Übungen zur
PHYSIK

Beiheft

Zusammenfassungen
zu „Physik – Fundament der Technik“

Inhaltsverzeichnis

1. Größen, Einheiten, Gleichungen

1.1. Größen und Einheiten

Größe

Meßbare Eigenschaft eines physikalischen Objekts. (Masse m; Geschwindigkeit v)
Größe = Zahlenwert mal Einheit

$$X = \{X\} \cdot [X]$$

$$(m = 5\,\mathrm{kg};\quad \{m\} = 5;\quad [m] = \mathrm{kg})$$

Größenart

Gesamtheit der Größen einer bestimmten Art.

Grundgrößenarten (s, t, m, T, I, n, I_V)
werden durch Worterklärung und Meßvorschrift definiert.

Abgeleitete Größenarten
werden durch Definitionsgleichungen auf Grundgrößenarten zurückgeführt.
($v = s\,t^{-1}$)

Einheit

Zweckmäßig gewählte Größe der betreffenden Größenart. ($[m] = \mathrm{kg}$; $[v] = \mathrm{km\,h^{-1}}$)

Internationales Einheitensystem (SI)
ist gesetzliches Einheitensystem in der DDR.

Messen einer Größe

Feststellen, wie oft die Einheit der betreffenden Größenart in der zu messenden Größe enthalten ist.

Grundeinheiten (m, s, kg, K, A, mol, cd)
werden durch Festlegen eines Urmaßes (Naturkonstante oder Prototyp) definiert.

Abgeleitete Einheiten
werden durch Definitionsgleichungen (Einheitengleichungen) auf Grundeinheiten zurückgeführt.
($[v] = [s]\,[t]^{-1} = \mathrm{m\,s^{-1}}$)

1.2. Kohärente und inkohärente Einheiten

Kohärente Einheiten
werden aus den Grundeinheiten oder anderen kohärenten Einheiten unter ausschließlicher Verwendung des Zahlenfaktors 1 hergeleitet. ($1\,\mathrm{N} = 1\,\mathrm{kg\,m\,s^{-2}}$)

Inkohärente Einheiten
werden aus den Grundeinheiten hergeleitet, wobei Zahlenfaktoren $\neq 1$ auftreten:

- Der Zahlenfaktor ist eine Zehnerpotenz. Verwendung der gesetzlichen Vorsätze. ($1\,\mathrm{km} = 10^3\,\mathrm{m}$)
- Der Zahlenfaktor ist keine Zehnerpotenz. Systemfremde Einheiten. ($1\,\mathrm{kp} = 9{,}80665\,\mathrm{N}$)

1.3. Physikalische Gleichungen

Mathematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen physikalischen Größen.

Aussage physikalischer Gleichungen

Naturgesetz

Von der Natur dem Menschen vorgeschrieben.

- Allgemeines Prinzip
(Energiesatz $W_{\mathrm{ges}} = \mathrm{const}$)
- Funktionsgleichung, die eine zwischen definierten Größen experimentell bestimmte Proportionalität angibt. Der durch die Gleichung definierte Proportionalitätsfaktor ist eine Naturkonstante.
($s = {}^1/_2 g t^2$; $g = 9{,}81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$)

Definitionsgleichung

Willkürliche, aus Gründen der Zweckmäßigkeit vom Menschen getroffene Festlegung. Durch eine Definitionsgleichung wird eine Größe mit Hilfe anderer (bereits definierter) Größen definiert.
($a = v t^{-1}$)

Form physikalischer Gleichungen

Größengleichung

Die Symbole bedeuten Größen. Jede Größengleichung gilt unabhängig von der Wahl der Einheiten.

- Allgemeine Größengleichung

Der einfachste Ausdruck einer physikalischen Gesetzmäßigkeit oder der Definition einer Größe. Sie enthält nur Größensymbole und absolut genaue Zahlenfaktoren, z. B. 1, $^1/_2$, 2π.
($v = st^{-1}$; $s = {}^1/_2 g t^2$)

- Zugeschnittene Größengleichung

Ist zur Verwendung bestimmter Einheiten vorbereitet. Enthält Größensymbole, Einheitensymbole und einen Zahlenfaktor, der sich aus der Wahl der Einheiten ergibt.

$$\left(a_{/\mathrm{m\,s^{-2}}} = \frac{1}{3{,}6} \cdot \frac{v_{/\mathrm{km\,h^{-1}}}}{t_{/\mathrm{s}}} \right)$$

Zahlenwertgleichung

Symbole bedeuten Zahlenwerte. Angabe der zu verwendenden Einheiten notwendig.

$$\left(a = \frac{1}{3{,}6} \frac{v}{t}\ ; \quad \begin{array}{l} v \text{ in km h}^{-1} \\ t \text{ in s} \\ a \text{ in m s}^{-2} \end{array} \right)$$

Zahlenwertgleichungen sollten in der Physik nicht verwendet werden.

2. Kinematik

2.1. Grundbegriffe

Kinematik

beschreibt den Ablauf von Bewegungsvorgängen in Zeit und Raum, ohne die Ursachen oder Wirkungen des Geschehens zu berücksichtigen.

Bewegung (physikalische)

Lageänderung in einem Bezugssystem im Laufe der Zeit.

Relativität der Bewegung

Jede Bewegung ist relativ. Sie kann nur in bezug auf ein als ruhend angenommenes Bezugssystem beschrieben werden. Die Wahl des Bezugssystems ist beliebig.

Überlagerungssatz (Superpositionsprinzip) der Kinematik

Gleichzeitig ablaufende Bewegungen eines Körpers beeinflussen sich gegenseitig nicht. Resultierende Größen (Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung) ergeben sich durch vektorielle Addition der Komponenten.

Arten der Bewegung eines Körpers

- Translation (fortschreitende Bewegung): kongruente Bahnen der Körperpunkte.
- Rotation (Drehbewegung): Kreisbahnen der Körperpunkte um Drehachse.

Formen der Bewegung eines Massenpunkts

Merkmal	Allgemeiner Fall	Wichtige Sonderfälle
Bahn	krummlinige Bewegung	geradlinige Bewegung Kreisbewegung Wurfbewegung Schwingung
Geschwindigkeit	ungleichförmige Bewegung	gleichförmige Bewegung gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Massenpunkt

Oft verwendetes Abstraktionsmodell für einen Körper. Es wird von der Ausdehnung, nicht aber von der Masse des betreffenden Körpers abgesehen.

2.2. Geschwindigkeit und Beschleunigung

Definitionen von Geschwindigkeit und Beschleunigung

Weg, Betrag	s (Grundgrößenart)		m (Meter)
Zeit (Zeitdauer)	t (Grundgrößenart)		s (Sekunde)
Geschwindigkeit, Betrag	$v = \frac{ds}{dt} = \dot{s}$	(2.1′)	$\frac{m}{s}$; $\left(\frac{km}{h} = \frac{1}{3{,}6}\,\frac{m}{s}\right)$
Beschleunigung, Betrag	$a = \frac{dv}{dt} = \dot{v} = \frac{d^2 s}{dt^2} = \ddot{s}$	(2.2′)	$\frac{m}{s^2}$

Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung sind Vektorgrößen.

Durchschnittsgrößen
werden als Differenzenquotienten definiert:

Durchschnittsgeschwindigkeit	$v_m = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	(2.1)	$\frac{m}{s}$
Durchschnittsbeschleunigung	$a_m = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	(2.2)	$\frac{m}{s^2}$

Integralform der Definitionen von Weg und Geschwindigkeit

$$s(t) = \int_0^t v(t)\,dt; \qquad v(t) = \int_0^t a(t)\,dt$$

Aus jeweils einer der Funktionen $s(t)$, $v(t)$, $a(t)$ lassen sich die beiden anderen ermitteln.

$$a(t) \underset{\text{Differentiation}}{\overset{\text{Integration}}{\rightleftarrows}} v(t) \underset{\text{Differentiation}}{\overset{\text{Integration}}{\rightleftarrows}} s(t)$$

2.3. Geradlinige Bewegung

Bewegungsrichtungen
Vorwärts (+) und rückwärts (−)

Gleichförmige Bewegung
Bei geradliniger gleichförmiger Bewegung werden in gleichen Zeitspannen gleiche Wegstrecken zurückgelegt.
$a = 0$; $\quad v = \text{const}$

$$s = vt \qquad (2.1'') \qquad \text{m}$$

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit
Bei geradliniger gleichmäßig beschleunigter Bewegung nimmt die Geschwindigkeit in gleichen Zeitspannen um den gleichen Betrag zu oder ab.

$a = \text{const}$; $a > 0$ (positive) Beschleunigung
$\quad a < 0$ negative Beschleunigung = Verzögerung

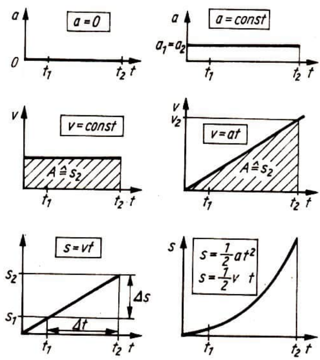
Beispiel: Freier Fall (Fall ohne Luftwiderstand) auf kurzem Fallweg: $a = g = 9{,}81\ \text{m s}^{-2}$

Gleichungen der geradlinigen gleichmäßig beschleunigten Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit

Nach Ablauf der Zeit t	Gleichung		Nicht vorkommende Größe
erreichte Endgeschwindigkeit	$v = v_0 + at$	(2.6)	s
zurückgelegter Weg	$s = v_0 t + \frac{a}{2} t^2$	(2.7)	v
	$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$	(2.8)	t
	$s = \frac{v + v_0}{2} t$	(2.9)	a
	$s = vt - \frac{a}{2} t^2$	(2.10)	v_0

Bewegungsdiagramme

- Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Beträgen jeweils zweier kinematischer Größen in einem kartesischen Koordinatensystem als Kurve. (Wichtig: s,t-, v,t-, a,t-Diagramme)
- Anstieg der Kurve (Tangentenrichtung) kennzeichnet im s,t-Diagramm: Geschwindigkeit, im v,t-Diagramm: Beschleunigung.
- Fläche, die im v,t-Diagramm von der Kurve und den zu zwei Zeitpunkten gehörenden Ordinaten begrenzt wird, stellt den zwischen den zwei Zeitpunkten zurückgelegten Weg dar (schraffierte Flächen).



Bewegungsdiagramme

gleichförmige Bewegung	gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Allgemeiner Fall der geradlinigen Bewegung

Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung: $a = a(t)$

Behandlung nur mit höherer Mathematik oder grafisch möglich (Beispiel: Sinusschwingung; → S. 38)

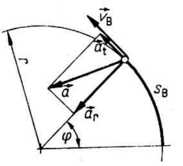
2.4. Kreisbewegung, Rotation

Größenarten und Einheiten der Kreisbewegung eines Massenpunktes

Ebener Winkel; Drehwinkel	$\varphi = \dfrac{s_B}{r}$	(2.11)	$\dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{m}} = \mathrm{rad} = 1$
	$\varphi = 2\pi z$	(2.20)	$\left(1^\circ = \dfrac{\pi}{180}\,\mathrm{rad}\right)$
Winkelgeschwindigkeit	$\omega = \dfrac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = \dot{\varphi}$	(2.14′)	$\dfrac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}} = \dfrac{1}{\mathrm{s}}$
Winkelbeschleunigung	$\alpha = \dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \dot{\omega} = \dfrac{\mathrm{d}^2\varphi}{\mathrm{d}t^2} = \ddot{\varphi}$	(2.15′)	$\dfrac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}^2} = \dfrac{1}{\mathrm{s}^2}$
Frequenz; Drehzahl (bei gleichförmiger Rotation)	$f = n = \dfrac{z}{\Delta t}$	(2.12)	$\dfrac{1}{\mathrm{s}} = \mathrm{Hz}$ (Hertz)
Kreisfrequenz; Betrag der Winkelgeschwindigkeit	$\omega = 2\pi f = 2\pi n$	(2.16)	$\left(\dfrac{1}{\mathrm{min}} = \dfrac{1}{60}\,\mathrm{Hz}\right)$
Periodendauer; Umlaufzeit	$T = \dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{n}$	(2.13)	s

Beschleunigung eines kreisenden Massenpunktes

Beschleunigung, Vektor	$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_t + \boldsymbol{a}_r$	(2.23)	$\dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$
Beschleunigung, Betrag	$a = \sqrt{a_t^2 + a_r^2}$	(2.23′)	
Tangentialbeschleunigung	$a_t = \dfrac{\Delta v_B}{\Delta t}$	(2.24)	
Radialbeschleunigung	$a_r = \dfrac{v_B^2}{r} = \omega^2 r$	(2.25) (2.25′)	



Analogie zwischen Kreisbewegung und geradliniger Bewegung

Größen

Winkel	φ	≙	Weg	s
Winkelgeschwindigkeit	ω	≙	Geschwindigkeit	v
Winkelbeschleunigung	α	≙	Beschleunigung	a

Gleichförmige und gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung

Es gelten (2.1″) und (2.6) bis (2.10) der geradlinigen Bewegung sowie die Bewegungsdiagramme von S. 6 wenn für s, v, a die analogen Größen φ, ω, α eingesetzt werden.

Gleichförmige Kreisbewegung	$\varphi = \omega t$	(2.17) ≙ (2.1″)
Gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung	$\omega = \omega_0 + \alpha t$	(2.18) ≙ (2.6)
	$\varphi = \omega_0 t + {}^1/_2 \alpha t^2$	(2.19) ≙ (2.7)

Zusammenhang zwischen Bahn- und Winkelgrößen

Bahngröße = Radius mal Winkelgröße

$s_B = r\varphi$ (2.11′); $v_B = r\omega$ (2.21); $a_B = r\alpha$ (2.22)

2.5. Bewegungen in der Ebene (und im Raum)

Überlagerungssatz

Eine Bewegung in 2 (3) Dimensionen wird als Überlagerung von 2 (3) geradlinigen Bewegungen aufgefaßt, die in Richtung der 2 (3) Koordinatenachsen verlaufen. Rechnerische und grafische Behandlung erfolgt nach den Regeln der Vektorrechnung (Zerlegung in Komponenten; Bildung der Resultierenden).

Jede krummlinige Bewegung ist beschleunigt, da sich die Richtung der Geschwindigkeit im Zeitablauf ändert.

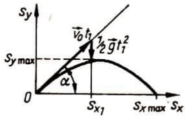
Wurfbewegung ohne Luftwiderstand

Überlagerung von gleichförmiger Bewegung in Wurfrichtung und von Fallbewegung. Bahn: Wurfparabel

Bahngleichung $$s_y = s_x \tan\alpha - \frac{g}{2v_0^2\cos^2\alpha}s_x^2 \qquad (2.26)$$

Wurfweite $$s_{x\,\max} = \frac{v_0^2}{g}\sin 2\alpha \qquad (2.27)$$

Wurfhöhe $$s_{y\,\max} = \frac{v_0^2\sin^2\alpha}{2g} \qquad (2.28)$$



3. Dynamik

3.1. Masse und Kraft

Masse — m (Grundgrößenart) — kg (Kilogramm)

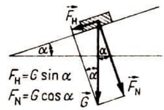
kennzeichnet

- Trägheit: Eigenschaft der Körper, sich der Änderung des Bewegungszustandes zu widersetzen.
- Schwere: Eigenschaft der Körper, sich wechselseitig anzuziehen.

Dichte (Stoffkonstante) $$\varrho = \frac{m}{V} \qquad (3.3)$$ $\mathrm{kg\,m^{-3}}$ ($\mathrm{g\,cm^{-3}} = 10^3\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$)

Kraft
Grundgleichung der Dynamik
(2. Newtonsches Axiom) $$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a} \qquad (3.4)$$ $\mathrm{kg\,m\,s^{-2}} = \mathrm{N}$ (Newton) (1 kp = 9,81 N)

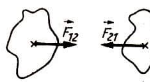
kennzeichnet Wechselwirkung zwischen Körpern (Anziehung oder Abstoßung), die beschleunigte Bewegung frei beweglicher Körper zur Folge hat. Die Kraft ist eine vektorielle Größenart. Zusammensetzen zur Resultierenden und Zerlegen in Komponenten erfolgt nach Parallelogrammsatz.



Trägheitssatz (1. Newtonsches Axiom)

Aus $F = ma$ folgt: $a = 0$ für $F = 0$. Jeder Körper verharrt in Ruhe oder geradliniger gleichförmiger Bewegung, solange keine Kraft auf ihn einwirkt oder die Resultierende der angreifenden Kräfte Null ist.

Wechselwirkungsprinzip
(3. Newtonsches Axiom) $$\boldsymbol{F}_{12} = -\boldsymbol{F}_{21} \qquad (3.5)$$



Kräfte treten immer paarweise als Wechselwirkungskräfte auf, die an verschiedenen Körpern angreifen; sie sind dem Betrag nach gleich, der Richtung nach entgegengesetzt.

Gegenkräfte

greifen paarweise an einem Körper in entgegengesetzten Richtungen an. Sind sie dem Betrag nach gleich, liegt Kräftegleichgewicht vor.

3.2. Spezielle Kräfte

Schwerkraft

Gewicht (Gewichtskraft)	$\boldsymbol{G} = m\boldsymbol{g}$	(3.6)	N

kennzeichnet die Kraft, die dieser Körper im Schwerefeld der Erde auf eine horizontale Unterlage ausübt. Für vorgegebenen Ort gilt $G \sim m$

Gravitationskraft, Betrag	$F_{\mathrm{Gr}} = \gamma \dfrac{m_1 m_2}{r^2}$	(3.7)	N

kennzeichnet die zwischen zwei Massenpunkten wirkende Anziehungskraft.

Gravitationskonstante (Naturkonstante)	$\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m^3\,kg^{-1}\,s^{-2}}$		
Fallbeschleunigung; Feldstärke im Schwerefeld, Betrag	$g = \gamma \dfrac{m_{\mathrm{E}}}{r^2}$ (für $r > r_{\mathrm{E}}$)	(3.9)	$\mathrm{m\,s^{-2}}$

kennzeichnet die Gravitationskraft im Schwerefeld der Erde. Hängt von der geografischen Breite und der Entfernung vom Erdmittelpunkt ab.

Mittlere Fallbeschleunigung	$g_{\mathrm{m}} = 9{,}81\ \mathrm{m\,s^{-2}}$
Normfallbeschleunigung	$g_{\mathrm{n}} = 9{,}806\,65\ \mathrm{m\,s^{-2}}$

Alle am gleichen Ort frei fallenden Körper bewegen sich mit gleicher Fallbeschleunigung.

Elastische Kräfte

Dehnung	$\varepsilon = \dfrac{\Delta s}{s_0}$	(3.10)	*Schiebung*	$\gamma = \dfrac{s_{\mathrm{t}}}{s_0}$	(3.11)	1
Normalspannung	$\sigma = \dfrac{F_{\mathrm{n}}}{A}$	(3.12)	*Schubspannung*	$\tau = \dfrac{F_{\mathrm{t}}}{A}$	(3.13)	$\mathrm{N\,m^{-2}}$
Hookesches Gesetz Im Bereich der Elastizitätsgrenze ist die Formänderung der einwirkenden Kraft proportional.						
	$\sigma = E\varepsilon$	(3.14)		$\tau = G\gamma$	(3.15)	$\mathrm{N\,m^{-2}}$
Elastizitätsmodul (Stoffkonstante)	$E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon}$	(3.14′)	*Schubmodul* (Stoffkonstante)	$G = \dfrac{\tau}{\gamma}$	(3.15′)	$\mathrm{N\,m^{-2}}$

Federkraft	$F_{\mathrm{F}} = -k\,\Delta s$	(3.16)	N

kennzeichnet die Kraft, die eine Feder einer Formänderung entgegensetzt.

Federkonstante; Richtgröße	$k = \left\lvert \dfrac{F_{\mathrm{F}}}{\Delta s} \right\rvert$	(3.16′)	$\mathrm{N\,m^{-1}}$

kennzeichnet „Härte“ der Feder.

Reibungskräfte

Reibungskraft, allgemein $F_R = \mu F_N$ (3.17) N

kennzeichnet die Wechselwirkungskraft F_R, die auftritt, wenn auf einen Körper, der bei Einwirkung einer Normalkraft F_N auf einem anderen Körper gleiten kann, eine Kraft F in Richtung der Berührungsfläche wirkt.

Reibungszahl (Stoffkonstante) $\mu = \dfrac{F_R}{F_N}$ (3.17′) 1

Haftreibungskraft (Maximalwert) $F_{RH\,max} = \mu_0 F_N$ (3.18) N

kennzeichnet Reibungskraft zwischen relativ zueinander ruhenden Körpern.

Haftreibungszahl $\mu_0 = \tan \alpha_{max}$ (3.19) 1

Die Haftreibungszahl ist gleich dem Tangens des *Reibungswinkels* α_{max}.

Gleitreibungskraft $F_{RG} = \mu_G F_N$ (3.20) N

kennzeichnet Reibungskraft zwischen aufeinander gleitenden Körpern.

Rollreibungskraft $F_{RR} = \mu_R F_N$ (3.21) N

Fahrwiderstand $F_{RF} = \mu_F F_N$ (3.22) N

Für ein vorgegebenes Paar von Materialien gilt $\mu_0 > \mu_G \gg \mu_R$.

Trägheitskraft

Trägheitskraft bei Translation $\boldsymbol{F}_T = -m\boldsymbol{a}$ (3.23) N

kennzeichnet die in einem beschleunigten Bezugssystem auftretende Scheinkraft. Sie ist der Beschleunigung des Bezugssystems entgegengerichtet.

Kräfteansatz nach d'Alembert $\boldsymbol{F}_B + \boldsymbol{F}_T = 0$ (3.24)

erlaubt die Lösung von dynamischen Problemen durch formale Bildung eines Kräftegleichgewichts aus beschleunigender Kraft und Trägheitskraft.

Kräfte bei Kreisbewegung eines Massenpunkts

Radialkraft; Zentripetalkraft $F_r = m \dfrac{v_B^2}{r} = m \omega^2 r$ (3.25) (3.25′) N

kennzeichnet die zum Drehzentrum gerichtete Zwangskraft, die die Kreisbahn erzwingt.

Fliehkraft; Zentrifugalkraft $F_Z = -F_r$ (3.26) N

kennzeichnet die in einem rotierenden Bezugssystem auftretende, radial nach außen gerichtete Trägheitskraft. Sie hat den gleichen Betrag wie die im ruhenden System beobachtete Radialkraft.

Corioliskraft $F_C = 2 m v \omega$ (3.28) N

kennzeichnet die Trägheitskraft, die in einem rotierenden Bezugssystem auf einen relativ zum System bewegten Körper einwirkt.

3.3. Mechanische Arbeit, Energie, Leistung und Wirkungsgrad

Arbeit
kennzeichnet *Vorgang* der Energieumwandlung (Energieumsatz).

Energie
kennzeichnet *Zustand* des Arbeitsvermögens. In der Mechanik unterscheidet man

- potentielle Energie (Lageenergie im Kraftfeld, Energie der gespannten Feder)
- kinetische Energie (Bewegungsenergie)

Mechanische Arbeit ($F = F(s)$) $\quad W = \int_{s_1}^{s_2} F(s) \cos\alpha \, ds \quad$ (3.29'')

Mechanische Arbeit (F = const) $\quad W = F s \cos\alpha \quad$ (3.29)

Joule: J = N m = W s = kg m² s⁻² (kp m = 9,81 J)

Die mechanische Arbeit ist das Wegintegral der Kraft. Sie wird im F, s-Diagramm durch die Fläche dargestellt, die sich über dem Weg s von der Abszissenachse bis zur Kraftkurve erstreckt.

Vorzeichendefinition: $W > 0$ für $0 < \alpha < 90°$: *Durch* die Kraft F wird Arbeit verrichtet.
$W < 0$ für $90° < \alpha < 180°$: *Gegen* die Kraft F wird Arbeit aufgewendet.

Eine Zwangskraft verrichtet keine Arbeit (wegen $\alpha = 90°$; $\cos\alpha = 0$).

Verschiebungsarbeit
kennzeichnet die ohne Beschleunigung eines Körpers verrichtete mechanische Arbeit.
(Bedingung: verschiebende Kraft = Gegenkraft)

Art der Verschiebungsarbeit	Wirkende Gegenkraft	Arbeit wird umgesetzt in	Gleichung		Einheit
Hubarbeit	Gewicht	potentielle Energie der Lage	$W_H = Gh = W_{pH}$	(3.30)	J
Spannarbeit	Federkraft	potentielle Energie der gespannten Feder	$W_F = \frac{F_{F\,max}}{2} s = \frac{1}{2} k s^2 = W_{pF}$	(3.31)	J
Reibungsarbeit	Reibungskraft	Wärmeenergie (nichtmechanische Energie)	$W_R = F_R s = \mu F_N s = Q$	(3.32)	J

Beschleunigungsarbeit $\quad$ wird umgesetzt in kinetische Energie $\quad W_B = F_B s = \frac{m}{2} v^2 = W_k \quad$ (3.37) $\quad$ J

kennzeichnet die allein zur Beschleunigung eines Körpers verrichtete mechanische Arbeit.
(Bedingung: Gegenkraft Null)

Energieerhaltungssatz der Mechanik
In einem abgeschlossenen System, in dem nur die Schwerkraft und (oder) Federkräfte wirken, ist die Summe von potentieller und kinetischer Energie konstant.

$$W_p + W_k = W_{ges} = \text{const} \qquad (3.38) \qquad \text{J}$$

Allgemeiner Energieerhaltungssatz (Energiesatz)

In einem abgeschlossenen System kann Energie weder gewonnen werden noch verlorengehen. Energie kann lediglich von einer Form in eine andere umgewandelt werden.

$$W_{ges} = \text{const} \qquad (3.39) \qquad \text{J}$$

Abgeschlossenes physikalisches System

System von Körpern, in dem nur innere Kräfte wirken. Mit anderen Systemen besteht keine Wechselwirkung und kein Energieaustausch.

Leistung

kennzeichnet den auf die Zeit bezogenen Energieumsatz.

Durchschnittsleistung $$P_m = \frac{\Delta W}{\Delta t} \qquad (3.40)$$

Momentanleistung $$P = \frac{dW}{dt} = F v \qquad (3.40'),\ (3.40'')$$

Watt: $\text{W} = \text{J s}^{-1} = \text{N m s}^{-1} = \text{kg m}^2\,\text{s}^{-3}$

Wirkungsgrad $$\eta = \frac{W_{ab}}{W_{zu}} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \qquad (3.41),\ (3.41') \qquad 1$$

kennzeichnet das Verhältnis von abgegebener zu zugeführter Energie bzw. von abgegebener zu zugeführter Leistung. Stets gilt:

$$0 < \eta < 1$$

3.4. Impuls, Kraftstoß, Massenmittelpunkt

Impuls $$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v} \qquad (3.43) \qquad \text{N s} = \text{kg m s}^{-1}$$

kennzeichnet das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit eines Körpers. (Impulsrichtung = Geschwindigkeitsrichtung)

Impulserhaltungssatz (Impulssatz) $$\boldsymbol{p}_{ges} = \text{const} \qquad (3.44) \qquad \text{N s}$$

In einem abgeschlossenen System ist der Gesamtimpuls konstant.

Kraftstoß ($\boldsymbol{F}$ = const) $$\boldsymbol{F}\Delta t = \Delta \boldsymbol{p} \qquad (3.45) \qquad \text{N s}$$

Kraftstoß ($\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}(t)$) $$\int_{t_1}^{t_2} \boldsymbol{F}(t)\,dt = m(\boldsymbol{v}_2 - \boldsymbol{v}_1) = \Delta \boldsymbol{p} \qquad (3.45') \qquad \text{N s}$$

kennzeichnet das Produkt aus Kraft und Zeitdauer der Kraftwirkung (Zeitintegral der Kraft). Der Kraftstoß ist gleich der Impulsänderung.

Momentankraft ($m \neq$ const) $$\boldsymbol{F} = \frac{d(m\boldsymbol{v})}{dt} = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt} = \dot{\boldsymbol{p}} \qquad (3.46') \qquad \text{N}$$

Die Kraft ist der Differentialquotient des Impulses nach der Zeit.

Mittlere Kraft ($m \neq$ const) $$\boldsymbol{F}_m = \frac{\Delta(m\boldsymbol{v})}{\Delta t} = \frac{\Delta \boldsymbol{p}}{\Delta t} \qquad (3.46) \qquad \text{N}$$

Unelastischer gerader Stoß

Anwendung des Impulserhaltungssatzes ergibt gemeinsame Geschwindigkeit beider Körper nach dem Stoß.

Geschwindigkeit nach unelastischem Stoß $$v_n = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} \qquad (3.48) \qquad \text{m s}^{-1}$$

Elastischer gerader Stoß

Anwendung sowohl des Impuls- als auch des Energieerhaltungssatzes ergibt die Geschwindigkeit der Körper nach dem Stoß.

Geschwindigkeiten nach elastischem Stoß

$$v_{n1} = v_1 \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} + v_2 \frac{2m_2}{m_1 + m_2}$$
$$v_{n2} = v_2 \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} + v_1 \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \qquad (3.49) \qquad \mathrm{m\,s^{-1}}$$

Massenmittelpunkt eines Systems von Massenpunkten

x-Koordinate:

$$x_M = \frac{\sum_{\nu=1}^{n} m_\nu x_\nu}{\sum_{\nu=1}^{n} m_\nu} \qquad (3.50) \qquad \mathrm{m}$$

Analoge Ausdrücke gelten für die y_M- und z_M-Koordinaten.

Bei Einwirken äußerer Kräfte auf ein System von Massenpunkten bewegt sich der Massenmittelpunkt so, als ob in ihm die Gesamtmasse des Systems vereinigt und der resultierenden Gesamtkraft unterworfen wäre.

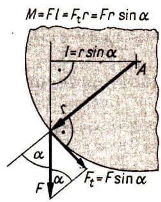
Erhaltungssatz des Massenmittelpunktes

Der Massenmittelpunkt eines abgeschlossenen Systems von Massenpunkten ist in Ruhe oder bewegt sich geradlinig gleichförmig (gleichbedeutend mit Impulserhaltungssatz).

3.5. Dynamik des starren Körpers

Drehmoment, Betrag $\qquad M = Fr\sin\alpha \qquad (3.51') \qquad \mathrm{N\,m\ (kp\,m)}$

kennzeichnet das Produkt aus Kraft F und Kraftarm $r\sin\alpha$.



- Der Kraftarm ist der Abstand der Wirkungslinie der Kraft von der Drehachse
- Vorzeichendefinition für Drehmoment: $M > 0$ Drehung *gegen* Uhrzeigersinn
  $M < 0$ Drehung *im* Uhrzeigersinn

Drehmoment eines Kräftepaares, Betrag $\qquad M = F_1 l = F_2 l \qquad (3.53)$

kennzeichnet die Wirkung zweier entgegengesetzt gerichteter, im Abstand l angreifender, dem Betrag nach gleicher Kräfte $F_1 = F_2$

Gleichgewichtsbedingungen am starren Körper

$$\sum F = 0; \qquad \sum M = 0 \qquad (3.54)$$

Am starren Körper herrscht Gleichgewicht, wenn sowohl die Summe aller Kräfte als auch die Summe aller Drehmomente um eine beliebige Drehachse verschwinden.

Schwerpunkt des starren Körpers

x-Koordinate (allgemein) $\qquad x_M = \frac{1}{m}\int\limits_{(m)} x\,\mathrm{d}m \qquad (3.55) \qquad \mathrm{m}$

x-Koordinate(für $\varrho = \mathrm{const}$) $\qquad x_M = \frac{1}{V}\int\limits_{(V)} x\,\mathrm{d}V \qquad (3.56) \qquad \mathrm{m}$

Für die y_M- und die z_M-Koordinaten gelten analoge Gleichungen.

Gleichgewichtsarten

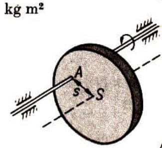
Gleichgewicht ist	stabil	labil	indifferent
Potentielle Energie des Schwerpunkts ist	Minimum	Maximum	Konstante

Massenträgheitsmoment $J = \int_{(m)} r^2 \mathrm{d}m$ (3.58′) kg m²

kennzeichnet den Trägheitswiderstand eines um eine vorgegebene Achse rotierenden Körpers gegen Änderung der Drehzahl. Das Massenträgheitsmoment eines Körpers hängt von der Lage der Drehachse ab.

Steinerscher Satz $J_A = J_S + m s^2$ (3.59) kg m²

ermöglicht die Berechnung des Trägheitsmoments eines Körpers bezüglich einer beliebigen Drehachse A, wenn das Massenträgheitsmoment J_S bezüglich der zu A parallelen Schwerpunktachse und der Abstand s der Achsen gegeben sind.



Analogiebeziehungen

Dynamik der Translation ≙ Dynamik der Rotation

$F \triangleq M$

$m \triangleq J$

Grundgleichung der Dynamik bei Rotation $M = J\alpha$ (3.60) N m

Das auf einen rotierenden Körper wirkende Drehmoment ist gleich dem Produkt aus dem Massenträgheitsmoment bezüglich der Drehachse des Körpers und der Winkelbeschleunigung.

Arbeit bei Rotation ($M = M(\varphi)$) $W_{\mathrm{rot}} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M(\varphi)\,\mathrm{d}\varphi$ (3.61′) J

Arbeit bei Rotation ($M = \mathrm{const}$) $W_{\mathrm{rot}} = M\varphi$ (3.61) J

Verdrillungsarbeit (Verschiebungsarbeit) $W_{\mathrm{F}} = \frac{M_{\max}}{2}\varphi = \frac{k'}{2}\varphi^2 = W_{\mathrm{pF}}$ (3.63) J

ist gleich der potentiellen Energie der gespannten Drehfeder.

Winkelrichtgröße der Drehfeder $k' = \left|\frac{M}{\varphi}\right|$ (3.62) $\frac{\mathrm{N\,m}}{\mathrm{rad}} = \mathrm{N\,m}$

Beschleunigungsarbeit bei Rotation ($M = \mathrm{const}$) $W_{\mathrm{B}} = M\varphi = \frac{J}{2}\omega^2 = W_{\mathrm{rot}}$ (3.64) J

ist gleich der kinetischen Energie des rotierenden Körpers.

Momentanleistung bei Rotation $P_{\mathrm{rot}} = M\omega = 2\pi n M$ (3.65) W

Drehimpuls, Drall bezüglich Hauptträgheitsachse $\boldsymbol{L} = J\boldsymbol{\omega}$ (3.67) N m s

Drehimpulserhaltungssatz $\boldsymbol{L}_{\mathrm{ges}} = \mathrm{const}$ (3.70) N m s

In einem abgeschlossenen System ist der Gesamtdrehimpuls konstant.

Antrieb, Drehmomentstoß ($M = \mathrm{const}$, $J = \mathrm{const}$) $M\Delta t = J(\omega_2 - \omega_1) = \Delta L$ (3.68) N m s

Der Antrieb ist gleich der Änderung des Drehimpulses.

Momentanes Drehmoment, Betrag $M = \frac{\mathrm{d}(J\omega)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t} = \dot{L}$ (3.69) N m

Das Drehmoment ist der Differentialquotient des Drehimpulses nach der Zeit.

4. Mechanik der Flüssigkeiten und Gase

4.1. Ruhende Flüssigkeiten und Gase

Druck in Flüssigkeiten und Gasen $p = \frac{F}{A}$ (4.1) $\mathrm{N\,m^{-2}} = \mathrm{Pa}$ (Pascal) (at, atm, mbar, Torr)

kennzeichnet die in Richtung der Flächennormalen wirkende auf die Fläche bezogene Kraft.

Statischer Druck, allgemein $p_{\mathrm{stat}} = p_{\mathrm{K}} + p_{\mathrm{S}}$ (4.2) Pa

ist die Summe aus Kolbendruck und Schweredruck.

Kolbendruck, allgemein $p_{\mathrm{K}} = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} = \mathrm{const}$ (4.3′) Pa

kennzeichnet den bei vernachlässigbarem Schweredruck im Innern und an den Grenzflächen einer Flüssigkeit (eines Gases) überall gleichen statischen Druck.

Kräfte bei der hydraulischen Presse $F_1 : F_2 = A_1 : A_2$ (4.3)

Gesetz von Boyle und Mariotte $pV = \mathrm{const}$ (4.4) J

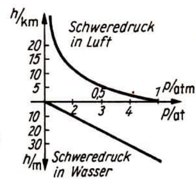
kennzeichnet den bei konstanter Temperatur bestehenden Zusammenhang zwischen Kolbendruck und Volumen einer Gasmenge.

Schweredruck, allgemein Pa

kennzeichnet den durch die Schwerkraft bedingten statischen Druck.

Schweredruck in Flüssigkeit $p_{\mathrm{S}} = \varrho g h$ (4.6)

ist proportional der Dichte ϱ der Flüssigkeit und der Tiefe h.



Schweredruck in Gas $p = p_0 \mathrm{e}^{\frac{-\varrho_0 g h}{p_0}}$ (4.7)

hängt vom Druck p_0 und der Gasdichte ϱ_0 in der Höhe $h = 0$ ab und nimmt exponentiell mit der Höhe h ab.

Überdruck $p_{\mathrm{Ü}} = p - p_{\mathrm{L}}$ (4.10)

kennzeichnet die Differenz zwischen Druck und Luftdruck.

Auftriebskraft $F_{\mathrm{A}} = \varrho_{\mathrm{F}} g V_{\mathrm{F}} = G_{\mathrm{F}}$ (4.11) N

kennzeichnet die als Folge des Schweredrucks auf einen in eine Flüssigkeit (ein Gas) eintauchenden Körper wirkende Kraft F_{A}. Sie ist gleich dem Gewicht G_{F} der vom Körper verdrängten Flüssigkeits- bzw. Gasmenge und dem Gewicht entgegengerichtet (Archimedisches Prinzip).
Ein allseitig von Flüssigkeit (Gas) umgebener Körper mit dem Gewicht G_{K}

sinkt, wenn $F_{\mathrm{A}} < G_{\mathrm{K}}$
schwebt, wenn $F_{\mathrm{A}} = G_{\mathrm{K}}$
steigt, wenn $F_{\mathrm{A}} > G_{\mathrm{K}}$

Gleichgewichtsbedingung für schwimmenden Körper $F_{\mathrm{A}} = G_{\mathrm{K}} = G_{\mathrm{F}}$ (4.12) N

Im Schwimmgleichgewicht ist das Gewicht G_{F} der vom teilweise eintauchenden Körper verdrängten Flüssigkeit gleich dem Körpergewicht G_{K}.

4.2. Strömende Flüssigkeiten und Gase

Ideale Flüssigkeit (ideales Gas)
Flüssigkeit (Gas) *ohne* innere Reibung (nur angenähert realisierbares Modell)

Reale Flüssigkeit (reales Gas)
Flüssigkeit (Gas) *mit* innerer Reibung

Stationäre Strömung
Für vorgegebenen Ort sind sowohl Strömungsrichtung als auch Strömungsgeschwindigkeit des strömenden Mediums zeitlich konstant.

Laminare Strömung
Teilchen des strömenden Mediums gleiten in dünnen Schichten aneinander vorbei, ohne sich zu vermischen.

Turbulente Strömung
Strömung mit Wirbelbildung

Stromstärke; Volumenstrom $$I = \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \dot{V} = A\,v \qquad (4.14) \qquad \mathrm{m^3\,s^{-1}}$$

kennzeichnet das auf die Zeit bezogene mit der Geschwindigkeit v durch die Querschnittsfläche A strömende Flüssigkeits- bzw. Gasvolumen.

Stromstärke
bei stationärer Strömung $$I = \frac{V}{t} = A\,v = \mathrm{const} \qquad \begin{matrix}(4.14')\\(4.13)\end{matrix} \qquad \mathrm{m^3\,s^{-1}}$$

ist räumlich und zeitlich konstant (Kontinuitätsgleichung).

Bernoullische Gleichung $$p + \varrho g h + \frac{1}{2}\varrho v^2 = \mathrm{const} \qquad (4.15') \qquad \mathrm{Pa}$$

ist der Energieerhaltungssatz für reibungsfreie Strömung.

Bernoullische Gleichung
für horizontale Strömung

Bei horizontaler Strömung ohne Reibung ist die Summe von statischem Druck und dynamischem Druck gleich dem konstanten Gesamtdruck.

	p	$+$	$\frac{1}{2}\varrho v^2$	$=$	$p_{\mathrm{ges}} = \mathrm{const}$ (4.16)	Pa
Bezeichnung der Größen:	statischer Druck	$+$	dynamischer Druck (Staudruck)	$=$	Gesamtdruck	
Meßgeräte:	Drucksonde		Prandtlsches Staurohr		Pitotrohr	

Innere Reibungskraft $$F = \eta A \frac{\Delta v}{\Delta x} \qquad (4.17) \qquad \mathrm{N}$$

kennzeichnet die bei laminarer Strömung an den Grenzflächen der Flüssigkeits- bzw. Gasschichten beim Geschwindigkeitsgefälle $\Delta v/\Delta x$ auftretende Reibungskraft.

Viskosität
kennzeichnet die Zähigkeit (innere Reibungskraft) des laminar strömenden Mediums.

Dynamische Viskosität (Stoffkonstante)	η		$\mathrm{N\,s\,m^{-2} = Pa\,s}$ (Zentipoise: $\mathrm{1\,cP = 10^{-3}\,Pa\,s}$)
Kinematische Viskosität (Stoffkonstante)	$\nu = \dfrac{\eta}{\varrho}$	(4.18)	$\mathrm{m^2\,s^{-1}}$ (Zentistokes: $\mathrm{1\,cSt = 10^{-6}\,m^2\,s^{-1}}$)
Stromstärke in engem Rohr bei laminarer Strömung	$I = \dfrac{\pi r^4 \Delta p}{8 \eta \Delta l}$	(4.20)	$\mathrm{m^3\,s^{-1}}$

kennzeichnet den in einem Rohr vom Radius r auf der Länge Δl auftretenden Druckabfall Δp (Gleichung von Hagen und Poiseuille).

Kraft auf laminar umströmte Kugel (Stokessche Gleichung)	$F = 6\pi\eta r v$	(4.21)	N
Strömungswiderstand für einen umströmten Körper	$F_W = \dfrac{1}{2}\varrho c_W A v^2$	(4.22)	N

kennzeichnet die Kraft, die in turbulenter Strömung (Dichte des Mediums ϱ; Geschwindigkeit v) auf einen Körper mit der Querschnittsfläche A (senkrecht zur Strömung gemessen) ausgeübt wird.

Widerstandsbeiwert; Widerstandszahl	c_W	(4.22)	1

kennzeichnet die Abhängigkeit des Strömungswiderstands von der Körperform.

5. Kinetische Theorie der Wärme

Mikroskopischer Zustand
kann nur durch statistische Mittelwerte der angegebenen Größen erfaßt werden. Eine Vielzahl von Teilchen gehorcht statistischen Gesetzen; das Verhalten des einzelnen Teilchens unterliegt *Schwankungen* (Abweichungen vom Mittelwert).
Wichtige *mikroskopische Größen* zur Kennzeichnung der Eigenschaften einer Gasmenge: mittlere Geschwindigkeit, mittlere kinetische Energie der Moleküle.
Kenntnis des mikroskopischen Zustands (Bestimmungsgrößen: Ort, Geschwindigkeit, Impuls, Energie des einzelnen Moleküls) ermöglicht prinzipielle Kenntnis des makroskopischen Zustands (Bestimmungsgrößen: Volumen, Druck, Temperatur) und umgekehrt.

Zustandsgrößen
Größen, die *makroskopisch* meßbar sind und einen thermischen Gleichgewichtszustand charakterisieren (Druck, Volumen, Temperatur, spezifisches Volumen, Dichte, innere Energie, Entropie, Enthalpie)

Stoffmenge	n (Grundgrößenart)	mol (Mol) (kmol = 10^3 mol)

kennzeichnet die Anzahl der Teilchen eines Systems.
Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das so viele Teilchen (z. B. Atome, Moleküle, Ionen) enthält, wie Atome in 12 g des Kohlenstoffs C12 enthalten sind.

Molare Größe, allgemein $X_m = \frac{X}{n}$

Quotient aus Größe X und Stoffmenge n

Spezifische Größe, allgemein $x = \frac{X}{m}$

Quotient aus Größe X und Masse m

Molare Masse $M = \frac{m}{n}$ (5.2) kg mol^{-1} (kg kmol^{-1})

ist die stoffmengenbezogene Masse.

Relative Molekülmasse eines Stoffes $M_r = \frac{\mu}{{}^1/_{12}\,\mu_{C12}} = M_{/\mathrm{kg\,mol^{-1}}}$ (5.1) (5.3) 1

kennzeichnet das Verhältnis der Masse μ eines Moleküls des Stoffes zu $^1/_{12}$ der Masse eines Moleküls von Kohlenstoff C12. Die relative Molekülmasse ist der Zahlenwert der molaren Masse des Stoffes.

Avogadro-Konstante; molare Teilchenzahl $N_A = \frac{N}{n} = 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}$ (5.4)

1 mol eines jeden Stoffes besteht aus $6{,}022 \cdot 10^{23}$ Teilchen.

Masse eines einzelnen Moleküls $\mu = \frac{M}{N_A}$ (5.7) kg

Molares Volumen $V_m = \frac{V}{n}$ (5.5) m^3 mol^{-1}

ist das stoffmengenbezogene Volumen.

Spezifisches Volumen $v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\varrho}$ (5.8) (5.8′) m^3 kg^{-1}

ist das auf die Masse bezogene Volumen. Das spezifische Volumen ist der Kehrwert der Dichte.

Thermodynamische Wahrscheinlichkeit $w = \left(\frac{V}{\Delta V}\right)^N$ (5.9) 1

kennzeichnet die Anzahl der Mikrozustände, mit denen ein gegebener Makrozustand realisiert werden kann.

Ideales Gas

Modellgas, dessen Moleküle kein Eigenvolumen haben und keine Anziehungskräfte aufeinander ausüben. Reale Gase verhalten sich angenähert wie das ideale Gas, wenn ihre Temperatur weit über ihrem Kondensationspunkt liegt (H_2, O_2, N_2, Edelgase bei Zimmertemperatur).

Mittlere kinetische Energie eines Moleküls des idealen Gases $\overline{W_{kin}} = \frac{3}{2}kT$ (5.11) J

kennzeichnet die Temperatur des Gases.

Boltzmann-Konstante (Naturkonstante) $k = 1{,}3807 \cdot 10^{-23}\ \mathrm{J\,K^{-1}}$

kennzeichnet die Energie, die einem Molekül des idealen Gases zugeführt werden muß, um die Temperatur des Gases um 1 K zu erhöhen.

Gaskonstante (Naturkonstante) $R = kN_A = 8314\ \mathrm{J\ kmol^{-1}\ K^{-1}}$ (5.12)

kennzeichnet die Energie, die einem Kilomol des idealen Gases zugeführt werden muß, um seine Temperatur um 1 K zu erhöhen.

Spezielle Gaskonstante (Stoffkonstante) $R^* = \dfrac{R}{M}$ (5.13‴) $\mathrm{J\ kg^{-1}\ K^{-1}}$

kennzeichnet die Energie, die einem Kilogramm eines als ideal zu betrachtenden Gases zugeführt werden muß, um dessen Temperatur um 1 K zu erhöhen. Die spezielle Gaskonstante ist von der Art des Gases abhängig.

Zustandsgleichung des idealen Gases

$$pV = nRT \quad (5.13'')$$

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (5.13)$$

$$pV = mR^*T \quad (5.13'''')$$

kennzeichnet die gegenseitige Abhängigkeit von Druck, Volumen, Temperatur einer Menge des idealen Gases.

Molares Normvolumen des idealen Gases bei Normalbedingungen $V_{m0} = 22{,}4138\ \mathrm{m^3\ kmol^{-1}}$

Normalbedingungen

$$p_0 = 1{,}000\ \mathrm{atm} = 1{,}01325 \cdot 10^5\ \mathrm{Pa}$$

$$T_0 = 273{,}15\ \mathrm{K}$$

Gleichverteilungssatz

Auf jeden Freiheitsgrad eines Moleküls entfällt im räumlichen und zeitlichen Mittel die Energie $\overline{W} = \dfrac{1}{2} kT$.

Freiheitsgrad

kennzeichnet die voneinander unabhängigen Koordinaten, durch die der Bewegungszustand eines Körpers eindeutig festgelegt ist.

Innere Energie U J

kennzeichnet die in einem Körper als potentielle und kinetische Energie der Atome oder Moleküle gespeicherte Energie (Zustandsgröße; Definition s. 1. Hauptsatz S. 21)

6. Thermodynamik

6.1. Temperatur, Wärmeenergie, 1. Hauptsatz

Temperatur

Temperatur (thermodynamische) T (Grundgrößenart) K (Kelvin)

kennzeichnet die mittlere kinetische Energie der Moleküle eines Körpers.

Das Kelvin ist der 273,16te Teil der Temperatur des Tripelpunktes von Wasser (s. S. 24).

Temperaturnullpunkt: $T = 0 \quad \triangleq \quad \overline{W_{\mathrm{kin}}} = 0$

Celsiustemperatur $t_{/°\mathrm{C}} = T_{/\mathrm{K}} - 273{,}15$ (6.1) °C

Temperaturdifferenzen $\Delta t = \Delta T$ (6.1′) K

werden stets in der Einheit Kelvin angegeben.

Ausdehnung fester und flüssiger Körper bei Erwärmung

Längenänderung	$\Delta l = \alpha l_1 \Delta T$	(6.2)	m
Endlänge	$l_2 = l_1(1 + \alpha \Delta T)$	(6.2′)	m
Längenausdehnungskoeffizient (Stoffkonstante)	α	(6.2)	K^{-1}

kennzeichnet die auf die Temperaturdifferenz bezogene relative Längenänderung.

Volumenänderung	$\Delta V = \gamma V_1 \Delta T$	(6.3)	m^3
Endvolumen	$V_2 = V_1(1 + \gamma \Delta T)$	(6.3′)	m^3
Raumausdehnungskoeffizient (Stoffkonstante)	$\gamma \approx 3\alpha$	(6.4)	K^{-1}
Enddichte	$\varrho_2 = \dfrac{\varrho_1}{1 + \gamma \Delta T}$	(6.5)	$kg\ m^{-3}$

Energieumwandlungen

Wärmeenergie, Wärmemenge Q — J (1 cal = 4,1868 J)

kennzeichnet die Energie der Molekularbewegung, die von einem Körper höherer Temperatur auf einen Körper tieferer Temperatur übergeht.

Mit Wärmeumsatz verbundene energetische Vorgänge

Vorgang	Dabei tritt auf	Gleichung		Stoffkonstante	Einheit der Konstanten
Temperaturänderung	Wärmemenge (Temperaturänderungswärme)	$Q \doteq cm\Delta T$	(6.6)	spezifische Wärmekapazität c	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
Schmelzen (Erstarren)	Schmelzwärme (Erstarrungswärme)	$Q_{sm} = qm$	(6.50)	spezifische Schmelzwärme q	$J\ kg^{-1}$
Verdampfen (Kondensieren)	Verdampfungswärme (Kondensationswärme)	$Q_{sd} = rm$	(6.50)	spezifische Verdampfungswärme r	$J\ kg^{-1}$
Verbrennung – fester und flüssiger Brennstoffe	Verbrennungswärme	$Q = Hm$	(6.9)	Heizwert H	$J\ kg^{-1}$
– gasförmiger Brennstoffe		$Q = H'V$	(6.9′)	Heizwert H'	$J\ m^{-3}$
Reibung	Reibungswärme	$Q = W_R = F_R s$	(3.32)		
Elektrischer Strom durch Widerstand	Elektrowärme	$Q = W_{el} = I^2Rt$	(7.12)		

Wärmekapazität eines Körpers $\quad C = \dfrac{Q}{\Delta T} = cm \quad$ (6.6′) $\quad J\ K^{-1}$

kennzeichnet die dem Körper zuzuführende Wärmemenge, um dessen Temperatur um ΔT zu erhöhen.

Kalorimetrie (Messung der Wärmeenergie)
erfolgt durch Anwendung des Energieerhaltungssatzes. Es gilt:

$$\left.\begin{array}{l}\text{von den wärmeren Körpern}\\ \text{abgegebene Wärmeenergie}\end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{l}\text{von den kälteren Körpern}\\ \text{aufgenommene Wärmeenergie}\end{array}\right.$$

$$\Sigma Q_{\mathrm{ab}} = \Sigma Q_{\mathrm{auf}}$$

Mischungstemperatur für n Körper
$$t_m = \frac{c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2 + \cdots + c_n m_n t_n}{c_1 m_1 + c_2 m_2 + \cdots + c_n m_n} \qquad (6.8') \qquad °\mathrm{C}$$

1. Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltungssatz)

$$dQ = \mathrm{d}U + \mathrm{d}W$$
$$Q = \Delta U + W \qquad (6.10) \qquad \mathrm{J}$$

Die einem System zugeführte (entnommene) Wärmeenergie ist gleich der Summe aus der Änderung der inneren Energie des Systems und der vom System abgegebenen (aufgenommenen) Arbeit. Definitionsgleichung für die Änderung der inneren Energie.

Vorzeichendefinition:

$$\xrightarrow[\text{System nimmt Wärme auf}]{\mathrm{d}Q > 0} \boxed{\begin{array}{c}\mathrm{d}U > 0\\ \text{Zunahme}\\ \text{der inneren}\\ \text{Energie}\end{array}} \xrightarrow[\text{System verrichtet Arbeit}]{\mathrm{d}W > 0}$$

Ausdehnungsarbeit (Volumenänderungsarbeit)
$$W = \int_{V_1}^{V_2} p\,\mathrm{d}V \qquad (6.11') \qquad \mathrm{J}$$

ist die Arbeit, die eine Gasmenge bei Änderung ihres Volumens verrichtet.

Enthalpie
$$H = U + pV \qquad (6.43) \qquad \mathrm{J}$$

ist die Summe aus innerer Energie und Volumenarbeit. Sie ist eine Zustandsgröße. Die Enthalpiezunahme kennzeichnet die Wärmemenge, die einem Körper (einer Gasmenge) bei konstantem Druck zugeführt wird.

6.2. Zustandsänderungen des idealen Gases

Zustandsgleichung des idealen Gases
$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \mathrm{const} \qquad (6.13)$$

gibt den Zusammenhang zwischen Druck, Volumen, Temperatur einer vorgegebenen Menge des idealen Gases an.

Spezifische Wärmekapazitäten des idealen Gases — für $V = \mathrm{const}$: c_v; für $p = \mathrm{const}$: c_p — Es ist $c_p > c_v$ — $\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$

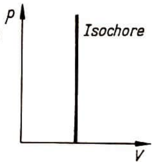
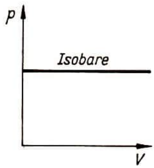
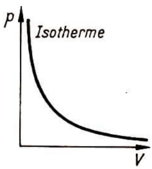
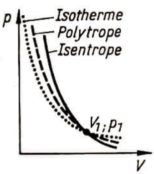
Mayersche Gleichung
$$c_p - c_v = \frac{R}{M} \qquad (6.25) \qquad \mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$$

Adiabatenexponent
$$\varkappa = \frac{c_p}{c_v} \qquad (6.29) \qquad 1$$

für einatomiges Gas: $\varkappa = 1{,}67$; für zweiatomiges Gas: $\varkappa = 1{,}4$

Innere Energie des idealen Gases
$$U = c_v m T \qquad (6.21') \qquad \mathrm{J}$$

Enthalpie des idealen Gases
$$H = c_p m T \qquad \mathrm{J}$$

Zustands-änderung	p, V-Diagramm	Gleichung	1. Hauptsatz	Zugeführte Wärme	Abgegebene Arbeit
Vollkommener Wärmeaustausch mit Umgebung (Idealfall)					
Isochor (V = const) $\mathrm{d}V = 0$ $\mathrm{d}W = 0$		$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ (6.18)	$\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U$ (6.19)	$Q = c_v m (T_2 - T_1)$ (6.20)	$W = 0$
Isobar (p = const) $\mathrm{d}p = 0$		$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ (6.22)	$\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U + \mathrm{d}W$ (6.10)	$Q = c_p m (T_2 - T_1)$ (6.23)	$W = p(V_2 - V_1)$ (6.24)
Isotherm (T = const) $\mathrm{d}T = 0$ $\mathrm{d}U = 0$		$p_1 V_1 = p_2 V_2$ (6.14)	$\mathrm{d}Q = p\,\mathrm{d}V$ (6.15)	$Q = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ (6.17) $Q = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}$ (6.16′)	$W = Q$
Kein Wärmeaustausch mit Umgebung (Idealfall)					
Isentrop, Adiabatisch (Q = const) $\mathrm{d}Q = 0$		$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\varkappa-1}$ (6.30) $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}$ (6.31) $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\varkappa}$ (6.32)	$p\,\mathrm{d}V = -\mathrm{d}U$ (6.28)	$Q = 0$	$W = \frac{m}{M} \frac{R}{\varkappa - 1} (T_1 - T_2)$ (6.33)
Unvollständiger Wärmeaustausch mit Umgebung (Realfall)					
Polytrop $\mathrm{d}Q \neq 0$			$\mathrm{d}W = \mathrm{d}Q - \mathrm{d}U$	$Q \neq 0$	

Für die polytrope Zustandsänderung gelten die Gleichungen der isentropen Zustandsänderung, wenn anstelle des Adiabatenexponenten $\varkappa$ der Polytropenexponent k gesetzt wird.
Es gilt: $1 < k < \varkappa$; praktisch vorkommende Werte: $1{,}1 \leqq k \leqq 1{,}3$

6.3. Kreisprozesse und 2. Hauptsatz

Kreisprozeß

Bei einem Kreisprozeß erfolgen mehrere Zustandsänderungen nacheinander so, daß der ursprüngliche Zustand wieder erreicht wird. Alle periodisch arbeitenden Wärmekraftmaschinen führen Kreisprozesse aus.

Reversible und irreversible Prozesse

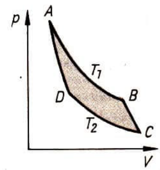
- Reversibler Prozeß: Vorgang, der zwischen einem Anfangszustand und einem Endzustand abläuft und der in umgekehrter Richtung so ablaufen kann, daß der Anfangszustand vollkommen wieder erreicht wird, ohne daß eine Änderung der Umgebung zurückbleibt.
- Irreversibler Prozeß: Prozeß, der nicht reversibel ist. Alle mit Reibung verbundenen Prozesse sind irreversibel.

Carnot-Prozeß (idealer Kreisprozeß)

Bedingungen: ideales Gas; quasistatische Führung des Prozesses (reversibel ablaufend mit infinitesimalen Temperaturdifferenzen beim Wärmeaustausch).

Verlauf: 4 Zustandsänderungen

1. isotherme Expansion von A nach B
2. isentrope Expansion von B nach C
3. isotherme Kompression von C nach D
4. isentrope Kompression von D nach A



Gas nimmt Wärmeenergie $Q_1 > 0$ bei hoher Temperatur T_1 auf.

Diese wird zum Teil

umgewandelt in mechanische Energie W (Nutzenergie)	bei tieferer Temperatur abgegeben als Wärmeenergie $Q_2 < 0$ (Verlustwärme)

Thermischer Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad (6.40) \qquad 1$$

ist der bei einem beliebigen Kreisprozeß maximal mögliche (in der Praxis nicht zu erreichende) Wirkungsgrad.

Kältemaschine, Wärmepumpe

Durch Aufwand mechanischer Energie wird Wärmeenergie bei tiefer Temperatur aufgenommen (Kühlwirkung der Kältemaschine) und bei hoher Temperatur abgegeben (Heizwirkung der Wärmepumpe).

Leistungszahl der Kältemaschine

$$\varepsilon_K = \left|\frac{Q_2}{W}\right| = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \qquad (6.41) \qquad 1$$

kennzeichnet das Verhältnis von bei tiefer Temperatur T_1 aufgenommener Wärmeenergie Q_2 zur verrichteten Arbeit W.

Leistungszahl der Wärmepumpe

$$\varepsilon_W = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1 \qquad (6.42) \qquad 1$$

kennzeichnet das Verhältnis der bei hoher Temperatur T_1 abgegebenen Wärmeenergie Q_1 zur verrichteten Arbeit W.

Entropie

$$S = k \ln w \qquad (6.45) \qquad \mathrm{J\,K^{-1}}$$

ist eine Zustandsgröße. Sie kennzeichnet den Unordnungszustand eines Systems. Sie ist dem Logarithmus der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit proportional (k Boltzmann-Konstante).

Entropieänderung für quasistatischen Prozeß

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \qquad (6.46) \qquad \mathrm{J\,K^{-1}}$$

ist das Integral über die beim Prozeß umgesetzte reduzierte Wärmemenge

2. Hauptsatz der Thermodynamik

- In einem abgeschlossenen System verlaufen alle Vorgänge so, daß die Entropie nicht abnimmt; bei irreversiblen Prozessen wächst sie, bei reversiblen bleibt sie konstant:

$$\Delta S \geqq 0 \qquad (6.48) \qquad \mathrm{J\,K^{-1}}$$

oder

- Wärmeenergie geht von selbst nur von Stellen höherer Temperatur zu Stellen tieferer Temperatur über.

oder

- Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts weiter leistet als einem Wärmebehälter Wärme zu entziehen und diese in mechanische Energie umzusetzen.

6.4. Phasenänderungen

Phase

Homogenes, durch Trennflächen abgegrenztes Zustandsgebiet innerhalb eines inhomogenen Stoffsystems (Beispiel: Eis, flüssiges Wasser, Wasserdampf).

Phasenänderungen

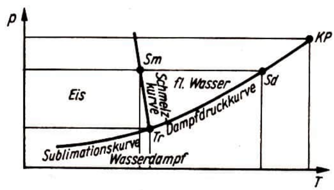
in einem System sind mit Energieaufnahme bzw. -abgabe verbunden: Umwandlungsenergie (Schmelzwärme, Verdampfungswärme; siehe S. 20).

Umwandlungspunkt

Temperatur, bei der ein reiner Stoff von einer Phase in eine andere übergeht (Schmelzpunkt, Siedepunkt). Umwandlungspunkte sind druckabhängig.

Zustandsdiagramm

Druck-Temperatur-Diagramm, dem die Abhängigkeit der Phasen und der Umwandlungspunkte eines Systems von Druck und Temperatur zu entnehmen ist.



Tripelpunkt

Druck und Temperatur, bei denen drei Phasen (fest, flüssig, gasförmig) im Gleichgewicht stehen.

Kritischer Zustand eines Gases

- Kritische Temperatur: Oberhalb dieser Temperatur ist eine Verflüssigung auch unter Druck nicht möglich.
- Kritischer Druck: Dampfdruck bei der kritischen Temperatur.

Luftfeuchte

- Absolute Luftfeuchte $f = \frac{m_D}{V}$ (6.52) $\mathrm{kg\,m^{-3}}$ ($\mathrm{g\,m^{-3}}$)

kennzeichnet die Dichte des in der Luft enthaltenen Wasserdampfs.

- Sättigungsmenge $f_{max} = \frac{m_{D\,max}}{V}$ (6.52′) $\mathrm{kg\,m^{-3}}$ ($\mathrm{g\,m^{-3}}$)

kennzeichnet die maximale (von der Temperatur abhängige) absolute Luftfeuchte.

- Relative Luftfeuchte (Sättigungsgrad) $\varphi = \frac{f}{f_{max}}$ (6.53) 1 (Angabe in %)

kennzeichnet das Verhältnis zwischen der absoluten Luftfeuchte und der bei der jeweiligen Temperatur maximal möglichen Luftfeuchte.

- Taupunkt: Temperatur, auf die eine vorgegebene Luftmenge abgekühlt werden muß, damit die relative Luftfeuchte 100% beträgt.

Übersicht über den Gaszustand (Gase und Dämpfe)

Gaszustand			
Reale Gase im weitesten Sinne			Ideales Gas
Dämpfe			
	Gase		
Gesättigter Dampf	Ungesättigter (überhitzter) Dampf	Quasiideales Gas	
ist die gasförmige Phase eines Stoffes, der mit der flüssigen Phase im thermodynamischen Gleichgewicht steht. Bei Kompression tritt Verflüssigung ein, ohne daß der Druck sich ändert.	ist ein reales Gas im engeren Sinne		
	Beispiele:		
	CO_2, Cl_2, NH_3, SO_2	H_2, O_2, N_2, He	keine physikalische Realität
	bei Normalbedingungen und noch höheren Temperaturen		
Die Zustandsgleichung des idealen Gases gilt			
nicht	nur angenähert	in sehr guter Näherung	exakt
Der Sättigungsdruck hängt allein von der Temperatur, nicht vom Volumen ab. Er steigt mit der Temperatur.	Es gilt die van-der-Waalssche Gleichung: $\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$ (6.51)		

6.5. Wärmetransport

Wärmestrom $\Phi = \frac{dQ}{dt} = \dot{Q}$ (6.55) $J\,s^{-1} = W$

kennzeichnet die auf die Zeit bezogene umgesetzte Wärmeenergie.

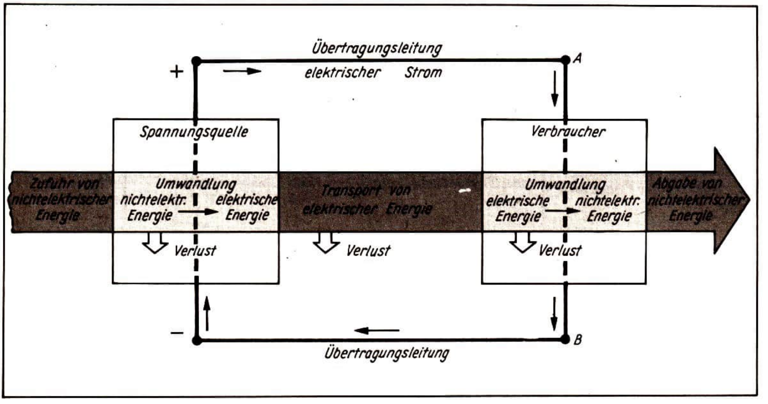
Gleichungen für den Wärmetransport

Art des Wärmetransports	Übertragene Wärmemenge	Stoffkonstante	Einheit
Wärmeleitung (durch ebene Wand)	$Q = \lambda \frac{A t \Delta T}{l}$ (6.54)	Wärmeleitfähigkeit λ	$J\,(m\,h\,K)^{-1}$
Wärmeübergang von festem Körper auf Flüssigkeit oder Gas	$Q = \alpha A t \Delta T$ (6.58)	Wärmeübergangskoeffizient α	$J\,(m^2\,h\,K)^{-1}$
Wärmedurchgang durch eine Trennwand zwischen zwei Medien	$Q = k A t \Delta T$ (6.59)	Wärmedurchgangskoeffizient k $\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{l}{\lambda}$ (6.60)	$J\,(m^2\,h\,K)^{-1}$

7. Gleichstromkreis

7.1. Grundbegriffe und Grundgesetze

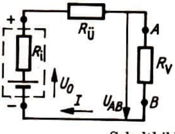
Einfacher Stromkreis



Schematische Darstellung der Schaltelemente und des Energieflusses

Der einfache Stromkreis besteht aus

- Spannungsquelle: Schaltelement zur Umwandlung von nichtelektrischer in elektrische Energie (Ladungstrennung). Beispiele: galvanisches Element, Akkumulator, Generator
- Übertragungsleitung: Energietransport in elektrischer Form (elektrischer Strom)
- Verbraucher: Schaltelement zur Umwandlung elektrischer in nichtelektrische Energie. Beispiele: Heizgerät, Motor



Schaltbild

Im elektrischen Stromkreis wird Energie übertragen. In allen Teilen des Stromkreises entstehen Verluste an Nutzenergie (Wärmeentwicklung). Oft können die Verluste in der Übertragungsleitung vernachlässigt werden ($R_{Ü} = 0$).

Elektrischer Trägerstrom (Modell)
Geschlossener Kreislauf strömender Ladungsträger

- in Metallen: quasifreie Elektronen (Elektronengas)
- in Flüssigkeiten und Gasen: Elektronen und Ionen

Stromrichtung
ist positiv in Bewegungsrichtung positiver Ladungsträger.

Stromstärke I (Grundgrößenart) A (Ampere)

kennzeichnet die in vorgegebener Zeit durch Leiterquerschnitt strömende Ladung.

Ladung (Elektrizitätsmenge) $Q = It$ (7.2′) A s = C (Coulomb)

ist eine Erhaltungsgröße. Innerhalb eines abgeschlossenen Systems kann sie weder verschwinden noch entstehen.

Elementarladung (Naturkonstante) $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C

ist die kleinste Ladung, die bisher beobachtet wurde. Ladung des Elektrons: $-e$; Ladung des Protons: $+e$

Spannung $U = \dfrac{\Delta W}{Q}$ (7.3) $\mathrm{J\,C^{-1} = W\,A^{-1}}$ = V (Volt)

kennzeichnet den auf die Ladung bezogenen Energieumsatz zwischen zwei Punkten eines Stromkreises.

- Urspannung $U_0 = \dfrac{\Delta W}{Q}$ (7.3″) V

Spannung, die an den Polen einer Spannungsquelle bei $I = 0$ gemessen wird. Positive Richtung der Urspannung: Antriebsrichtung auf positive Ladung

- Spannungsabfall $U_{AB} = \dfrac{\Delta W_{AB}}{Q}$ (7.3′) V

Spannung zwischen zwei Punkten A und B eines stromdurchflossenen Verbrauchers (Widerstands). Positive Richtung des Spannungsabfalls: Richtung der Stromstärke

Potential $\varphi = \dfrac{W}{Q}$ (7.4) V

kennzeichnet den elektrischen Energiezustand der Ladung an einem vorgegebenen Punkt. Bezugspunkt ist das (willkürlich festgelegte) Nullpotential, meist Erdpotential.

Potentialdifferenz $\varphi_A - \varphi_B = U_{AB}$ (7.4′) V

zwischen zwei Punkten ist gleich der Spannung zwischen diesen beiden Punkten.

Leitwert (Definition) $G = \dfrac{I}{U}$ (7.5) $\mathrm{A\,V^{-1}}$ = S (Siemens)

kennzeichnet das Leitvermögen eines Schaltelements.

Widerstand (Definition) $R = \dfrac{1}{G} = \dfrac{U}{I}$ (7.6) (7.7) $\mathrm{V\,A^{-1}} = \Omega$ (Ohm)

ist der Kehrwert des Leitwerts

Idealer Leiter: $R \to 0$ $G \to \infty$

Isolator: $R \to \infty$ $G \to 0$

Leitwert eines Drahtes (Bemessungsgleichung) $G = \varkappa \dfrac{A}{l}$ (7.10) S

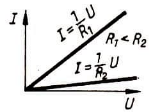
Elektrische Leitfähigkeit (Stoffkonstante) $\varkappa$ $\mathrm{S\,m^{-1}}$

Widerstand eines Drahtes (Bemessungsgleichung) $R = \varrho \dfrac{l}{A}$ (7.8) Ω

Spezifischer Widerstand (Stoffkonstante) $\varrho = \dfrac{1}{\varkappa}$ Ω m ($\Omega\,\mathrm{mm^2\,m^{-1}}$)

Ohmsches Gesetz $$R = \frac{U}{I} = \text{const} \qquad (7.7') \qquad \Omega$$

Für viele Leiter, insbesondere metallische Leiter, ist der Widerstand konstant, d.h. unabhängig von Strom und Spannung (Voraussetzung: konstante Temperatur).



Ohmscher Widerstand

heißt ein Widerstand, für den das Ohmsche Gesetz gilt. Die Strom-Spannungs-Kennlinie ist eine Gerade, die um so steiler verläuft, je kleiner der Widerstand ist.

Elektrische Energie, elektrische Arbeit $$W = UIt \qquad (7.12) \qquad \text{V A s} = \text{J (W s; kW h)}$$

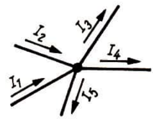
kennzeichnet die an einem Widerstand umgesetzte Energie.

Elektrische Leistung $$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \qquad (7.11)\ (7.11') \qquad \text{V A} = \text{W (kW)}$$

Kirchhoffsche Gesetze

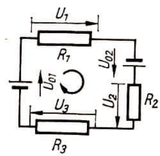
ermöglichen die Berechnung von Stromstärken, Spannungen, Widerständen in beliebig verzweigten Gleichstromkreisen. Man stellt für n gesuchte Größen n lineare Gleichungen auf.

1. Kirchhoffsches Gesetz, Knotenpunktsatz $$\sum I_{zu} = \sum I_{ab} \qquad (7.13)$$



In einem Knotenpunkt ist die Summe der Stromstärken der zufließenden Ströme gleich der Summe der Stromstärken der abfließenden Ströme.

2. Kirchhoffsches Gesetz, Maschensatz $$\sum_{\mu=1}^{m} U_{0\mu} = \sum_{\nu=1}^{n} U_\nu = \sum_{\nu=1}^{n} I_\nu R_\nu \qquad (7.14)$$



In einer Masche ist die Summe der Urspannungen gleich der Summe der Spannungsabfälle.

Innerer Widerstand einer Spannungsquelle $$R_i = \frac{U_i}{I}$$

verursacht den zwischen den Klemmen der Spannungsquelle bei Stromfluß auftretenden Spannungsabfall U_i und den damit verbundenen Energieverlust in der Spannungsquelle.

Klemmenspannung im einfachen Stromkreis $$U_k = U_0 - IR_i \qquad (7.15) \qquad \text{V}$$

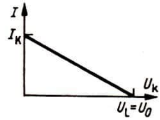
ist um den inneren Spannungsabfall geringer als die Urspannung. Sie nimmt mit steigender Stromstärke ab.

Stromstärke im einfachen Stromkreis $$I = \frac{U_0}{R_a + R_i} \qquad (7.16) \qquad \text{A}$$

hängt bei gegebener Spannungsquelle nur vom äußeren Widerstand ab (wegen $U_0 = \text{const}$ und $R_i = \text{const}$).

Sonderfälle im einfachen Stromkreis

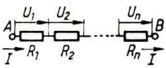
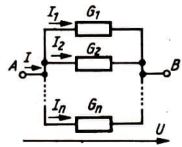
- Leerlauf: $R_a \to \infty$ $\quad I = 0$ $\quad U_k = U_L = U_0$
- Kurzschluß: $R_a \to 0$ $\quad I_K = \dfrac{U_0}{R_i}$ $\quad U_k = 0$
- Anpassung: $R_a = R_i$ $\quad P_a = P_{a\,max}$



Bei Anpassung wird im äußeren Stromkreis die maximale Leistung umgesetzt.

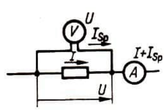
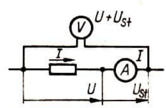
7.2. Ersatzschaltungen

Spannung, Stromstärke, Ersatzwiderstand (-leitwert) bei Reihen- und Parallelschaltung

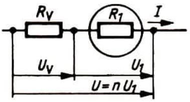
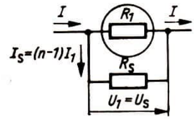
	Reihenschaltung	Parallelschaltung
Schaltbild		
Spannung	$U_{AB} = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$ Gesamtspannung = Summe der Teilspannungen *Spannungsteilerregel:* $U_\nu : U_\mu = R_\nu : R_\mu$ Die Teilspannungen sind proportional den entsprechenden Teilwiderständen.	$U_1 = U_2 = \cdots = U_n = U_{AB}$ Der Spannungsabfall ist an allen Widerständen gleich.
Stromstärke	$I_1 = I_2 = \cdots = I_n = I$ Die Stromstärke ist in allen Widerständen gleich.	$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n$ Gesamtstromstärke = Summe der Teilstromstärken *Stromteilerregel:* $I_\nu : I_\mu = R_\mu : R_\nu$ Die Teilstromstärken sind umgekehrt proportional den entsprechenden Teilwiderständen.
Widerstand	$R_{ers} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n; \quad R_{ers} > R_\nu$ Der Ersatzwiderstand ist die Summe der Teilwiderstände.	$\frac{1}{R_{ers}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}; \quad R_{ers} < R_\nu$
Leitwert	$\frac{1}{G_{ers}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \cdots + \frac{1}{G_n}; \quad G_{ers} < G_\nu$	$G_{ers} = G_1 + G_2 + \cdots + G_n; \quad G_{ers} > G_\nu$ Der Ersatzleitwert ist die Summe der Teilleitwerte.

7.3. Anwendungen in der Meßtechnik

Messung von Stromstärke und Spannung

	Spannungsrichtige Messung	Stromrichtige Messung
Schaltbild		
Anzeige am Spannungsmesser	U	$U + U_{St} = U + IR_{St}$
Anzeige am Strommesser	$I + I_{Sp} = I + \frac{U}{R_{Sp}}$	I
Keine Korrektur, wenn	$R_{Sp} \gg R$	$R_{St} \ll R$

Meßbereichserweiterung
(n-fache Erweiterung; R_1 Widerstand des Meßgeräts)

Gerät	Spannungsmesser	Strommesser
Schaltbild		
Es wird benötigt	Vorwiderstand R_V	Parallelwiderstand (Shunt) R_S
Es gilt die Gleichung	$R_V = (n-1)R_1$ (7.21)	$R_S = \dfrac{R_1}{n-1}$ (7.20)

8. Elektrisches und magnetisches Feld

8.1. Größen des elektrischen Feldes

Grundvorstellungen

- Metallischer Leiter: frei bewegliche Elektronen in Kristallgitter (Elektronengas)
- Ungeladener Zustand: positive Ladungen der Gitterbausteine neutralisieren negative Ladungen der Elektronen
- Aufladung negativ: Elektronenüberschuß
  positiv: Elektronenmangel
- Kraftwirkungen: Anziehung zwischen gleichartigen Ladungen
  Abstoßung zwischen ungleichartigen Ladungen

Coulombsches Gesetz $$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{QQ'}{r^2} \qquad (8.1) \qquad \mathrm{N}$$

kennzeichnet die Kraft zwischen zwei Punktladungen.

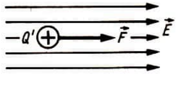
Elektrisches Feld
kennzeichnet einen Raum, in dem auf einen ruhenden Körper auf Grund seiner elektrischen Ladung eine Kraft ausgeübt wird.

Elektrische Feldkonstante (Naturkonstante) $\varepsilon_0 = 8{,}8542 \cdot 10^{-12}$ A s V^{-1} m^{-1}

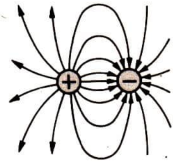
Probeladung (Modell)
ist ein Körper mit so kleiner Ladung, daß diese das elektrische Feld nicht meßbar beeinflußt.

Elektrische Feldstärke, allgemein $$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{Q'} \qquad (8.2') \qquad \mathrm{N\,C^{-1} = V\,m^{-1}}$$

kennzeichnet die Kraft, die in einem elektrischen Feld auf eine Probeladung wirkt. Sie ist eine vektorielle Größenart. Ihre Richtung ist gleich der Kraftrichtung auf eine positive Probeladung.



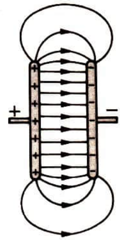
Homogenes (inhomogenes) Feld
Feldstärke ist räumlich konstant (nicht konstant).



Modelldarstellung des elektrischen Feldes
erfolgt durch Feldlinien (Kraftlinien). Die Tangente an die durch einen vorgegebenen Punkt laufende Feldlinie gibt die Kraftrichtung in diesem Punkt an. Die Dichte der Feldlinien in einem vorgegebenen Feldbereich entspricht der Feldstärke in diesem Bereich. Ursprung und Ende elektrischer Feldlinien sind stets elektrische Ladungen.

Elektrische Feldstärke um Punktladung, Betrag $$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad (8.3) \qquad \mathrm{V\,m^{-1}}$$

nimmt proportional dem Quadrat des Abstandes von der Punktladung ab.



Potentialdifferenz (Spannung) im elektrischen Feld $$\varphi_2 - \varphi_1 = U_{12} = \int_1^2 E_s \mathrm{d}s \qquad (8.5) \qquad \mathrm{V}$$

Feldstärke im homogenen Feld Betrag $$E = \frac{U}{d} \qquad (8.5'') \qquad \mathrm{V}$$

ist gleich dem Quotienten aus der Spannung zwischen zwei Punkten des Feldes und deren Abstand in Feldrichtung.

Elektrische Verschiebung, allgemein $$\boldsymbol{D} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}A}\boldsymbol{n} \qquad (8.6') \qquad \mathrm{C\,m^{-2}}$$

kennzeichnet die Stärke der influenzierenden Wirkung des Feldes. Sie ist eine vektorielle Größenart. Ihr Betrag ist gleich der Flächenladungsdichte der influenzierten Ladung. Ihre Richtung ist gleich der Richtung der Normalen des Flächenelements auf der Seite der positiven Ladung.

Elektrische Verschiebung im homogenen Feld, Betrag $$D = \frac{Q}{A} \qquad (8.6) \qquad \mathrm{C\,m^{-2}}$$

Elektrische Verschiebung im Vakuum $$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} \qquad (8.6'') \qquad \mathrm{C\,m^{-2}}$$

ist proportional und gleichgerichtet der elektrischen Feldstärke.

8.2. Kapazität und Kondensator

Kapazität (Definition) $$C = \frac{Q}{U} \qquad (8.8) \qquad \mathrm{C\,V^{-1}} = \mathrm{F\ (Farad)}$$
(µF; pF; nF)

kennzeichnet die Ladung Q, die bei gegebener Spannung U in einer Leiteranordnung (Kondensator) gespeichert ist.

Kapazität des leeren Plattenkondensators (Bemessungsgleichung) $$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \qquad (8.9) \qquad \mathrm{F}$$

gilt für Plattenkondensator mit Plattenfläche A und Plattenabstand d.

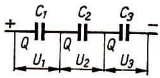
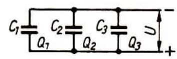
Elektrische Feldenergie $$W = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2 \qquad (8.10) \qquad \mathrm{J}$$

kennzeichnet die Energie, die im elektrischen Feld einer Leiteranordnung mit Kapazität gespeichert ist. Sie wird beim Abbau des Feldes in andere Energieform umgewandelt.

Elektronenvolt $1\ \mathrm{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$

ist eine in der Atomphysik gebräuchliche inkohärente Einheit der Energie. 1 eV ist die Energie, die ein mit der Elementarladung geladenes Teilchen aufnimmt, wenn es im elektrischen Feld die Potentialdifferenz 1 V durchläuft.

Ersatzkapazitäten

	Reihenschaltung	Parallelschaltung
Schaltbild		
Gleichung	$C_{ers} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}$ (8.14) Jeder Kondensator hat gleiche Ladung.	$C_{ers} = C_1 + C_2 + \cdots + C_n$ (8.13) An jedem Kondensator liegt die gleiche Spannung.

Kapazität des stoffgefüllten Plattenkondensators $C_m = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}$ (8.9′) F

ist stets größer als die Kapazität des gleichen Kondensators ohne Dielektrikum.

Dielektrizitätszahl (Stoffkonstante) $\varepsilon_r = \frac{C_{mit}}{C_{ohne}}$ (8.15) 1

kennzeichnet die Vergrößerung der Kondensatorkapazität durch Einbringen eines Dielektrikums.

Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ (8.16) $\mathrm{A\,s\,V^{-1}\,m^{-1}}$

tritt in allen Gleichungen an die Stelle der elektrischen Feldkonstanten, wenn bei den betrachteten Vorgängen das Dielektrikum zu berücksichtigen ist.

8.3. Größen des magnetischen Feldes

Grundlagen magnetischer Erscheinungen

- Dauermagnete aus ferromagnetischen Stoffen sind stets magnetische Dipole (Nord- und Südpol)
- Erdkugel ist Dauermagnet. Magnetischer Südpol liegt in der Nähe des geografischen Nordpols und umgekehrt
- Kraftwirkungen: Anziehung zwischen ungleichnamigen Polen; Abstoßung zwischen gleichnamigen Polen
- Stromdurchflossene Spule wirkt wie Stabmagnet
- Magnetische Erscheinungen sind stets mit elektrischen gekoppelt bzw. auf sie zurückzuführen

Magnetisches Feld

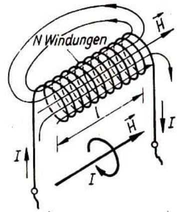
kennzeichnet einen Raum, in dem sich eine frei bewegliche Magnetnadel durch Einwirkung eines Drehmoments in eine bestimmte Richtung einstellt.

Modelldarstellung des magnetischen Feldes

erfolgt durch Feldlinien (Kraftlinien). Die Tangente an die durch einen vorgegebenen Punkt laufende Feldlinie gibt die Kraftrichtung in diesem Punkt an. Die Dichte der Feldlinien in einem vorgegebenen Feldbereich entspricht der Feldstärke in diesem Bereich. Magnetische Feldlinien sind stets in sich geschlossene Linien. Die positive Feldrichtung ist die Richtung, in die der Nordpol einer Magnetnadel zeigt.

Magnetische Feldstärke $\boldsymbol{H}$ $\mathrm{A\,m^{-1}}$

ist eine vektorielle Größenart, die die Kraft auf einen Magnetpol kennzeichnet.



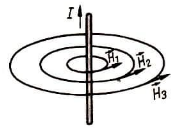
Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule

Positive Feldrichtung im Innern der Spule und elektrischer Strom bilden eine Rechtsschraube.

Magnetische Feldstärke im Innern einer langen geraden Spule, Betrag $\quad H = \dfrac{N}{l} I \quad$ (8.17) $\quad \mathrm{A\,m^{-1}}$

Magnetfeld eines geradlinigen stromdurchflossenen Leiters

Die Feldlinien umgeben den Stromleiter in konzentrischen Kreisen. Positive Stromrichtung und positive Feldrichtung bilden eine Rechtsschraube.



Magnetische Feldstärke um langen geraden Leiter, Betrag $\quad H(r) = \dfrac{I}{2\pi r} \quad$ (8.18) $\quad \mathrm{A\,m^{-1}}$

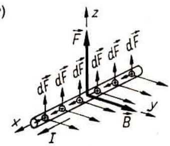
Magnetische Flußdichte, Induktion $\quad \boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H} \quad$ (8.20) $\quad \mathrm{V\,s\,m^{-2}} = \mathrm{T}$ (Tesla)

ist eine vektorielle Größenart. Die Flußdichte ist der Feldstärke proportional.

Magnetische Feldkonstante (Naturkonstante) $\quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \dfrac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{A\,m}} = 1{,}257 \cdot 10^{-6} \dfrac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{A\,m}}$

Magnetischer Fluß

allgemein $\quad \Phi = \int B \,\mathrm{d}A \cos(\boldsymbol{B}, \boldsymbol{n}) \quad$ (8.21) $\quad \mathrm{T\,m^2} = \mathrm{V\,s} = \mathrm{Wb}$ (Weber)



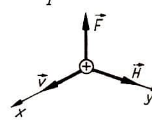
Magnetischer Fluß

im homogenen Feld $\quad \Phi = B_n A \quad$ (8.21′) $\quad \mathrm{Wb}$

ist das Produkt aus Flußdichte und vom Fluß durchsetzter Fläche.

Lorentzkraft, Betrag $\quad F = Q' v B \sin(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{B}) \quad$ (8.22′) $\quad \mathrm{N}$

kennzeichnet die im Magnetfeld auf eine bewegte Ladung ausgeübte Kraft. Für die Richtung der Kraft gilt die Rechtsschraubenregel.



Ablenkung bewegter Ladungsträger im Magnetfeld

erfolgt senkrecht zu der von $\boldsymbol{v}$ und $\boldsymbol{B}$ aufgespannten Ebene.
Der Sonderfall $\boldsymbol{v} \perp \boldsymbol{B}$ ergibt Kreisbahn.

Kraft auf stromführenden Leiter im Magnetfeld, Betrag $\quad F = I l B \sin(\boldsymbol{l}, \boldsymbol{B}) \quad$ (8.34) $\quad \mathrm{N}$

8.4. Induktionsvorgänge

Induktionsgesetz $\quad U_i = -N \dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \quad$ (8.25) $\quad \mathrm{V}$

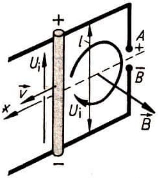
Bei zeitlicher Änderung des eine Spule mit N Windungen durchsetzenden magnetischen Flusses wird in dieser eine Urspannung U_i induziert. Die induzierte Spannung ist der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses proportional.

Elektrische Feldstärke $E = vB\sin(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{B})$ (8.23) $\mathrm{V\,m^{-1}}$

wird in einem Leiter induziert, der sich mit der Geschwindigkeit v durch ein Magnetfeld der Flußdichte B bewegt. Ursache: Ladungsverschiebung durch Lorentzkraft.

Induktionsspannung bei bewegtem Leiter $U_i = lvB\sin(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{B})$ (8.24) V

wird zwischen den Enden eines Leiters der Länge l induziert, der sich mit der Geschwindigkeit v durch ein Magnetfeld der Flußdichte B bewegt.



Lenzsche Regel

Die induzierten Ströme (Spannungen) sind stets so gerichtet, daß sie auf die Induktionsursache (Änderung des Magnetfeldes) hemmend zurückwirken (Energieerhaltungssatz).

Selbstinduktion

Wird die Stromstärke eines Stromes, der durch eine Spule fließt, geändert, tritt an dieser Spule eine induzierte Spannung auf, die einen Gegenstrom hervorruft. Bei Ein- und Abschaltvorgängen erfolgt eine Verzögerung (scheinbare „Trägheit" des Stromes).

Induktionsspannung bei Selbstinduktion $U_i = -L\dfrac{dI}{dt}$ (8.26) V

Induktivität einer Spule bzw. Leiteranordnung (Definition) $L = -\dfrac{U_i}{\dfrac{dI}{dt}}$ (8.26) $\mathrm{V\,s\,A^{-1}} = \mathrm{H}$ (Henry)

kennzeichnet das Verhältnis zwischen Induktionsspannung und der zeitlichen Änderung der Stromstärke.

Induktivität einer leeren Spule (Bemessungsgleichung) $L = \mu_0 N^2 \dfrac{A}{l}$ (8.27) H

kennzeichnet die Induktivität einer Spule mit der Windungszahl N, der Querschnittsfläche A und der Länge l.

Magnetische Feldenergie $W = \dfrac{L}{2} I^2$ (8.28) J

kennzeichnet die Energie, die im magnetischen Feld einer Leiteranordnung mit Induktivität gespeichert ist. Sie wird beim Abbau des Feldes in andere Energieform umgewandelt.

8.5. Stoff im Magnetfeld

Permeabilitätszahl $\mu_r = \dfrac{L_{\text{mit}}}{L_{\text{ohne}}}$ (8.29) 1

kennzeichnet die Veränderung der Induktivität durch Einbringen eines Stoffs in die Leiteranordnung (Spule).

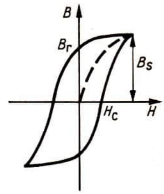
Permeabilität $\mu = \mu_r \mu_0$ (8.30) $\mathrm{V\,s\,A^{-1}\,m^{-1}}$

tritt in allen Gleichungen an die Stelle der magnetischen Feldkonstanten, wenn bei den betrachteten Vorgängen der Einfluß des Stoffs zu berücksichtigen ist.

Magnetische Flußdichte im stoffgefüllten Feld $\boldsymbol{B} = \mu_r \mu_0 \boldsymbol{H}$ (8.20′) T

Magnetisches Verhalten der Stoffe

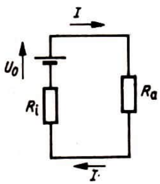
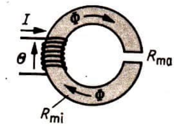
*dia*magnetisch	*para*magnetisch	*ferro*magnetisch
$\mu_r < 1$	$\mu_r > 1$	$\mu_r \gg 1$
Schwächung von B (Cu, Ag, Au)	geringe Verstärkung von B (Al, Luft)	sehr hohe Verstärkung von B (Fe, Co, Ni)



Hysteresis
Permeabilitätszahl der Ferromagnetika ist von Feldstärke und magnetischer Vorgeschichte des Stoffs abhängig. B,H-Diagramm ergibt Hysteresisschleife.

8.6. Magnetischer Kreis, Prinzip von Motor und Generator

Magnetischer Kreis
läßt sich in formaler Analogie zum elektrischen Stromkreis behandeln.

Elektrischer Stromkreis	Magnetischer Kreis
	
Die elektrische Urspannung U_0 verursacht die Stromstärke I. Dem Strom wird in einem Leiter der Länge l, des Querschnitts A und der elektrischen Leitfähigkeit $\varkappa$ der Widerstand $R = \frac{1}{\varkappa}\frac{l}{A}$ entgegengesetzt.	Die magnetische Urspannung $\Theta = NI$ verursacht den magnetischen Fluß Φ. Dem Fluß wird in einem Abschnitt der Länge l, des Querschnitts A und der Permeabilität μ der magnetische Widerstand $R_m = \frac{1}{\mu}\frac{l}{A}$ entgegengesetzt.
Für hintereinandergeschaltete Widerstände gilt $R_{ers} = \sum_\nu R_\nu$	Für hintereinanderliegende Feldabschnitte gilt $R_{m\,ers} = \sum_\nu R_{m\,\nu}$
Die Stromstärke errechnet sich aus $I = \frac{U_0}{R_{ers}}$	Der Fluß des Kreises errechnet sich aus $\Phi = \frac{\Theta}{R_{m\,ers}}$
$U = IR$ ist der Spannungsabfall.	$V = \Phi R_m = Hl$ ist der magnetische Spannungsabfall.

Prinzip von Motor und Generator

Motor	*Generator*
Stromfluß durch	Drehung einer

Spule im Magnetfeld bewirkt

Drehmoment	Wechselspannung

In beiden Fällen beträgt die Leistung $P = |NI\Phi\omega \cos \omega t|$ (8.36)

8.7. Analogie zwischen Größen und Einheiten des elektrischen und magnetischen Feldes

Elektrisches Feld			Magnetisches Feld		
Ladung	$Q = It$	$\mathrm{A\,s = C}$	Magnetischer Fluß	Φ	$\mathrm{V\,s = Wb}$
Elektrische Feldstärke	$E = \frac{F}{Q'} = \frac{U}{d}$	$\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$	Magnetische Feldstärke	$H = \frac{NI}{l}$	$\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$
Elektrische Verschiebung	$D = \frac{Q}{A}$ $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$	$\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}$	Magnetische Flußdichte (Induktion)	$B = \frac{\Phi}{A}$ $B = \mu_0 \mu_r H$	$\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2} = \mathrm{T}$
Elektrische Feldkonstante	ε_0	$\frac{\mathrm{A\,s}}{\mathrm{V\,m}} = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}$	Magnetische Feldkonstante	μ_0	$\frac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{A\,m}} = \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$
Dielektrizitätskonstante	$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$	$\frac{\mathrm{A\,s}}{\mathrm{V\,m}} = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}$	Permeabilität	$\mu = \mu_0 \mu_r$	$\frac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{A\,m}} = \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$
Dielektrizitätszahl	$\varepsilon_r = \frac{C_{\mathrm{mit}}}{C_{\mathrm{ohne}}}$	1	Permeabilitätszahl	$\mu_r = \frac{L_{\mathrm{mit}}}{L_{\mathrm{ohne}}}$	1
Kapazität	$C = \frac{Q}{U}$ $C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$	$\frac{\mathrm{A\,s}}{\mathrm{V}} = \mathrm{F}$	Induktivität	$L = \frac{U_i}{\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}}$ $L = \mu_0 N^2 \frac{A}{l}$	$\frac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{A}} = \mathrm{H}$
Elektrische Feldenergie	$W = \frac{1}{2} CU^2$	$\mathrm{W\,s = J}$	Magnetische Feldenergie	$W = \frac{1}{2} LI^2$	$\mathrm{W\,s = J}$
Elektrische Urspannung	U_0	V	Magnetische Urspannung	Θ	A

9. Leitungsvorgänge in Gasen und Flüssigkeiten

9.1. Grundlagen des Leitungsmechanismus

Trägerstrom

Strömende stoffliche Träger (z.B. Ionen) oder Elektronen bewirken Ladungstransport in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern.

Elektrische Leitfähigkeit (Stoffkonstante) $\quad \varkappa = \eta_+ u_+ + \eta_- u_- \quad$ (9.3) $\quad \mathrm{S\,m^{-1}}$

Trägerbeweglichkeit $\quad u = \frac{v}{E} \quad$ (9.1) $\quad \mathrm{m^2\,s^{-1}\,V^{-1}}$

kennzeichnet die Geschwindigkeit der Träger, die sich bei gegebener elektrischer Feldstärke einstellt.

Räumliche Ladungsdichte $\quad \eta = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}V} \quad$ (9.2) $\quad \mathrm{C\,m^{-3}}$

kennzeichnet die Dichte der Ladungsträger in einem Medium.

9.2. Elektronenstrom durch das Vakuum

Freie Elektronen

können durch Energieaufwand aus der Oberfläche von Metallen herausgelöst werden:

Wärme	bewirkt	Glühemission (elektrisches Aufheizen)	
Licht	bewirkt	Fotoeffekt	(kalte Elektroden)
Elektrische Feldenergie	bewirkt	Feldeffekt	(kalte Elektroden)

Austrittsarbeit W_A J

kennzeichnet die zum Herauslösen eines Elektrons notwendige Energie. Sie ist stoffabhängig. ($W_A \approx 1 \cdots 6$ eV)

Katodenstrahlen

sind schnell bewegte freie Elektronen. Sie entstehen im Hochvakuum ($p < 10^{-6}$ Torr), wenn die Elektronen im elektrischen Feld stark beschleunigt werden. Ablenkung durch elektrische und magnetische Felder.

Anwendungen

Elektronenröhre, Röntgenröhre, Elektronenmikroskop, Elektronenstrahloszillograf, Vakuumschmelzofen.

9.3. Stromleitung in Gasen

Unselbständige Gasentladung

entsteht unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes, wenn die Moleküle des vom Feld durchsetzten Gases (Luft) durch *äußere Einwirkung* (Wärme, Röntgenstrahlen, radioaktive Strahlen) ionisiert werden.

Selbständige Gasentladung

entsteht unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes, wenn die Moleküle des vom Feld durchsetzten Gases durch *Stoßionisation* (Aufprall von schnell bewegten Elektronen und Ionen, die sich dabei innerhalb des Gases bilden) ionisiert werden. Voraussetzung: Hohe Trägergeschwindigkeit, zur Ionisation ausreichende kinetische Energie. Durch Kettenreaktion erfolgt schnelle Zunahme der Ladungsdichte und dadurch Abnahme des elektrischen Widerstandes der Entladungsstrecke. Begrenzung der Stromstärke durch Schutzwiderstand notwendig.

Anwendungen

Lichtbogen, Funkenentladung (bei normalem Luftdruck), Glimmentladung, Leuchtstofflampe, Neonröhre.

9.4. Stromleitung in Flüssigkeiten

Elektrolyte

sind wäßrige Lösungen von Säuren, Basen, Salzen. Sie sind in positive und negative Ionen aufgespalten (dissoziiert). Unter Einwirkung eines elektrischen Feldes wandern die positiven Ionen zur Katode, die negativen zur Anode. Neutralisation an den Elektroden führt zu Stoffabscheidung.

1. Faradaysches Gesetz $Q \sim n$

Die Stoffmenge n des an einer Elektrode abgeschiedenen Stoffes ist der transportierten Ladungsmenge Q proportional.

2. Faradaysches Gesetz $Q = zFn$ (9.4) C

kennzeichnet die für die Abscheidung der Stoffmenge n benötigte Ladung (z Ionenwertigkeit; F Faraday-Konstante).

Faraday-Konstante (Naturkonstante) $F = 9{,}6485 \cdot 10^4\ \mathrm{C\ mol^{-1}}$

Anwendungen

Korrosionsschutz metallischer Oberflächen, Gewinnung reiner Metalle (Elektrolytkupfer).

10. Schwingungen

10.1. Kinematik der Sinusschwingung

Schwingung
heißt ein Vorgang, bei dem sich eine physikalische Größe zeitlich periodisch ändert.

Sinusschwingung (harmonische Schwingung)
Die Änderung der physikalischen Größe verläuft nach dem Sinusgesetz

$$y = y_m \sin(\omega t + \varphi); \qquad (10.1)$$

Größen zur Beschreibung von Schwingungen

Augenblickswert, Elongation y m

Momentanwert der zeitabhängigen Variablen, kennzeichnet bei mechanischer Schwingung die zeitlich veränderliche Entfernung des schwingenden Körpers vom Punkt 0.

Maximalwert, Amplitude y_m m

ist der größte Augenblickswert.

Effektivwert einer Größe y $\quad y_{eff} = \dfrac{y_m}{\sqrt{2}}$ (10.12)

ist die Wurzel aus dem zeitlichen Mittelwert von y^2.

Frequenz $\quad f = \dfrac{z}{\Delta t}$ (2.12) $\quad s^{-1} = Hz$

Kreisfrequenz $\quad \omega = 2\pi f$ (2.16) $\quad s^{-1}$

Periodendauer $\quad T = \dfrac{1}{f}$ (2.13) $\quad$ s

Phasenwinkel $\quad \psi = \omega t + \varphi$ $\quad$ rad = 1

kennzeichnet den Schwingungszustand.

Nullphasenwinkel $\quad \varphi$ $\quad$ rad

ist der Phasenwinkel zum Zeitpunkt $t = 0$.

Phasenverschiebung $\quad \varphi = \psi_2 - \psi_1 = \varphi_2 - \varphi_1$ $\quad$ rad

ist die Differenz der Phasenwinkel zweier gleichzeitig beobachteter Schwingungen.

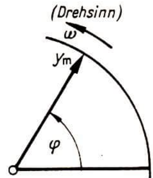
Geschwindigkeit
bei mechanischer Sinusschwingung $\quad v = \dfrac{dy}{dt} = \omega y_m \cos(\omega t + \varphi)$ (10.2) $\quad m\,s^{-1}$

Maximalwert $\quad v_m = \omega y_m$ (10.2′) $\quad m\,s^{-1}$

Beschleunigung
bei mechanischer Sinusschwingung $\quad a = \dfrac{dv}{dt} = -\omega^2 y_m \sin(\omega t + \varphi)$ (10.3) $\quad m\,s^{-2}$

Maximalwert $\quad a_m = \omega^2 y_m$ (10.3″) $\quad m\,s^{-2}$

Darstellung einer Schwingung durch Zeigerdiagramm (rotierende Zeiger)



Amplitude y_m	$\triangleq$	Zeigerlänge
Nullphasenwinkel φ	$\triangleq$	Zeigerrichtung zur Zeit $t = 0$
Kreisfrequenz ω	$\triangleq$	Winkelgeschwindigkeit des Zeigers

Überlagerung von Sinusschwingungen gleicher Richtung

- Gleiche Frequenz: es entsteht eine resultierende Sinusschwingung derselben Frequenz; $y_{res} = y_1 + y_2$.
- Ungleiche Frequenz: Es entsteht eine nichtsinusförmige Schwingung.
- Beliebige periodische Vorgänge lassen sich als Überlagerung von Sinusschwingungen darstellen.
- Schwebungen entstehen bei sehr kleinem Frequenzunterschied der überlagerten Schwingungen: $\omega_1 \approx \omega_2$.

10.2. Dynamik der Sinusschwingung

Lineares Kraftgesetz
ist Voraussetzung für mechanische Sinusschwingung.

$$F = F(t) = -k\,y(t) \qquad (10.6) \qquad \mathrm{N}$$
$$M = M(t) = -k'\,\varepsilon(t) \qquad (10.8) \qquad \mathrm{N\,m}$$

(Unter der Größe bzw. Gleichung für lineare Schwingung steht hier und im folgenden die Größe bzw. Gleichung für Drehschwingung.)

Richtgröße $\quad k = m\,\omega^2 \qquad (10.5) \qquad \mathrm{N\,m^{-1}}$

Winkelrichtgröße $\quad k' = J_A\,\omega^2 \qquad \mathrm{N\,m\,rad^{-1}}$

Eigenschwingungen
führt ein schwingungsfähiges System nach einmaligem Anstoß aus.

Eigenfrequenz der mechanischen Sinusschwingung

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (10.7) \qquad \mathrm{Hz}$$
$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k'}{J_A}} \qquad (10.9) \qquad \mathrm{Hz}$$

Energie der mechanischen Sinusschwingung

$$W = \frac{1}{2}\,k y_m^2 \qquad (10.11) \qquad \mathrm{J}$$
$$W = \frac{1}{2}\,k'\,\varepsilon_m^2 \qquad \mathrm{J}$$

Die von außen einem schwingungsfähigen System zugeführte Schwingungsenergie bleibt erhalten, sofern der Vorgang reibungsfrei verläuft. Es findet periodische Umwandlung von potentieller in kinetische Energie statt. (Energieerhaltungssatz der Mechanik)

Gedämpfte Schwingungen
verlaufen unter Einfluß einer geschwindigkeitsproportional angenommenen Reibungskraft $F_R = -rv$. Es gilt

$$y = y_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \qquad (10.13) \qquad \mathrm{m}$$

mit $y_n = y_0 e^{-\delta t}$, der mit der Zeit abklingenden Amplitude, und $\delta = \dfrac{r}{2m}$, der Abklingkonstanten, sowie der Kreisfrequenz $\omega < \omega_0$ (ω_0 ist die Kreisfrequenz der zugehörigen ungedämpften Eigenschwingung).

Erzwungene Schwingungen

führt ein schwingungsfähiges System (*Resonator*; Eigenfrequenz f_0) unter Einwirkung einer sinusförmigen Kraft $F = F_m \sin \omega t$ (*Erreger*; Frequenz f) aus. Die Resonatoramplitude hängt von der Erregeramplitude und vom Frequenzverhältnis $f : f_0$ ab. Zwischen den Schwingungen von Erreger und Resonator besteht frequenzabhängige Phasenverschiebung.

Resonanzfall

Maximum der Resonatoramplitude bei $f \approx f_0$.

Beispiele für mechanische Schwingungen

Feder-Masse-Schwinger	$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$	(10.7)	Hz
Torsionsschwinger	$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k'}{J_A}}$	(10.9)	Hz
Physisches Pendel für kleine Drehwinkel	$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{mgs}{J_A}}$	(10.15)	Hz
Fadenpendel für kleine Amplitude	$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$	(10.15′)	Hz

10.3. Elektrische Eigenschwingungen

Schwingungsfähiges System

ist ein Stromkreis, bestehend aus Kondensator (Kapazität C), Spule (Induktivität L) und ohmschem Widerstand R.

Analoge Größen

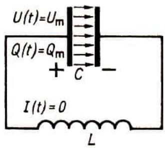
Mechanische Größe		Elektrische Größe	
Elongation	$y = y(t)$	Ladung des Kondensators	$q = q(t)$
Geschwindigkeit	$v = \frac{dy}{dt}$	Stromstärke	$i = \frac{dq}{dt}$
Masse	m	Induktivität	L
Richtgröße	k	Kehrwert der Kapazität	C^{-1}
Betrag der rücktreibenden Kraft	$F = ky$	Spannung am Kondensator	$u = \frac{q}{C}$
Kinetische Energie	$W_k = \frac{m}{2} v^2$	Magnetische Energie	$W_m = \frac{L}{2} i^2$
Potentielle Energie	$W_p = \frac{k}{2} y^2$	Elektrische Energie	$W_{el} = \frac{q^2}{2C}$

Analoge Gleichungen

Mechanische Schwingung		Elektrische Schwingung
$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$	Frequenz der Eigenschwingung	$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}$
$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	Periodendauer der Eigenschwingung	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
$y = y_m \sin(\omega t + \varphi)$	Elongation bzw. elektrische Ladung bei ungedämpfter Schwingung	$q = Q_m \sin(\omega t + \varphi)$
$y = y_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi)$	Elongation bzw. elektrische Ladung bei gedämpfter Schwingung	$q = Q_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi)$
$\delta = \frac{r}{2m}$	Abklingkonstante	$\delta = \frac{R}{2L}$

Ungedämpfter Schwingkreis

Periodisch wird elektrische in magnetische Energie umgewandelt. Schwingungsenergie bleibt erhalten.



10.4. Wechselstrom

Wechselstrom

Erzwungene Schwingung in einem System (Stromkreis, Netz) unter Einfluß eines Erregers (Generator) mit sinusförmiger Urspannung.

Größen und Gleichungen des Wechselstromkreises

Wechselspannung	$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$		(10.20)	V
Wechselstromstärke	$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$		(10.21)	A
Augenblickswerte	Spannung u	Stromstärke i		
Scheitelwerte	Spannung U_m	Stromstärke I_m		
Effektivwerte	Spannung $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$	Stromstärke $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$		

Widerstand im Wechselstromkreis,
allgemein

Die Gleichung (7.7) für den Widerstand im Gleichstromkreis gilt mit den Effektivwerten U und I auch für jeden Teil eines Wechselstromkreises.

Scheinwiderstand Z $\qquad Z = \frac{U}{I} \qquad$ (10.25) $\qquad \frac{V}{A} = \Omega$

ist der Gesamtwiderstand im Wechselstromkreis.

Wirkwiderstand R $\qquad R = \frac{U_R}{I_R} \qquad$ (7.7) $\qquad \frac{V}{A} = \Omega$

ist der ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis.

Kapazitiver Widerstand X_C $\quad X_C = \frac{U_C}{I_C} = \frac{1}{\omega C}$ $\quad$ (10.23) $\quad \frac{\text{s}}{\text{F}} = \Omega$

ist der Widerstand eines idealen Kondensators im Wechselstromkreis.

Induktiver Widerstand X_L $\quad X_L = \frac{U_L}{I_L} = \omega L$ $\quad$ (10.24) $\quad \frac{\text{H}}{\text{s}} = \Omega$

ist der Widerstand einer idealen Spule im Wechselstromkreis.

Scheinleitwert $\quad Y = \frac{1}{Z}$ $\quad \frac{\text{A}}{\text{V}} = \text{S}$

Kapazitiver Blindleitwert $\quad B_C = \frac{1}{X_C}$ $\quad$ S

Induktiver Blindleitwert $\quad B_L = \frac{1}{X_L}$ $\quad$ S

Phasenverschiebung,
allgemein $\quad \varphi = \varphi_i - \varphi_u$ $\quad$ (10.22) $\quad$ rad = 1; (°)

Phasenverschiebung im Wechselstromkreis

mit ohmschem Widerstand R
Stromstärke und Spannung sind in Phase $\quad \varphi = 0$

mit kapazitivem Widerstand X_C
Stromstärke eilt Spannung um $\pi/2$ voraus $\quad \varphi = +\frac{\pi}{2}$

mit induktivem Widerstand X_L
Stromstärke eilt Spannung um $\pi/2$ nach $\quad \varphi = -\frac{\pi}{2}$

Wirkleistung $\quad P = UI\cos\varphi = I^2R$ $\quad$ (10.30) (10.30″) $\quad$ W

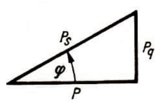
erfaßt den Teil der elektrischen Arbeit, der in Wärmeenergie oder in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann. Sie wird ausschließlich durch den Wirkwiderstand bestimmt.

Blindleistung $\quad P_q = UI\sin\varphi$ $\quad$ (10.31) $\quad$ W (var)

kennzeichnet den Teil der elektrischen Arbeit, der im Blindwiderstand zum Aufbau des elektrischen bzw. magnetischen Feldes erforderlich ist.

Scheinleistung $\quad P_s = UI$ $\quad$ (10.33) $\quad$ W (VA)

ist das formal gebildete Produkt der Effektivwerte von Spannung und Stromstärke.
Die Scheinleistung setzt sich geometrisch aus Wirk- und Blindleistung zusammen.



Leistungsfaktor $\quad \cos\varphi = \frac{P}{P_s}$ $\quad$ (10.35)

kennzeichnet den Anteil der Wirkleistung an der Scheinleistung.

Frequenz $\quad f = 50\ \text{Hz} \rightarrow \omega = 100\ \pi\ \text{s}^{-1}$

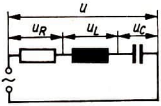
bei technischem Wechselstrom

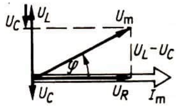
Reihenschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

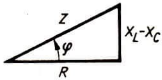
Spannungen sowie Widerstände sind geometrisch zu addieren.

Scheinwiderstand $$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (10.26)$$

Phasenverschiebung φ $$\tan\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (10.27)$$





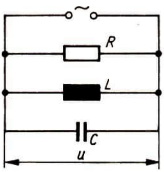


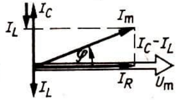
Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

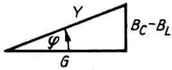
Stromstärken sowie Leitwerte sind geometrisch zu addieren.

Scheinleitwert $$Y = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} \quad (10.28')$$

Phasenverschiebung φ $$\tan\varphi = \frac{B_C - B_L}{G} \quad (10.29)$$







10.5. Drehstrom

Drehstrom (Dreiphasenwechselstrom)
System von drei Wechselströmen, die gegeneinander um 120° phasenverschoben sind.

Größen und Symbole

Außenleiter(effektiv)werte:	Spannung U; Stromstärke I
Strang(effektiv)werte:	Spannung U_{Strang}; Stromstärke I_{Strang}

Zusammenhang zwischen Leiter- und Strangwerten

Größe	Dreieckschaltung (△)		Sternschaltung (⅄)	
Spannung	$U = U_{\text{Strang}}$	(10.47)	$U = \sqrt{3}\,U_{\text{Strang}}$	(10.39)
Stromstärke	$I = \sqrt{3}\,I_{\text{Strang}}$	(10.50)	$I = I_{\text{Strang}}$	(10.44)

Wirkleistung $$P = \sqrt{3}\,UI\cos\varphi \quad (10.51)$$
bei symmetrischer Belastung

11. Wellen

11.1. Allgemeine Eigenschaften und Verhalten der Wellen

Welle
Ausbreitung der Störung eines Gleichgewichtszustandes. Der Energiezufuhr am Ursprung (Quelle, Sender) entsprechend ändert sich der Energiezustand im Raum. Die für die Welle charakteristische Größe ist orts- und zeitabhängig.

Mechanische Welle
Elongation von Teilchen, die um eine Nullage schwingen, ist charakteristische Größe.

Veranschaulichung einer Welle im Raum erfolgt durch

- Wellenflächen (-fronten): Gesamtheit aller Punkte mit gleichem Schwingungszustand
- Wellennormalen: Senkrechte zu den Wellenflächen

Wellenarten

- Transversalwelle: charakteristische physikalische Größe schwingt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
- Longitudinalwelle: charakteristische physikalische Größe schwingt in der Ausbreitungsrichtung.

Lineare Sinuswelle
Ausbreitung längs einer Geraden in x-Richtung

$$y = y(t, x) = y_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{c}\right) \qquad (11.1)$$

$$= y_m \sin 2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda}\right) \qquad (11.1')$$

Größen zur Beschreibung von Wellen

Es werden nur die Größen aufgeführt, die nicht schon aus der Schwingungslehre bekannt sind.

Wellenlänge λ m
kennzeichnet den Abstand zwischen zwei Nachbarpunkten gleicher Phase.

Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = \lambda f$ (11.2) $\mathrm{m\,s^{-1}}$

Gangunterschied $\Delta s = s_2 - s_1 = \frac{\varphi \lambda}{2\pi}$ m

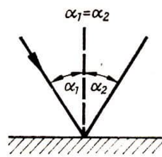
Unterschied im Weg zweier Wellen hat Phasenverschiebung am Empfangsort zur Folge.

Polarisation
Nur bei Transversalwellen möglich. Eine bestimmte Schwingungsrichtung der schwingenden Größe ist bevorzugt.

Überlagerung von Wellen
Von mehreren Quellen ausgehende Wellen überlagern sich ungestört. Bei kohärenten Wellen führt die am jeweiligen Empfangsort auftretende Phasenverschiebung $\varphi = (\omega/c)\,\Delta s$ zu *Interferenzerscheinungen*. Dabei gilt bei gleicher Phase beider Wellen:

- Maximale Verstärkung $\Delta s = n\lambda$ (11.3)
- Maximale Schwächung $\Delta s = (2n + 1)\lambda/2$ (11.3′)

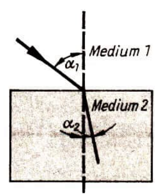
$n = 0, 1, 2, \ldots$



Auftreffen einer Welle auf die Grenzfläche
zwischen zwei Medien mit unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit

- Reflexionsgesetz $\alpha_1 = \alpha_2$ (11.4)

Der Einfallswinkel ist gleich dem Ausfallswinkel. Einfallender und ausfallender Strahl liegen in einer Ebene, die senkrecht auf der reflektierenden Ebene steht.



- Brechungsgesetz $\sin\alpha_1 : \sin\alpha_2 = c_1 : c_2$ (11.5)

Die Sinuswerte des Einfalls- und des Brechungswinkels verhalten sich wie die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Welle in den beiden Medien. Einfallender und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene, die senkrecht auf der brechenden Ebene steht.

oder

Beim Übergang von dünneren ins dichtere Medium wird ein Strahl zum Lot hin gebrochen. (Dabei heißt dünneres Medium das Medium mit der größeren Ausbreitungsgeschwindigkeit.)

- Grenzwinkel der Totalreflexion $\sin\alpha_T = c_1 : c_2$ (11.6)

An der Grenzfläche tritt Totalreflexion auf, wenn der Strahl auf die Grenzfläche zum dünneren Medium trifft und der Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel ist: $\alpha_1 > \alpha_T$

Beugung
Trifft eine Welle auf einen Spalt oder auf ein Hindernis in der Größenordnung der Wellenlänge, weicht ein Teil der Energie der Welle von der geradlinigen Ausbreitungsrichtung ab.

Absorption
Beim Durchgang durch ein Medium wird die Energie der Welle, abhängig von Art und Dicke des Mediums, absorbiert, d.h. in eine andere Energieart umgewandelt.

11.2. Schallwellen

Schallwellen
Mechanische Longitudinalwellen, die sich in gasförmigen, flüssigen und festen Körpern ausbreiten.

Schallgeschwindigkeit
Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Schallwelle, hängt ab von der Dichte und damit auch von der Temperatur sowie von den elastischen Eigenschaften des Mediums.

Schallgeschwindigkeit in Luft $c_{L/\mathrm{m\,s^{-1}}} = 331{,}6 + 0{,}6\, t_{/°\mathrm{C}}$ (11.23′)

Einige Schallfeldgrößen

Schallstärke $J = \frac{\Phi}{A} = \frac{p_{\mathrm{eff}}^2}{\varrho c}$ (11.15′) (11.26″) $\mathrm{W\,m^{-2}}$

kennzeichnet die auf die Fläche des Empfängers bezogene Strahlungsleistung.

Schalldruck $p = p_m \cos\omega t$ (11.19′) Pa

kennzeichnet den vom Schall am Empfangsort ausgeübten, periodisch wechselnden Über- (Unter-) Druck.

Schalldruck, Effektivwert $p_{\mathrm{eff}} = \frac{p_m}{\sqrt{2}} = \frac{\varrho c \omega y_m}{\sqrt{2}}$ Pa

Schallintensitätspegel $L_{/\mathrm{dB}} = 10 \lg \frac{J}{J_0}$ (11.28) 1 = dB (Dezibel)

Zehnfacher Logarithmus des Verhältnisses zweier Schallstärken, bezogen auf die Hörschwelle

Schalldruckpegel $L_{/\mathrm{dB}} = 20 \lg \frac{p}{p_0}$ (11.28′) dB

Zwanzigfacher Logarithmus des Verhältnisses zweier Schalldrücke, bezogen auf die Hörschwelle.

Schallpegel
Gemeinsame Bezeichnung für Schallintensitätspegel und für Schalldruckpegel, die wegen $J \sim p^2$ einander gleich sind.

Gesamter Schallpegel
bei n Quellen mit gleichem Schallpegel L $L_{\mathrm{ges}} = L + 10 \lg n$ (11.29) dB

Unterscheidung der Schallwellen nach Frequenzen

- Infraschall: $f < 16$ Hz
- Hörschall: 16 Hz $< f <$ 16 kHz
- Ultraschall: 16 kHz $< f <$ einige Megahertz

Hörvermögen des Menschen

ist begrenzt

- nach der Frequenz (16 Hz ⋯ 16 kHz)
- nach der empfangenen Schallstärke:

Hörschwelle (untere Grenze) $J_0 = 10^{-12}$ W m^{-2} $\triangleq p_0 = 2{,}0 \cdot 10^{-5}$ Pa
Schmerzgrenze (obere Grenze) $J_{max} \approx 1$ W m^{-2}
bei 1000 Hz

11.3. Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen

Periodische Änderungen des elektromagnetischen Feldes; Transversalwellen.

Frequenzumfang 10 Hz $< f < 10^{24}$ Hz

Ausbreitungsgeschwindigkeit

hängt von den elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Mediums ab.

Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum (Naturkonstante)

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \tag{11.31}$$

$$= 2{,}9979 \cdot 10^8 \, \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 3 \cdot 10^8 \, \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dieser Wert gilt mit guter Näherung auch für Ausbreitung in Luft.

Ausbreitungsgeschwindigkeit in Stoffen

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \approx \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{11.30'}$$

Brechzahl (Brechungsindex)

$$n = \frac{c_0}{c} \tag{11.32}$$

ist definiert für Lichtwellen. Sie ist frequenzabhängig (Dispersion).

Brechungsgesetz von Snellius:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12} \tag{11.5'}$$

n_1 absolute Brechzahl des Mediums *1*; n_2 absolute Brechzahl des Mediums *2*;
n_{12} Brechzahl für den Übergang von Medium *1* in Medium *2*.

Lichtstärkeempfindung des Menschen

ist nicht proportional der Intensität der Lichtstrahlung. Maximale Empfindlichkeit des Auges bei $\lambda = 555$ nm (gelbgrün).

Fotometrische oder lichttechnische Größen

bewerten die Lichtempfindung entsprechend der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges.

Lichtstärke I (Grundgrößenart) cd (Candela)

Leuchtdichte $$L = \frac{I}{\Delta A \cos\alpha}$$ (11.33) cd m^{-2}

kennzeichnet die auf die Fläche der Lichtquelle bezogene Lichtstärke.

Zur Einführung weiterer lichttechnischer Größen wird die geometrische Größe Raumwinkel benötigt.

Raumwinkel $$\Omega = \frac{A}{r^2}$$ (11.12) sr (Steradiant)

ist der Quotient aus einem Teil einer Kugeloberfläche und dem Quadrat des Radius dieser Kugel.

Lichtstrom $$\Phi = I\Omega$$ (11.35′) cd sr = lm (Lumen)

kennzeichnet die vom Auge wahrgenommene Strahlungsleistung einer Lichtquelle.

Beleuchtungsstärke $$E_{/\mathrm{lx}} = \frac{I_{/\mathrm{cd}} \cos\alpha}{(r_{/\mathrm{m}})^2}$$ (11.37′) lm m^{-2} = lx (Lux)

kennzeichnet die Beleuchtung einer Ebene durch eine Lichtquelle (auf die Fläche dieser Ebene bezogener Lichtstrom).

Anschauliche Zusammenfassung lichttechnischer Größen (Beispiel):
Eine kleine Lichtquelle mit der Lichtstärke 1 cd strahlt in den Raumwinkel 1 sr, der durch eine senkrecht zur Strahlungsrichtung stehende 1 m² große Fläche in 1 m Abstand von der Lichtquelle gegeben ist, einen Lichtstrom von 1 lm. Dieser Lichtstrom ruft auf der Fläche eine Beleuchtungsstärke von 1 lx hervor.