoment M nimmt proportional der Größe der Kraft F und mit dem senkrechten Abstand d von der Drehachse zu. Als Einheit des Drehmoments erhält man das Newtonmeter (Nm).

Die **Bahngeschwindigkeit** v der Kreisbahn jedes Punktes außerhalb der Drehachse hängt von der Drehfrequenz f und vom Radius r der Kreisbahn ab: $v = 2\pi \cdot r \cdot f$.

Bei gleich bleibender Bahngeschwindigkeit, also bei konstanter Drehfrequenz, entsteht eine **gleichförmige Kreisbewegung**. Dabei ändert sich dauernd die Richtung der Geschwindigkeit und daher treten Kräfte auf. Die **Radialkraft** F_r greift am Körper oder an einem Teil davon an und zwingt ihn in die Kreisbahn (**Formel 2**). Zu dieser Radialkraft gehört die **Radialbeschleunigung** $a_r = v^2/r$.

Die Massenträgheit verursacht eine Gegenkraft zur Radialkraft, die **Zentrifugalkraft** F_z (**Fliehkraft**). Sie ist gleich groß wie die Radialkraft, jedoch entgegengesetzt gerichtet (**Bild 4**).

Zentrifugalkräfte nutzt man z.B. zum Trennen von Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte in Zentrifugen.

¹ von componere (lat.) = zusammensetzen

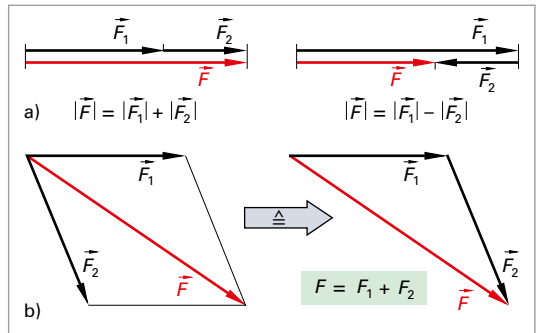


Bild 1: Vektorielle Addition von Kräften
a) in gleicher Wirkungslinie, b) nicht parallel

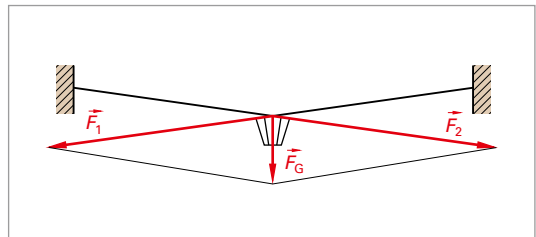


Bild 2: Zerlegung einer Kraft in Seilkräfte

$F = m \cdot a$	(1)	F Kraft
$[F] = \text{N} = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$		m Masse
		a Beschleunigung

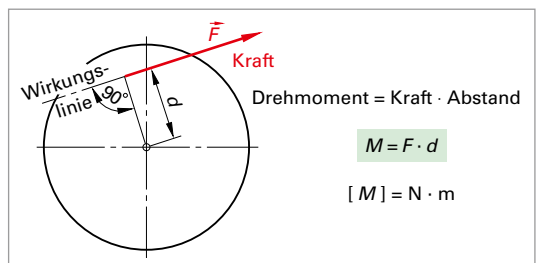


Bild 3: Drehmoment

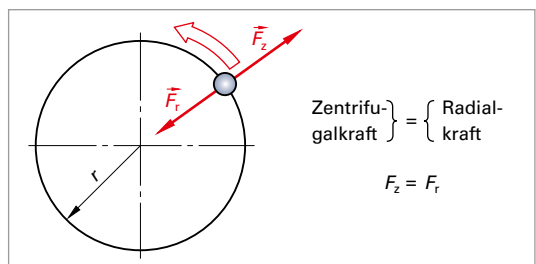


Bild 4: Zentrifugalkraft (Fliehkraft)

$F_r = \frac{m \cdot v^2}{r}$	(2)	F_r Kraft
		m Masse
		v Bahngeschwindigkeit
		r Radius

Bei einer Kreiselpumpe versetzt ein Schaufelrad die Flüssigkeit in schnelle Rotation. Die Fliehkraft treibt sie nach außen, wodurch in Achsennähe ein Unterdruck entsteht.

Die Drehfrequenz einer Schleifscheibe darf eine Höchstgrenze nicht überschreiten, weil sonst die Fliehkräfte die Scheibe zerstören können.

Mechanische Arbeit und Energie: Beim Hochheben z. B. einer Kiste verrichtet man eine Arbeit W , die umso größer ist, je schwerer die Kiste ist und je höher sie angehoben wird (**Formel 1**).

Mechanische Arbeit W wird verrichtet, wenn eine Kraft F längs eines Weges s wirkt.

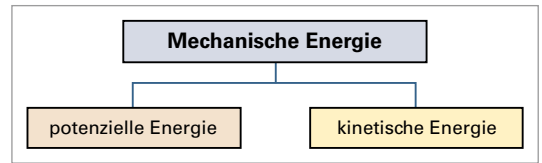


Bild 1: Mechanische Energieformen

$$W = F \cdot s \quad (1)$$

$$[W] = \text{N} \cdot \text{m}$$

W Mechanische Arbeit
 F Kraft
 s Weg

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

m Masse
 v Geschwindigkeit

Die **mechanische Arbeit** W wird in Newtonmeter (Nm) gemessen, wie auch das Drehmoment. Diese beiden Größen darf man aber nicht verwechseln: Bei der mechanischen Arbeit wirkt die Kraft in Richtung des Weges, beim Drehmoment jedoch senkrecht zum Hebelarm.

Die hochgehobene Kiste hat **mechanische Energie** gespeichert (**Bild 1**). Man nennt sie Energie der Lage oder **potenzielle¹ Energie**. Energie hat daher dieselbe Einheit wie die Arbeit, mechanische Energie misst man also in Newtonmeter (Nm).

Die Energie eines bewegten Körpers heißt **kinetische² Energie** (Energie der Bewegung). Ein Körper der Masse m und der Geschwindigkeit v besitzt kinetische Energie (**Formel 2**). Die Einheit der kinetischen Energie berechnet sich zu: $[W] = [m \cdot v^2/2] = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = (\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2) \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m}$.

Es gibt verschiedene Formen der Energie: mechanische Energie (potenzielle und kinetische), elektrische Energie, chemische Energie, Wärmeenergie, Lichtenergie und Kernenergie (Energie des Atomkerns).

Energieerhaltungssatz: Energie ist Arbeitsvermögen. Jede Energieform kann man in eine andere umwandeln. Dabei geht keine Energie verloren. Allerdings kann Energie auch nicht aus dem Nichts entstehen (Unmöglichkeit des perpetuum mobile³).

Einfache Maschinen

Schiefe Ebene: Auf einer gegen die Waagerechte geneigten Ebene lässt sich eine schwere Last F_G mit kleiner Kraft F hochschieben (**Bild 2**). Vernachlässigt man dabei die Reibung, ist die an der schiefen Ebene aufgewendete Arbeit $W = F \cdot s$ gleich der Hubarbeit $F_G \cdot h$. Aus $F \cdot s = F_G \cdot h$ lässt sich die Hangabtriebskraft F berechnen (**Formel 3**). Sie muss beim Hochschieben überwunden werden. Je geringer diese Hangabtriebskraft gegenüber der Last F_G sein soll, desto größer muss der Weg s im Verhältnis zur Höhe h sein.

Anwendungen: Spalten von Werkstoffen mit dem Keil, z. B. mit dem Messer oder einem Beil; Verkeilen von Maschinenteilen; Schrauben (auf einen Zylinder gewickelte schiefe Ebene).

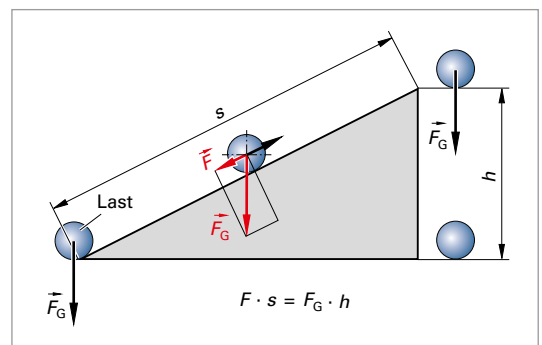


Bild 2: Schiefe Ebene

$$F = \frac{F_G \cdot h}{s} \quad (3)$$

F Hangabtriebskraft
 F_G Schwerkraft der Last
 h Höhe der schiefen Ebene
 s Länge der schiefen Ebene

¹ von potens (lat.) = mächtig, kräftig

² von kinema (griech.) = Bewegung

³ von perpetuus (lat.) = ununterbrochen und mobilis (lat.) = beweglich

Hebel: Bei einem Hebel (**Bild 1**) verursacht die Last F_2 über den Lastarm l_2 ein Drehmoment, das z. B. im Uhrzeigersinn gerichtet ist (rechtsdrehendes Moment). Diesem Moment wirkt die Kraft F_1 über den Kraftarm l_1 , entgegen, d. h. ein Drehmoment entgegen dem Uhrzeigersinn (linksdrehendes Moment). Je nachdem, von welcher Seite der Drehachse die Kräfte angreifen, unterscheidet man ein- und zweiseitige Hebel (**Bild 1**). Bei beiden Hebelarten herrscht dann Gleichgewicht, wenn sich die Drehmomente aufheben (**Formel 1**).

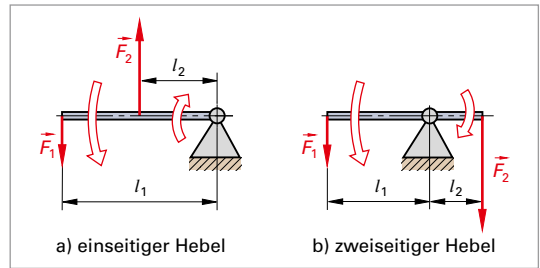


Bild 1: Hebelarten

linksdrehendes Moment = rechtsdrehendes Moment
Kraft · Kraftarm = Last · Lastarm

$$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2 \quad (1)$$

F_1 Kraft	l_1 Kraftarm
F_2 Last	l_2 Lastarm

Anwendungen: Brechstange, Hebeisen, Schraubenschlüssel, Zange, Schere, Kurbelwelle, Zahnrad sowie bei Rollen oder Flaschenzügen.

Mit Hebeln, schiefen Ebenen oder mit Flaschenzügen kann man zwar Kräfte sparen, aber keine mechanische Arbeit – also keine Energie.

Goldene Regel der Mechanik: Was an Kraft gewonnen wird, geht an Weg verloren.

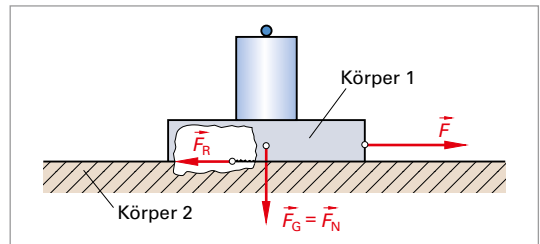


Bild 2: Gleitreibung

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (2)$$

F_R Reibungskraft
μ Reibungszahl
F_N Normkraft

Reibung: Eine Reibungskraft F_R tritt immer auf, wenn sich zwei Körper berühren und sich relativ zueinander bewegen (**Bild 2**).

Soll ein ruhender Körper in Bewegung gesetzt werden, so versucht ihn die **Haftreibung** daran zu hindern. Ein bewegter Körper muss die **Gleitreibung** überwinden. Auch ein runder Körper, der rollt, wird ein wenig in seiner Bewegung durch die **Rollreibung** gehemmt. Bei gleichem Werkstoff und gleicher Oberflächenbeschaffenheit gilt:

Haftreibung > Gleitreibung > Rollreibung.

Die Reibungskraft F_R hängt von den Werkstoffen und den Oberflächenbeschaffenheiten der aneinander reibenden Körper ab. Ferner ist die Reibungskraft proportional der Kraft, die senkrecht auf die Berührungsfläche einwirkt (Normkraft F_N). Die Reibungskraft ist aber unabhängig von der Größe der Berührungsfläche.

Ein Proportionalitätsfaktor, die Reibungszahl μ , fasst den Einfluss von Werkstoff und Rauigkeit der Oberfläche zusammen (**Formel 2**). Für Haft-, Gleit- und Rollreibung gibt es unterschiedliche Reibungszahlen (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Beispiele für Reibungszahlen

Beispiel	Haftreibung	Gleitreibung
Bremsbelag auf Stahl	0,6	0,6
Leder auf Grauguss	0,56	0,28
Polyamid auf Stahl	0,3	0,3
Cu-Sn-Leg. auf Stahl	0,18	0,16
Stahl auf Stahl	0,15	0,1

Wiederholungsfragen

- 1 Welche Wirkungen haben Kräfte?
- 2 Mit welchem Messgerät misst man den Betrag einer Kraft?
- 3 Wodurch unterscheiden sich Masse und Gewicht?
- 4 Welche Wirkungen hat die Erdanziehungskraft?
- 5 Was versteht man unter potenzieller und was unter kinetischer Energie?
- 6 Mit welcher Formel berechnet man die Reibung?
- 7 Vergleichen Sie Haftreibung und Gleitreibung!
- 8 Welche Neigung muss eine schiefe Ebene haben, damit bei gegebener Reibungszahl eine aufgelegte Last sofort gleitet?
- 9 Was besagt der Energieerhaltungssatz?
- 10 Was besagt die goldene Regel der Mechanik?