

Physik für Ingenieure

Ulrich Hahn

ISBN: 978-3-11-035056-2

© 2015 Walter de Gruyter GmbH, Berlin/München/Boston

Abbildungsübersicht / List of Figures

Tabellenübersicht / List of Tables

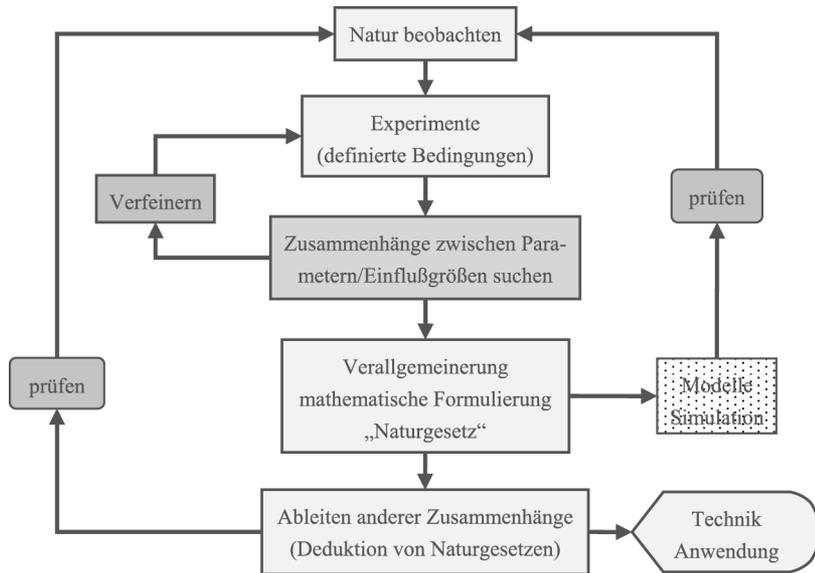


Abb. 1.1 Zum physikalischen Erkenntnisprozess.

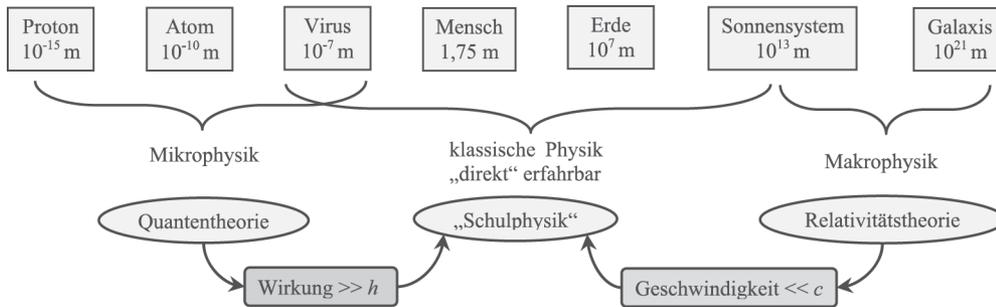


Abb. 1.2 Gültigkeitsbereiche von Naturgesetzen.

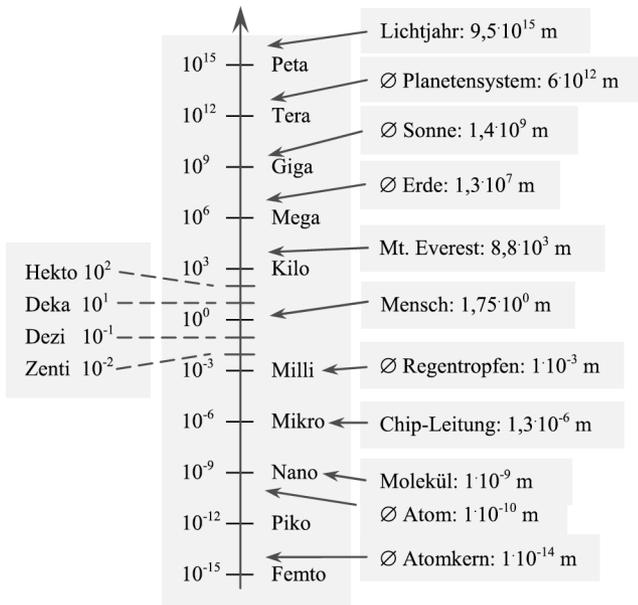


Abb. 1.3 Größenvorsätze, die die Zehnerpotenz im Zahlenwert einer physikalischen Größe repräsentieren. Zu den Zehnerpotenzen sind typische Beispiele für die Länge dargestellt.

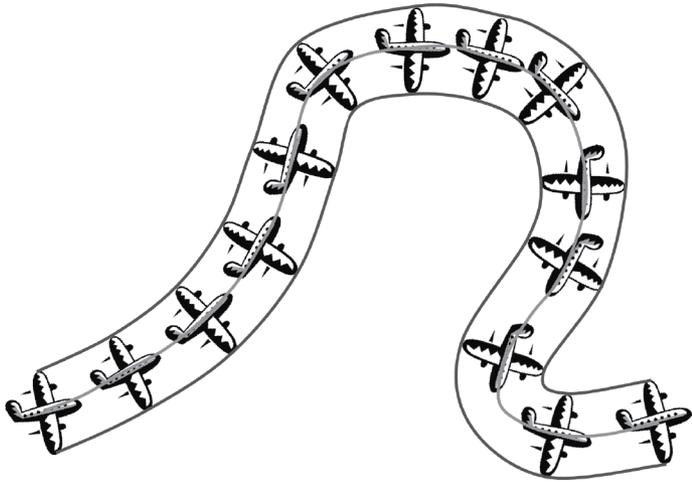


Abb. 2.1 Beliebige Bewegung.



Abb. 2.2 Rotationsbewegung.

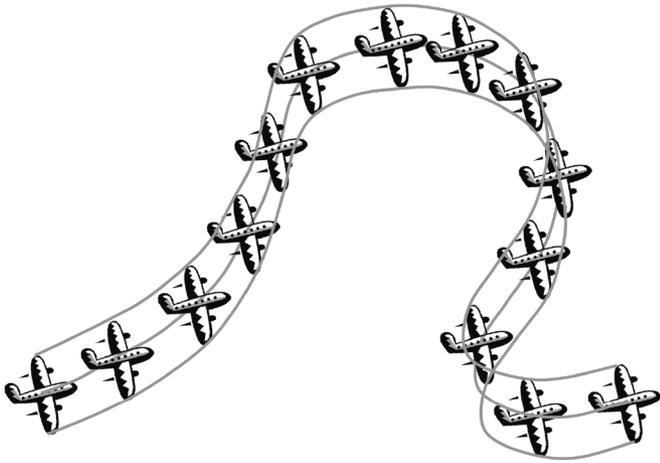


Abb. 2.3 Translationsbewegung.

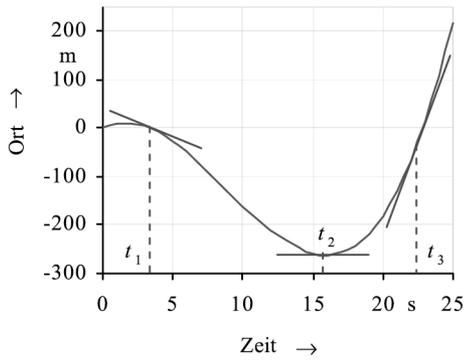


Abb. 2.4 Weg-Zeit-Diagramm: zum Zeitpunkt t_1 bewegt sich das Objekt zurück ($v < 0$), zum Zeitpunkt t_2 steht es ($v = 0$), und in t_3 ($v > 0$) bewegt es sich vorwärts.

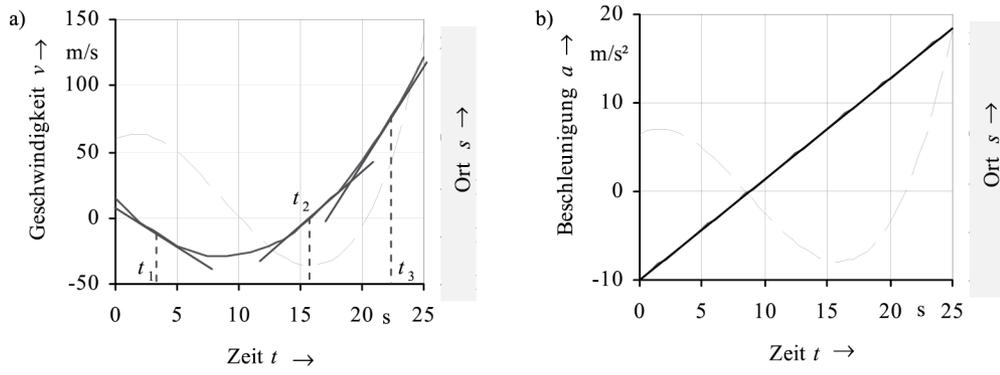


Abb. 2.5 (a) Die gleiche Bewegung im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm: Abbremsen in t_1 , beschleunigen in t_2 und t_3 .
 (b) Beschleunigungs-Zeit-Diagramm Zum Vergleich ist $s(t)$ ebenfalls dargestellt (gestrichelte Linie).

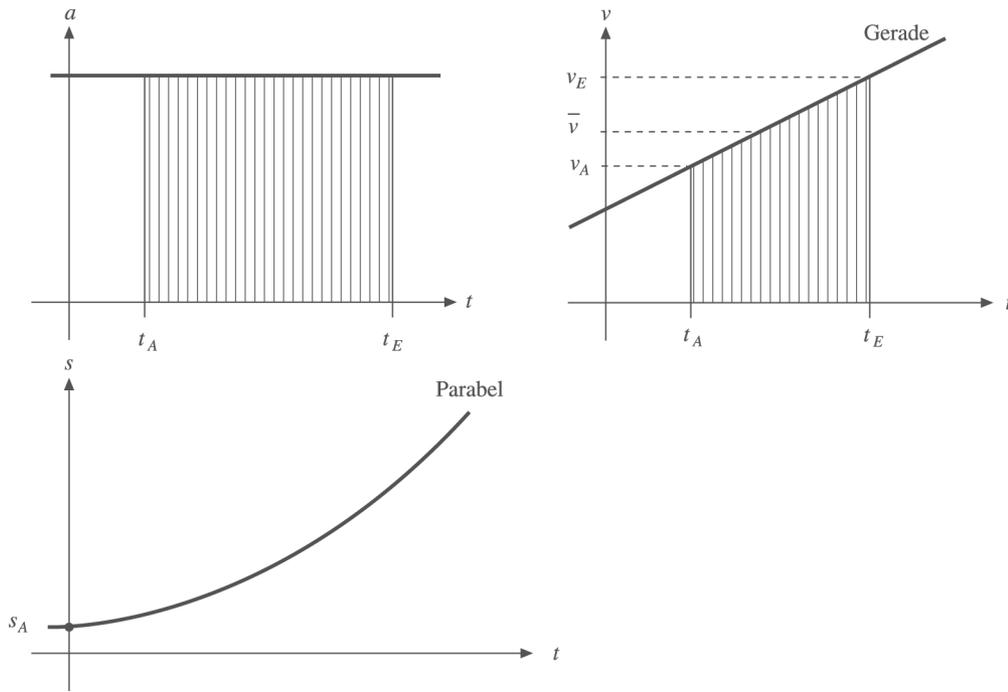


Abb. 2.6 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung im $a(t)$, $v(t)$ und $s(t)$ -Diagramm.

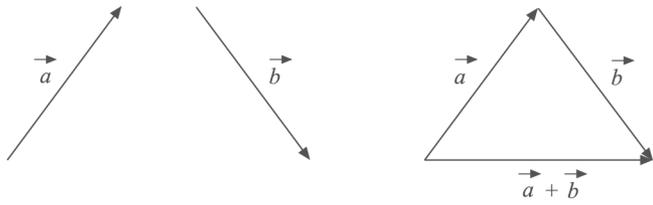


Abb. 2.7 Addition von Vektoren.

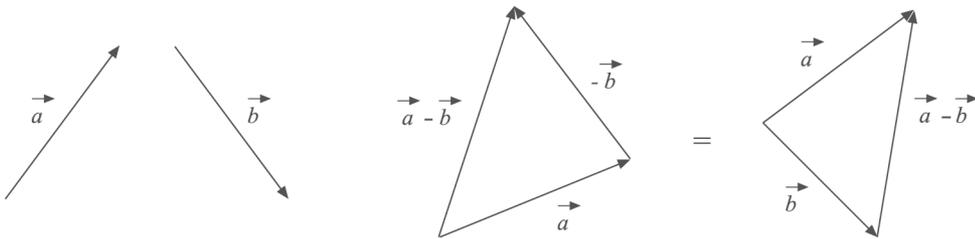


Abb. 2.8 Subtraktion von Vektoren.

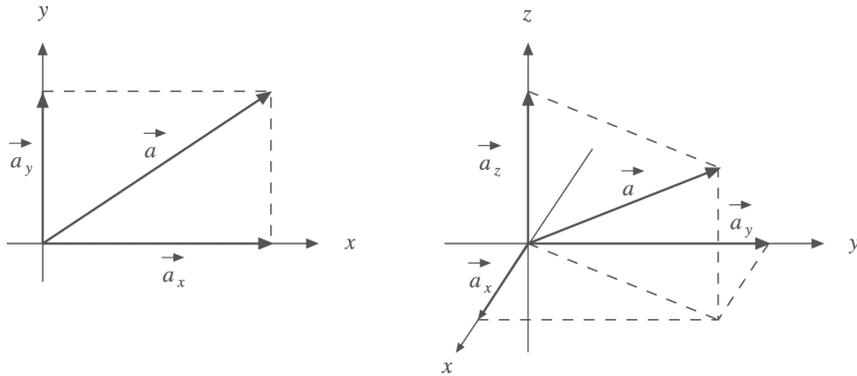


Abb. 2.9 Komponenten von Vektoren in zwei und drei Dimensionen.

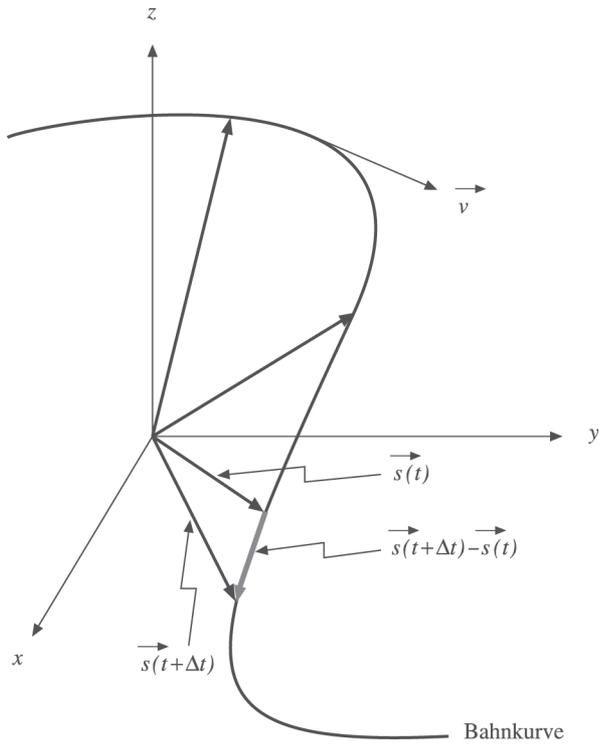


Abb. 2.10 Geschwindigkeitsvektor bei einer Bewegung in drei Dimensionen.

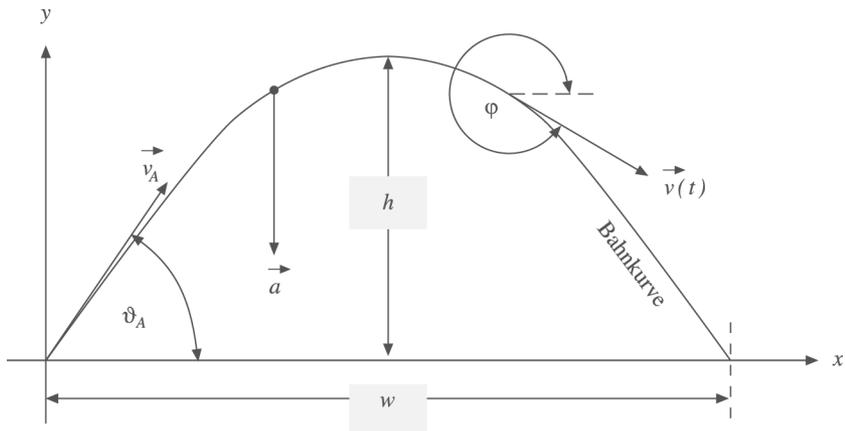


Abb. 2.11 Schiefer Wurf.

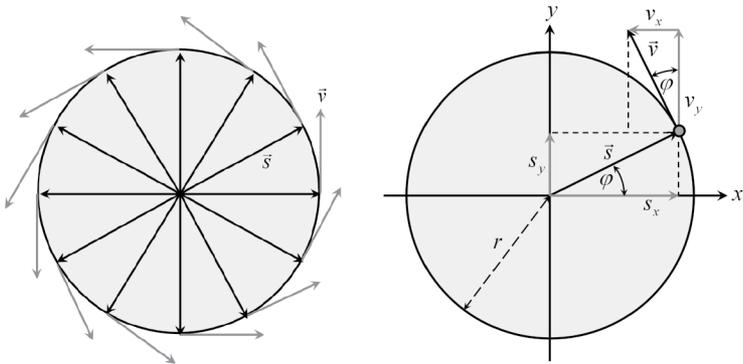


Abb. 2.12 Kreisbewegung.

Winkel-Größe		Bahn-Größe	
Winkel	φ	Bogen	$r\varphi$
Winkelgeschwindigkeit	$\omega = \dot{\varphi}$	Bahngeschwindigkeit	$r\omega$
Winkelbeschleunigung	$\alpha = \dot{\omega}$	Tangentialbeschleunigung	$r\alpha$

Tab. 2.1 Zusammenhang zwischen Winkel- und Bahngrößen bei der Kreisbewegung.



Abb. 2.13 Messung von Kräften.

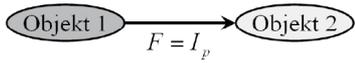


Abb. 2.14 Drittes Newtonsches Axiom: Impulsströme und Kräfte.

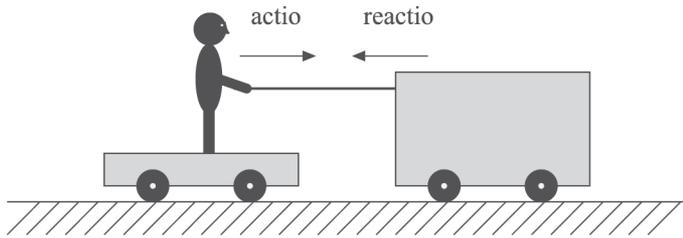


Abb. 2.15 Actio = reactio im abgeschlossenen System.

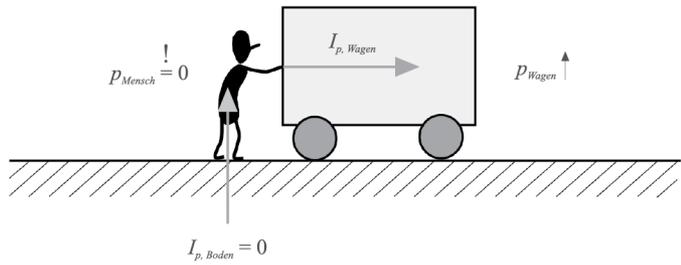


Abb. 2.16 Impulspumpe.

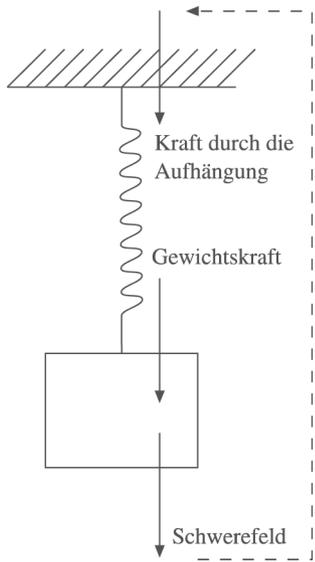


Abb. 2.17 Gedehte Feder im Gleichgewicht: geschlossener Impulsstromkreis.

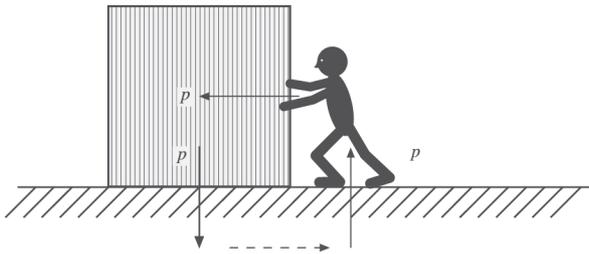


Abb. 2.18 Ein am Boden befestigtes Objekt wird von einer Person angeschoben.

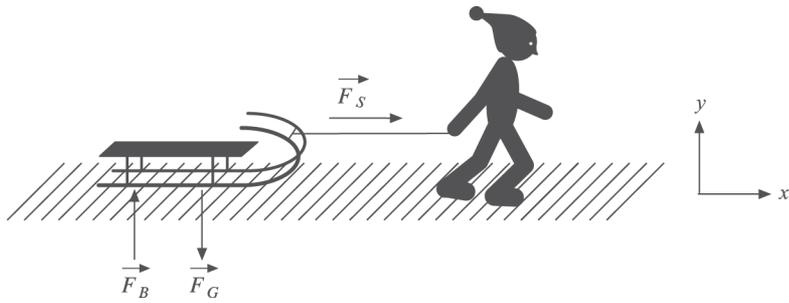


Abb. 2.19 Kräfte, die auf den Schlitten wirken.

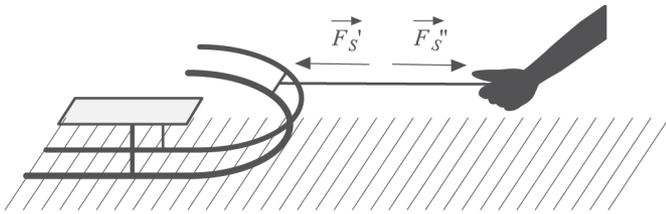


Abb. 2.20 Kräfte auf das Seil und die ziehende Hand.

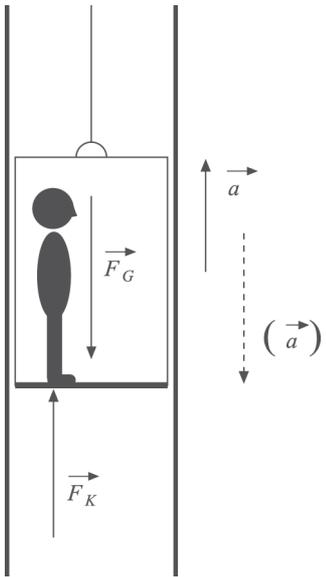


Abb. 2.21 Kräfte auf eine Person in einem Fahrstuhl, der sich beschleunigt bewegt.

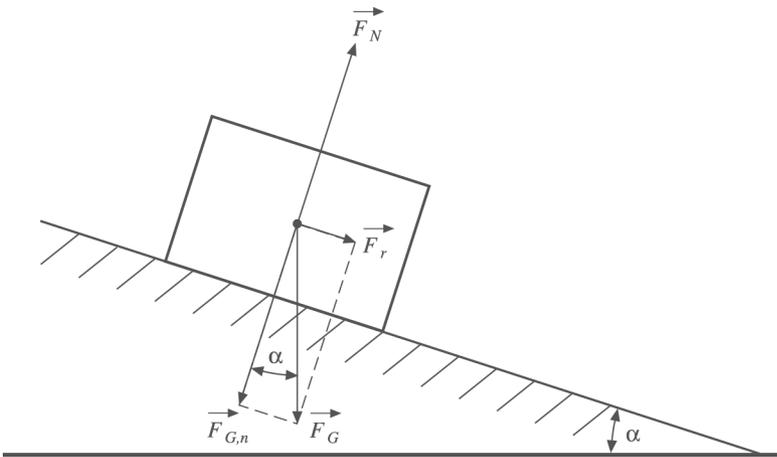


Abb. 2.22 Kräfte auf einen Körper, der eine schiefe Ebene hinuntergleitet.

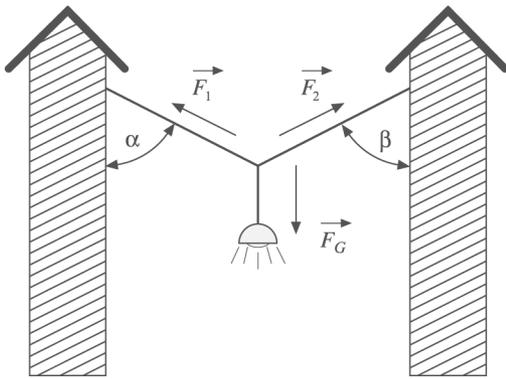


Abb. 2.23 Kräfte auf eine an Drahtseilen befestigte Lampe.

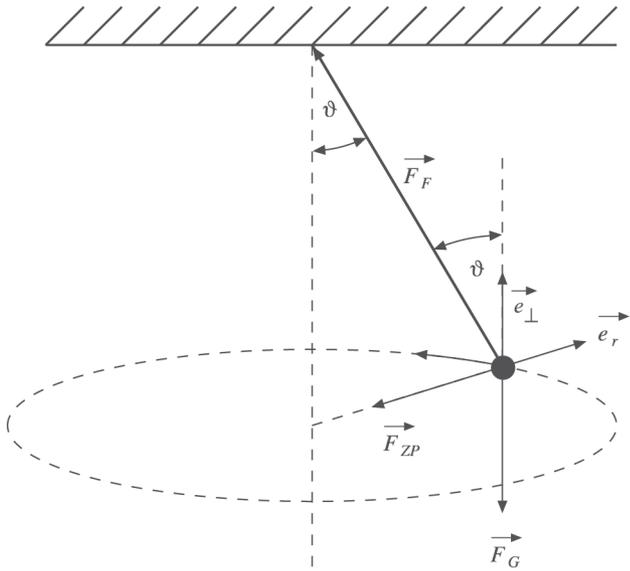


Abb. 2.24 Eine an einem Faden befestigte Kugel bewegt sich auf einer Kreisbahn.

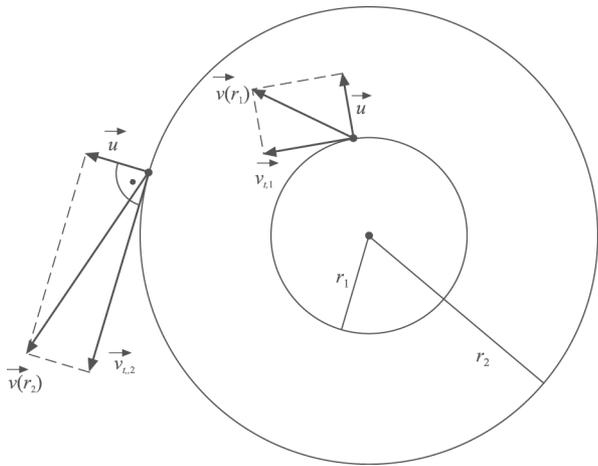


Abb. 2.25 Geschwindigkeitskomponenten bei einer Kreisbewegung mit sich änderndem Radius.

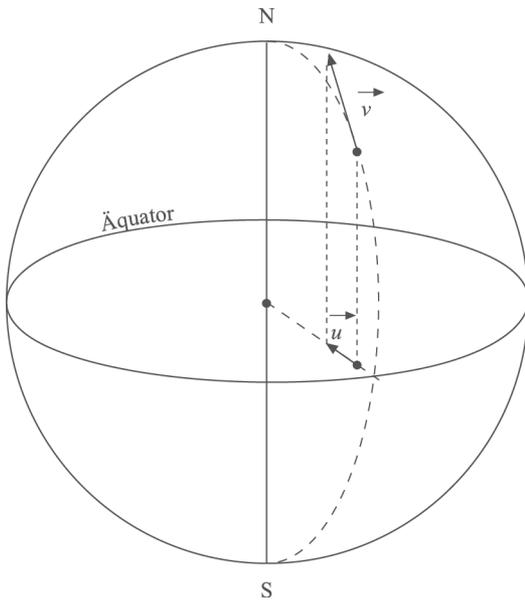


Abb. 2.26 Corioliskraft bei einer Bewegung auf der Erde in Nord-Süd-Richtung. Maßgeblich für die Corioliskraft ist die Projektion der Geschwindigkeit \vec{v} auf die Äquatorialebene.

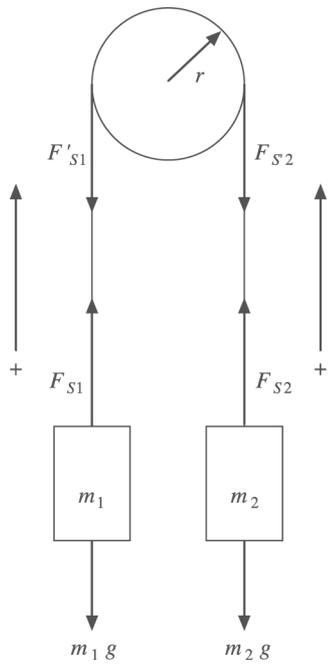


Abb. 2.27 Atwoodsche Fallmaschine.

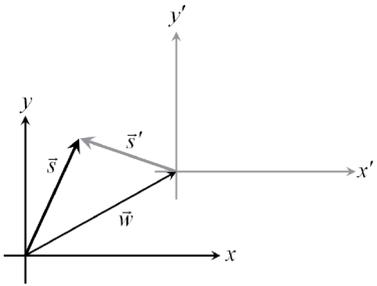


Abb. 2.28 Zueinander verschobene Bezugssysteme.

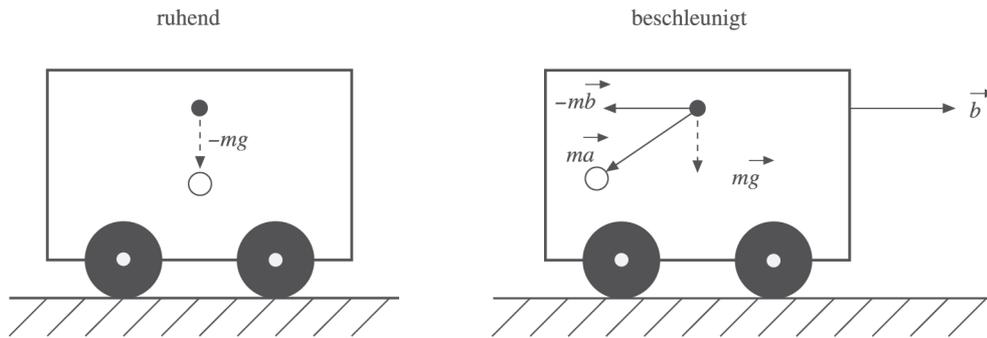


Abb. 2.29 Frei fallendes Objekt im ruhenden und im gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem.

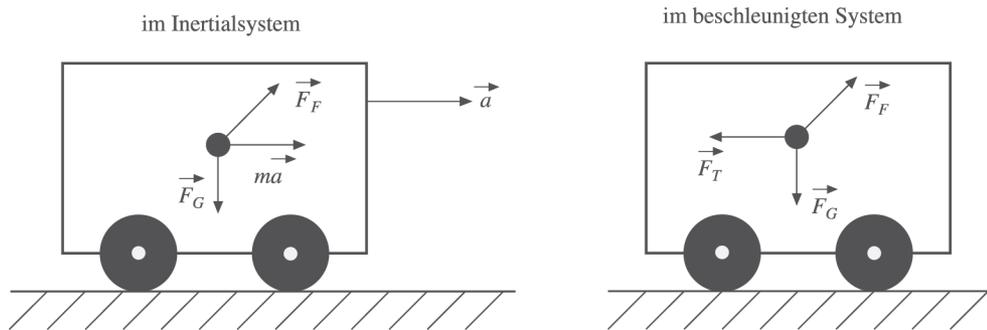


Abb. 2.30 Kräfte auf einen an einem Faden aufgehängten Gegenstand in einem horizontal beschleunigten Wagen.

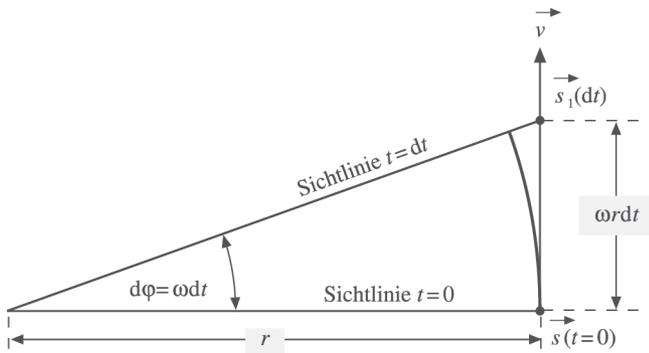


Abb. 2.31 Zentrifugalbeschleunigung eines Objektes, das sich im Inertialsystem gleichförmig mit v_{Bahn} bewegt, vom rotierenden Beobachter aus gesehen.

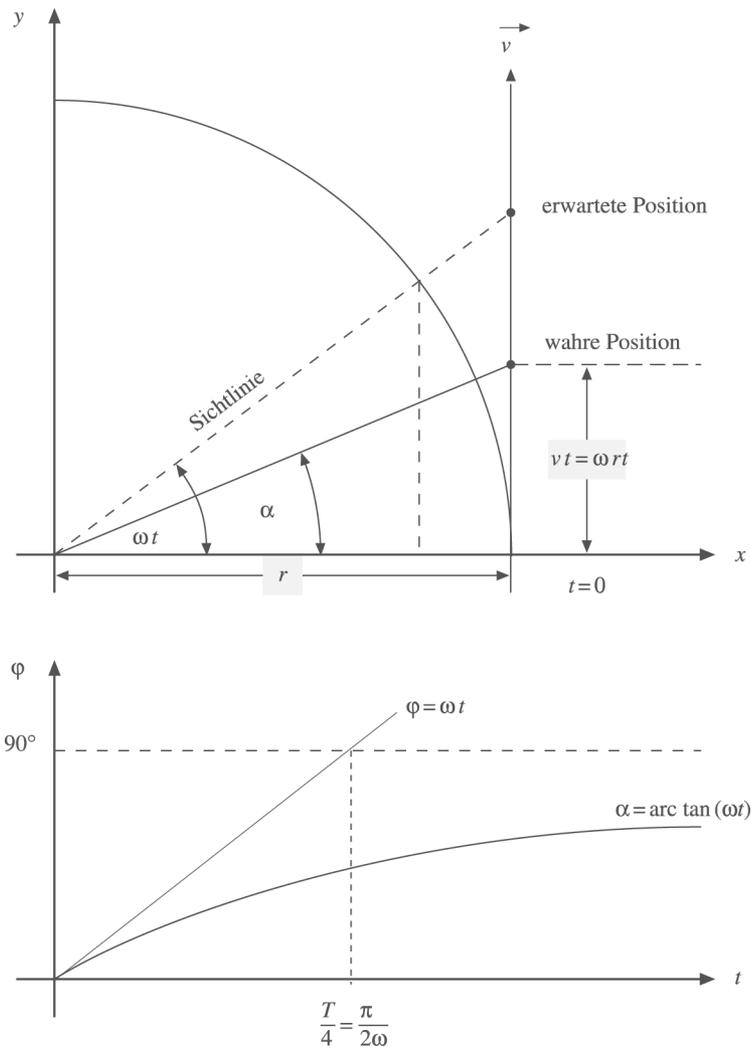


Abb. 2.32 Gleichförmig rotierendes Bezugssystem: Winkel zwischen der „Sichtlinie“ und dem sich gleichförmig bewegenden Objekt.

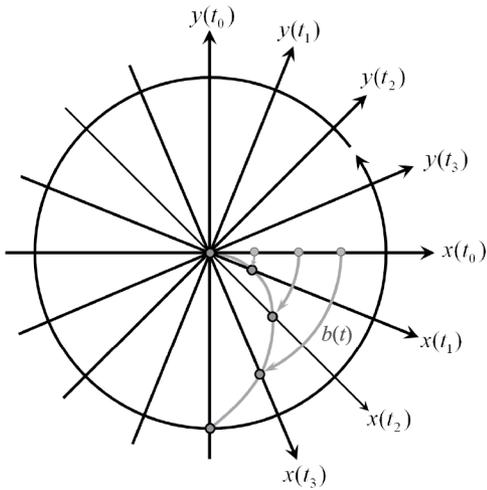


Abb. 2.33 Ablenkung eines sich gleichförmig durch den Kreismittelpunkt bewegenden Objektes aus der Sicht der sich drehenden Person.

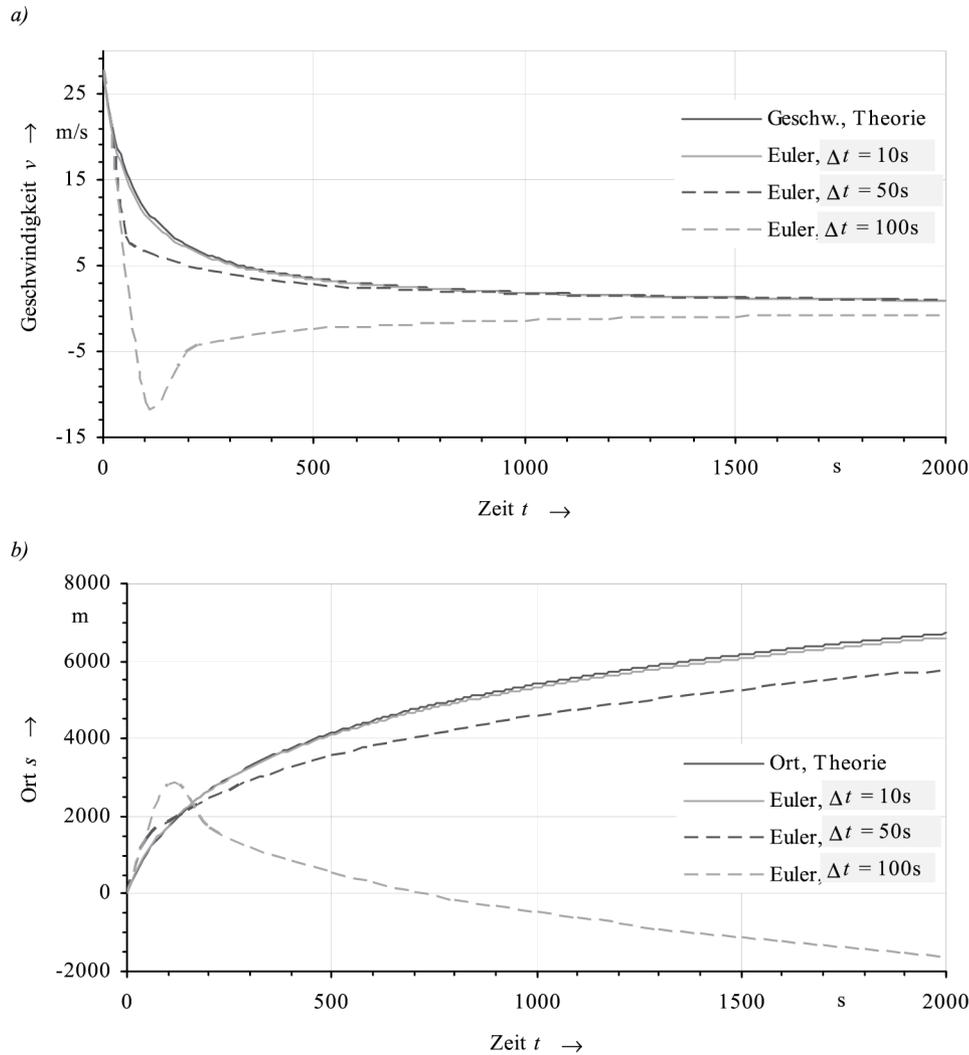


Abb. 2.34 Vergleich der analytischen Lösung einer Bewegungsgleichung mit numerischen Resultaten nach dem Euler-Verfahren. (a) Ort, (b) Geschwindigkeit.

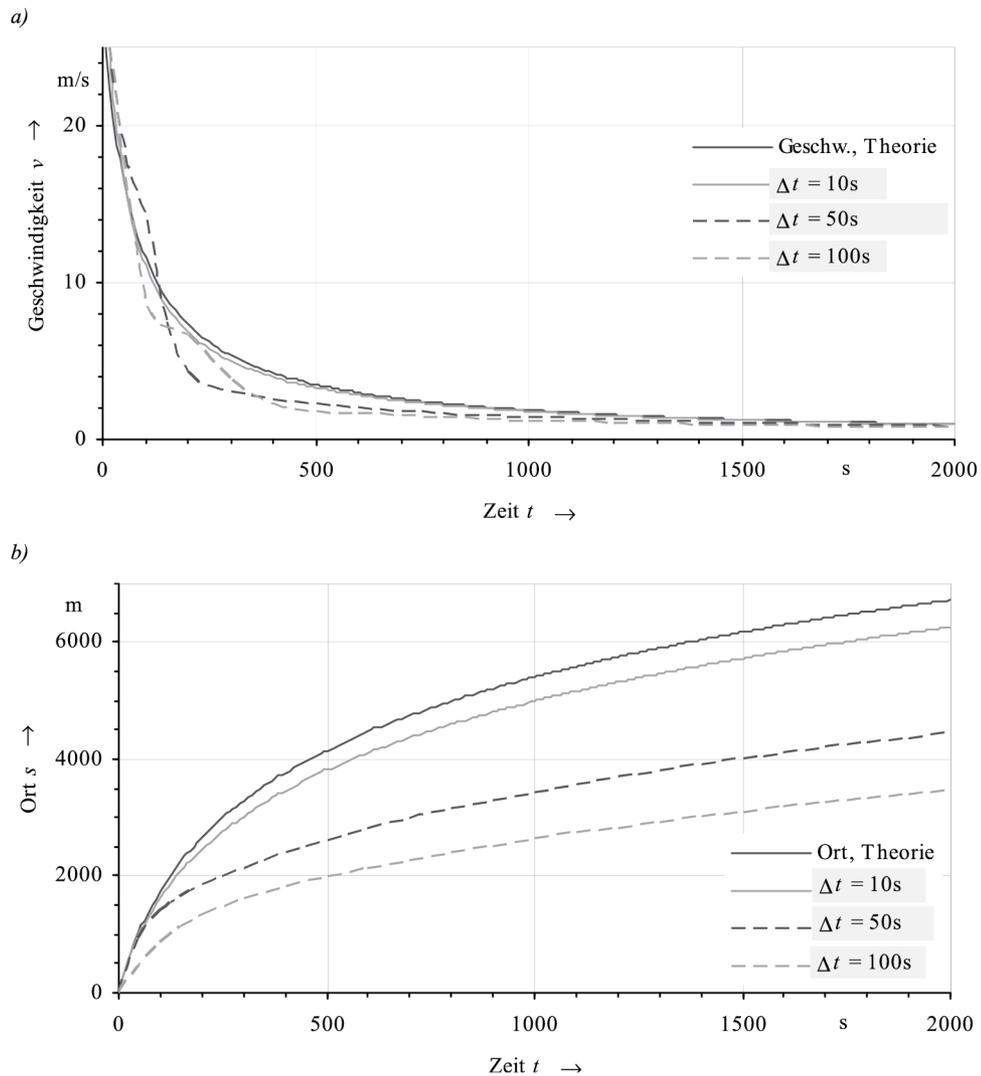


Abb. 2.35 Wie **Abb. 2.34**, hier wurde die Berechnung der Position um einen Term der gleichmäßig beschleunigten Bewegung erweitert; (a) Ort, (b) Geschwindigkeit.

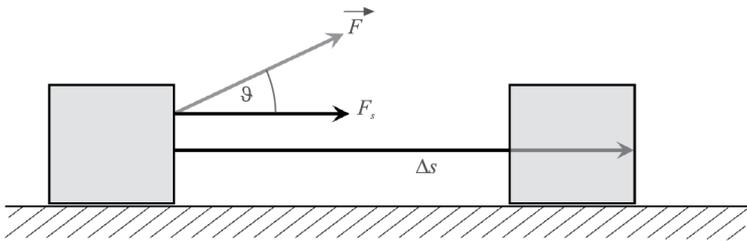


Abb. 2.36 Bewegung eines Objektes unter Einfluss einer konstanten Kraft.

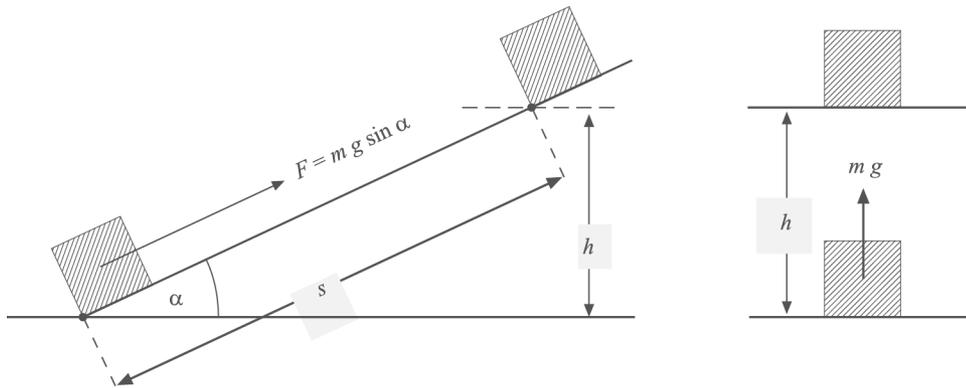


Abb. 2.37 Hubarbeit und Arbeit an der schiefen Ebene.

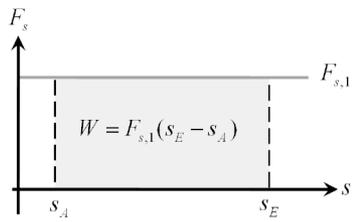


Abb. 2.38 Arbeitsdiagramm einer örtlich konstanten Kraft.

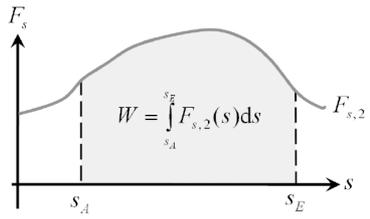


Abb. 2.39 Arbeitsdiagramm einer örtlich nicht konstanten Kraft.

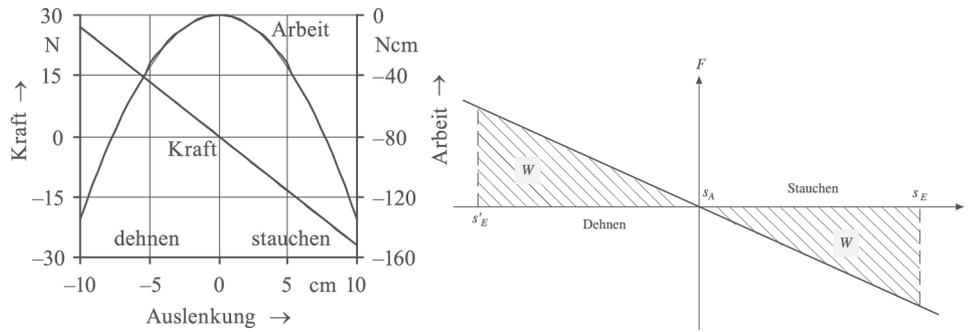


Abb. 2.40 Verlauf der Federkraft beim Dehnen und Stauchen sowie die Deformationsarbeit.

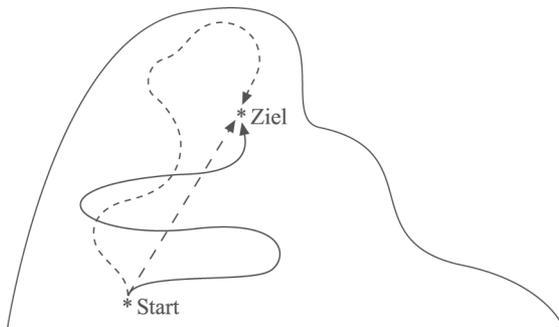


Abb. 2.41 Wege im Gebirge, auf denen eine konservative Kraft an einem Objekt die gleiche Arbeit verrichtet.

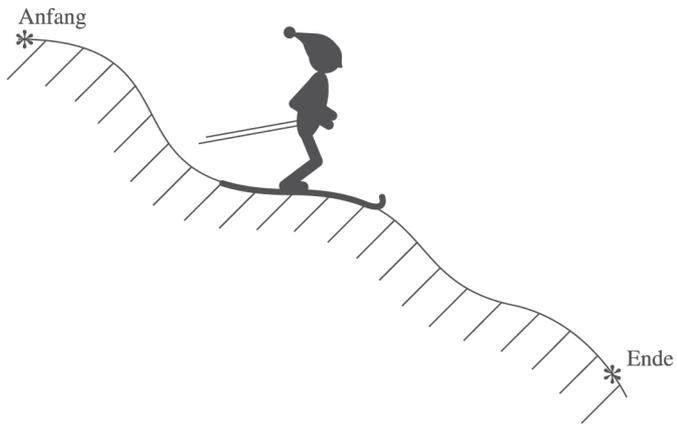


Abb. 2.42 Schifahrer auf einer beliebig geformten Piste mit definierter Höhendifferenz.

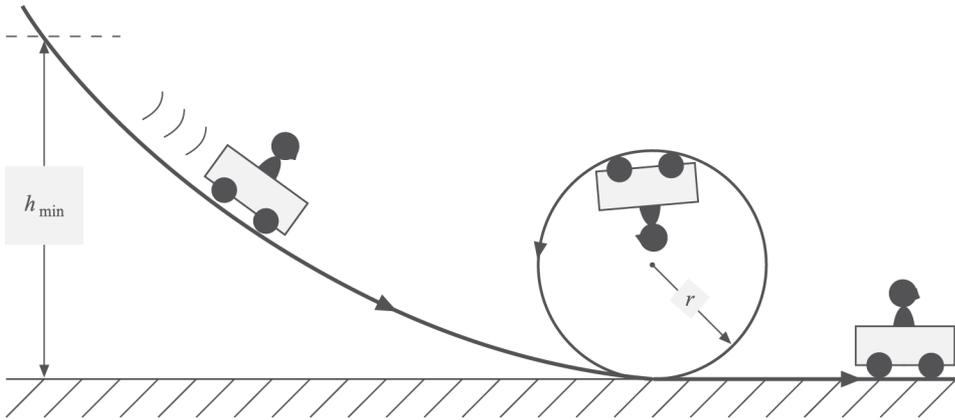


Abb. 2.43 Fahrt durch einen Looping: In welcher Höhe muss der Wagen (aus der Ruhe) abfahren?

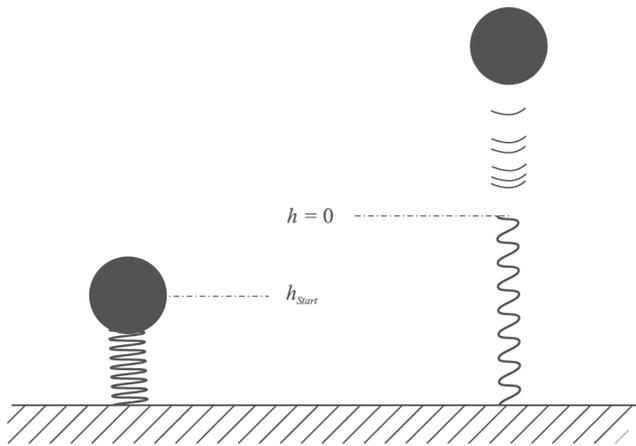


Abb. 2.44 Eine gestauchte Feder schießt eine Kugel senkrecht nach oben. Welche Höhe erreicht sie?

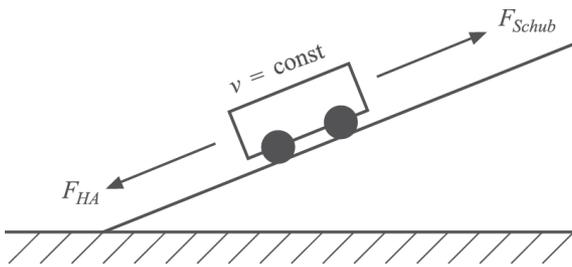


Abb. 2.45 Arbeit, die an einem Wagen verrichtet wird, wenn er eine schiefe Ebene mit konstanter Geschwindigkeit hinaufgeschoben wird.

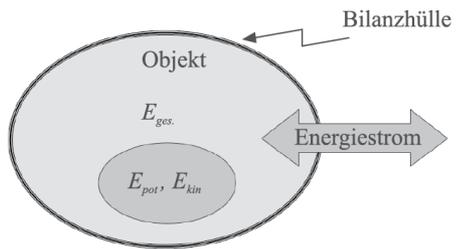


Abb. 2.46 Energiestrom durch die Bilanzhülle eines Objektes.

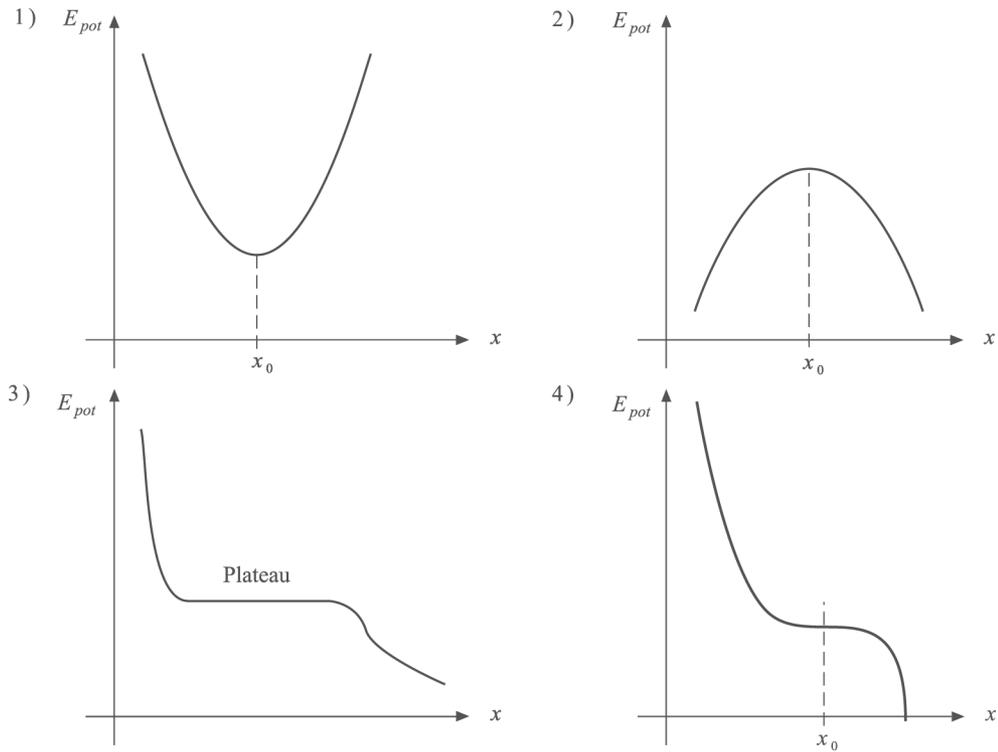


Abb. 2.47 Verlauf der potentiellen Energie in einem Gebirgszug (eindimensional): 1) Minimum, 2) Maximum, 3) Plateau, 4) Sattelpunkt.

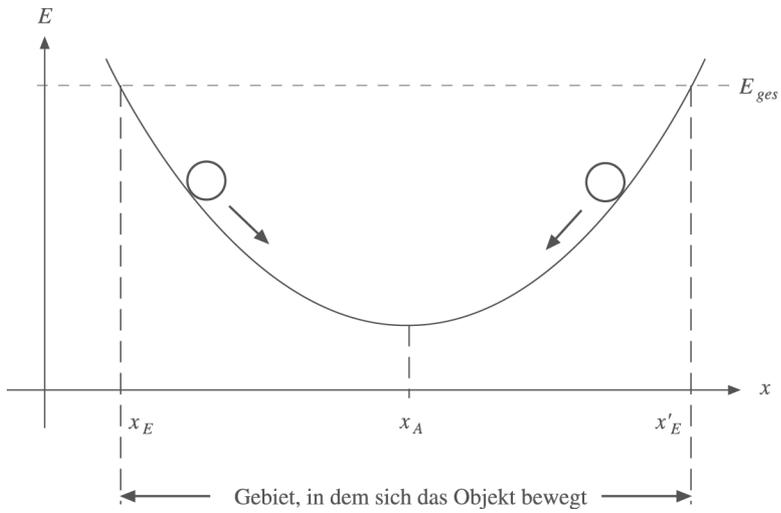


Abb. 2.48 Bewegung in der Umgebung eines relativen Minimums der potentiellen Energie.

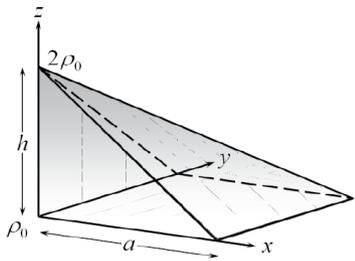


Abb. 2.49 Berechnung der Schwerpunktkoordinaten einer quadratischen Pyramide mit variabler Dichte.

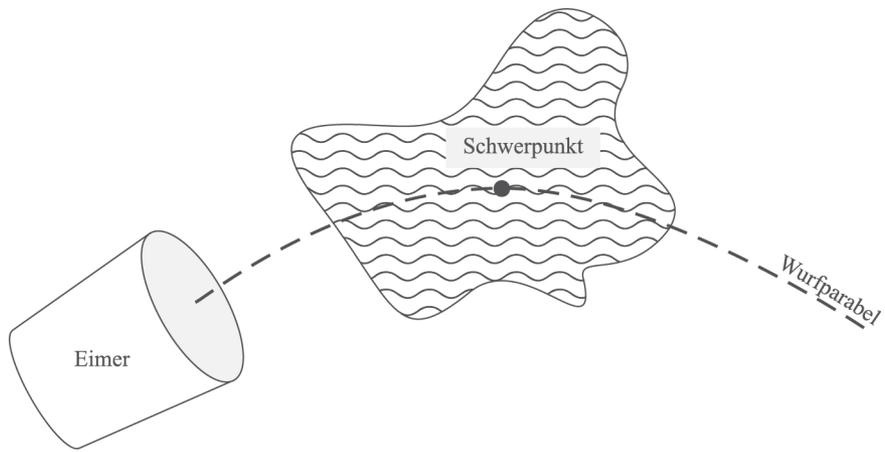


Abb. 2.50 Ein Eimer Wasser wird im hohen Bogen ausgeschüttet.

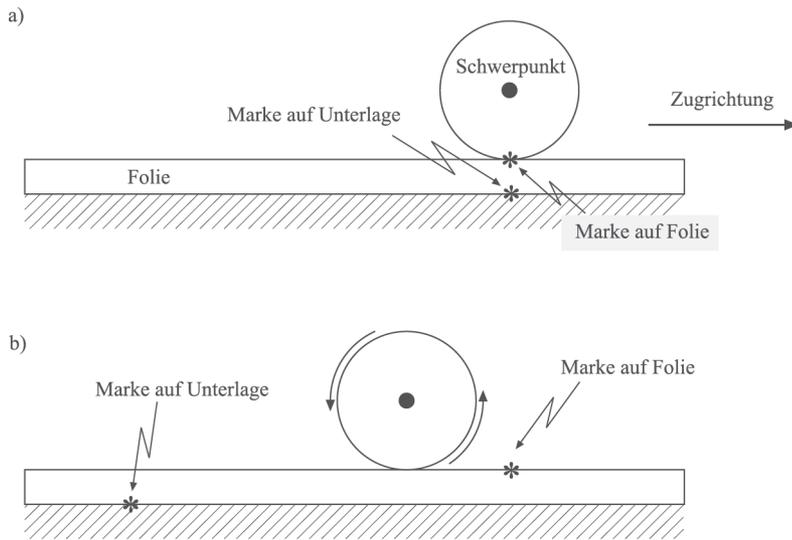


Abb. 2.51 Versuch: Eine auf einer Folie liegende Kugel wird durch eine äußere Kraft, die durch die Folie vermittelt wird, beschleunigt. Der Schwerpunkt der Kugel bewegt sich in Richtung der äußeren Kraft.

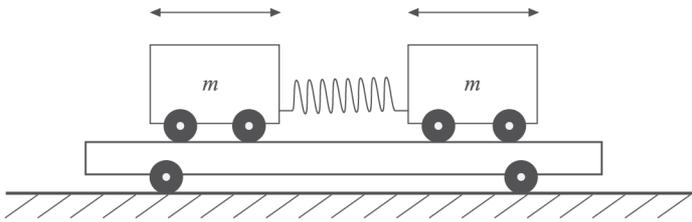


Abb. 2.52 Zwei Objekte gleicher Masse sind mit einer Feder verbunden und schwingen. Der Schwerpunkt ist in Ruhe, die kinetische Energie im Schwerpunktsystem ändert sich periodisch.

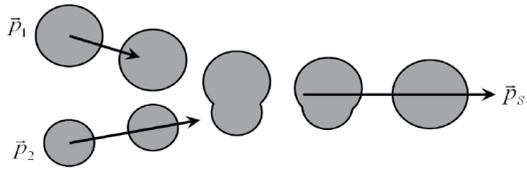


Abb. 2.53 Unelastischer Stoß im Labor- und im Schwerpunktsystem.

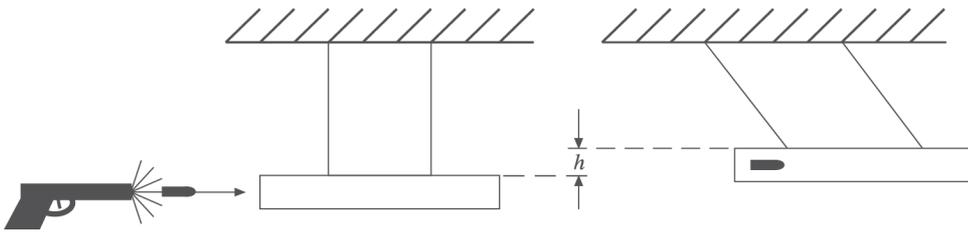


Abb. 2.54 Ballistisches Pendel zur Bestimmung von Geschwindigkeit.

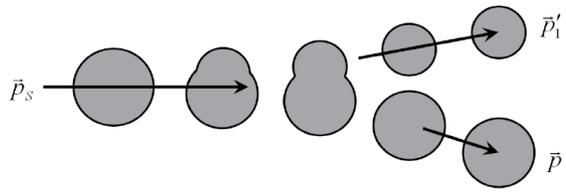


Abb. 2.55 Zeitumgekehrter unelastischer Stoß im Labor- und im Schwerpunktsystem.

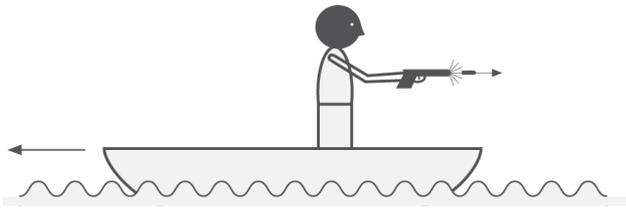


Abb. 2.56 Ein Mensch in einem Boot schießt mit seiner Pistole eine Folge von Schüssen heckwärts.

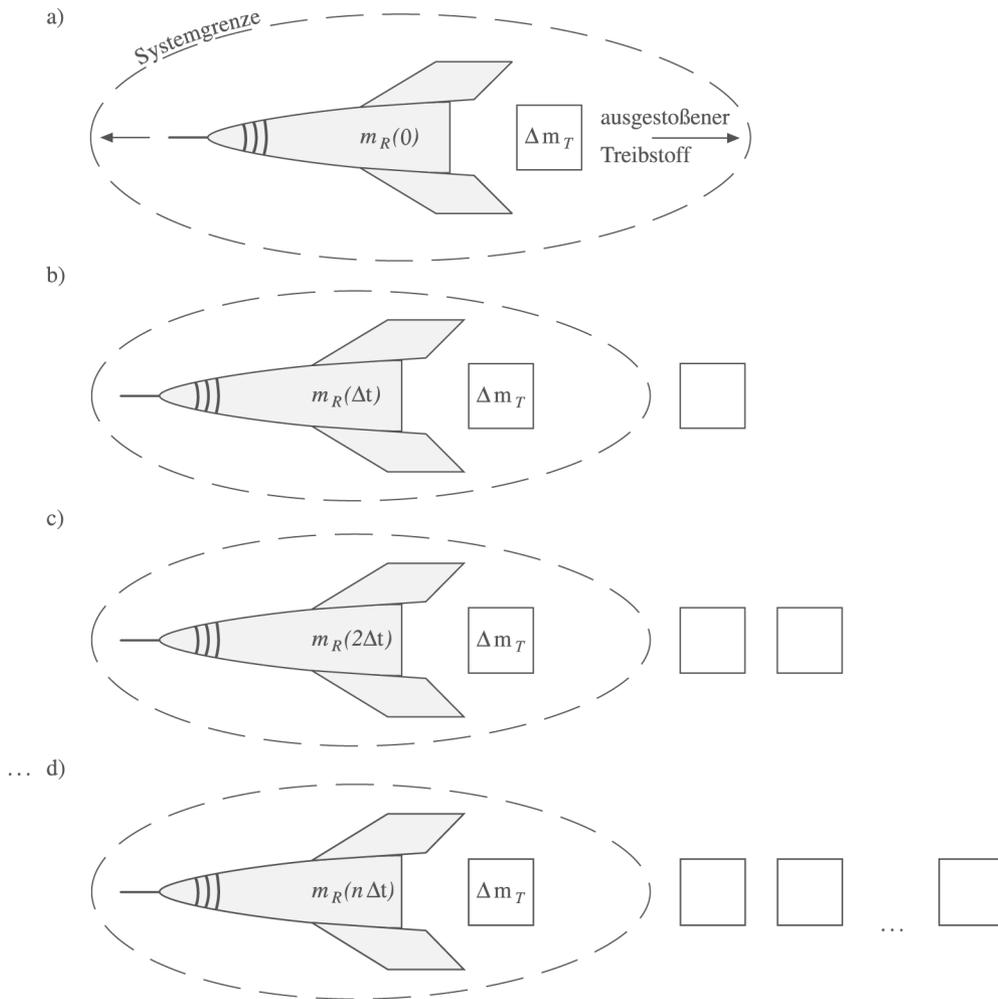


Abb. 2.57 Eine Rakete stößt im Zeitintervall Δt eine Treibstoffmenge Δm_T mit einer Geschwindigkeit v_T relativ zur Rakete aus
a) Schritt 1 $[0, \Delta t]$, b) Schritt 2 $[\Delta t, 2\Delta t]$, c) Schritt 3 $[2\Delta t, 3\Delta t]$, d) Schritt n $[(n-1)\Delta t, n\Delta t]$.

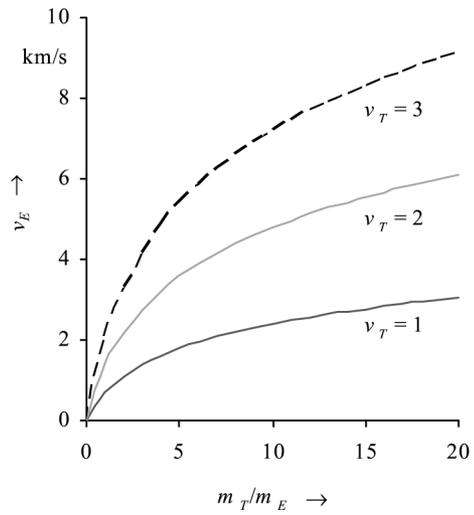


Abb. 2.58 Erzielbare Endgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Verhältnisses m_T/m_E .

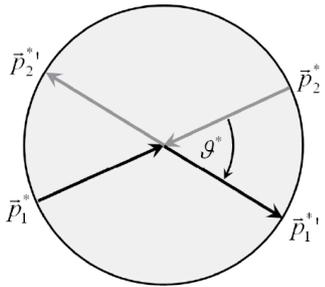


Abb. 2.59 Impulse vor und nach einem elastischen Stoß.

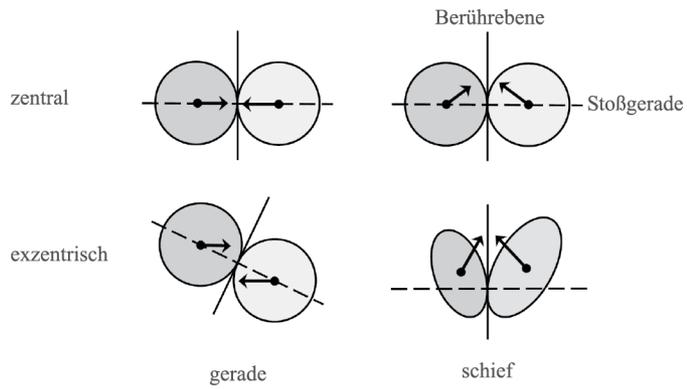


Abb. 2.60 Stoßgeometrien bei zentralen und nicht zentralen Stößen.

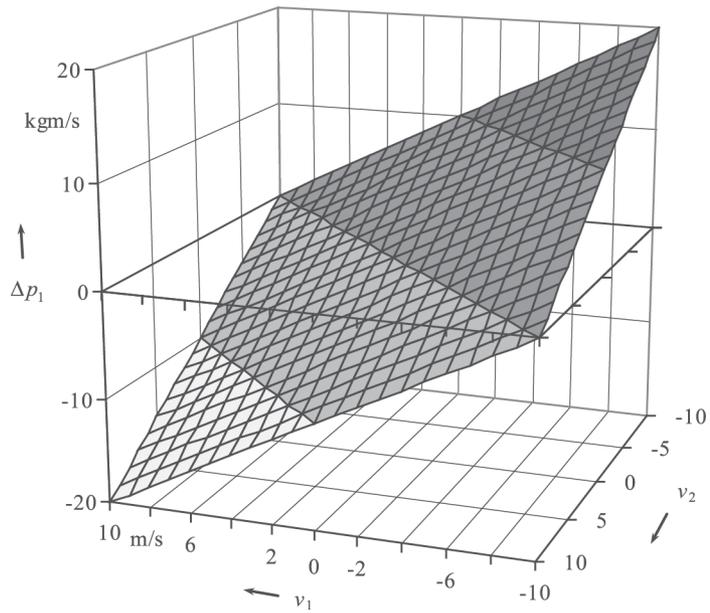


Abb. 2.61 Impulsübertrag beim elastischen Stoß zwischen zwei Objekten gleicher Masse.

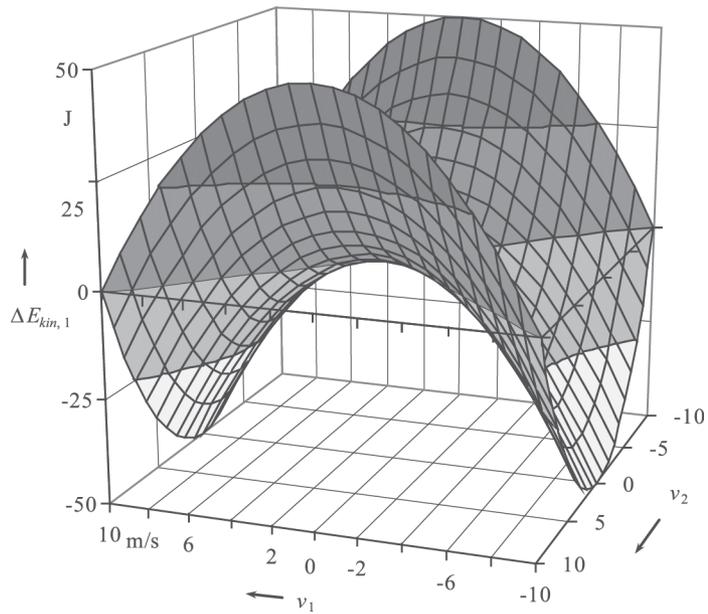


Abb. 2.62 Energieübertrag beim elastischen Stoß zwischen zwei Objekten gleicher Masse.

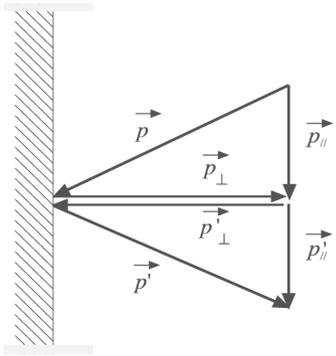


Abb. 2.63 Schiefer zentraler Stoß einer Kugel mit einer Wand.

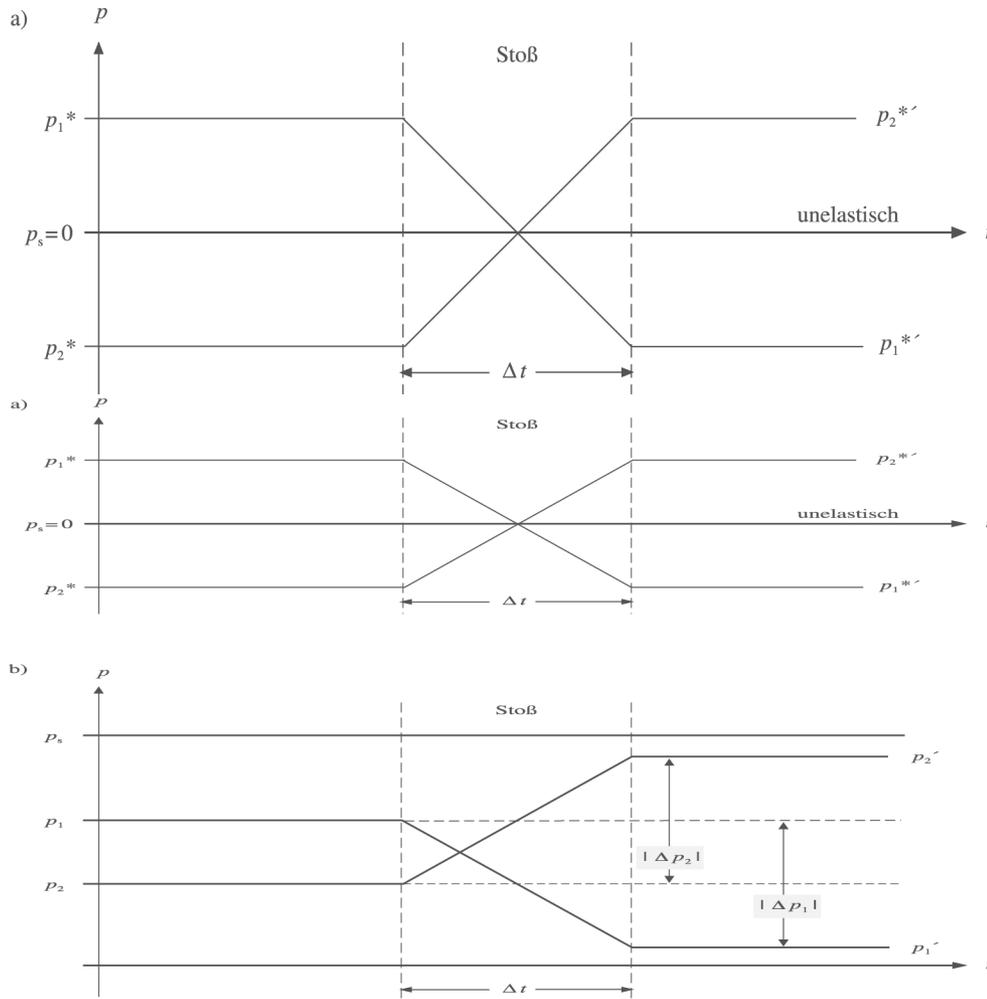


Abb. 2.64 Impulse in Abhängigkeit von der Zeit im (a) Schwerpunktsystem und im (b) Laborsystem.

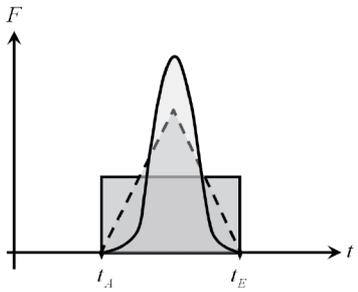


Abb. 2.65 Unterschiedliche Kraftverläufe während eines Stoßes.

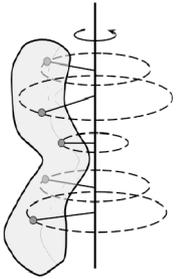


Abb. 2.66 Ein starrer Körper rotiert um eine Achse. Hervorgehoben sind die Bahnen einiger Massenpunkte.

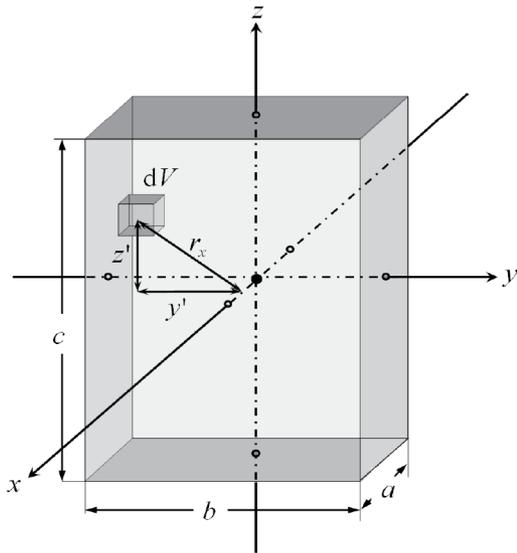


Abb. 2.67 Berechnung des Trägheitsmomentes eines Quaders.

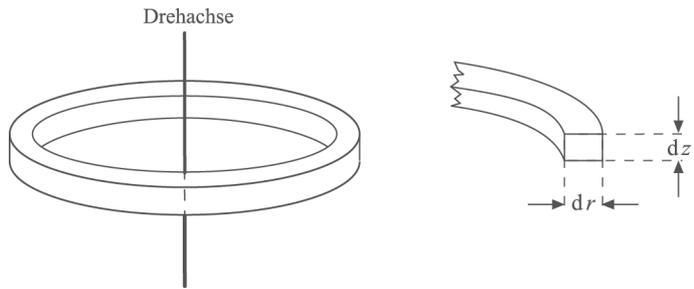


Abb. 2.68 Zur Berechnung von Trägheitsmomenten rotationssymmetrischer Körper.

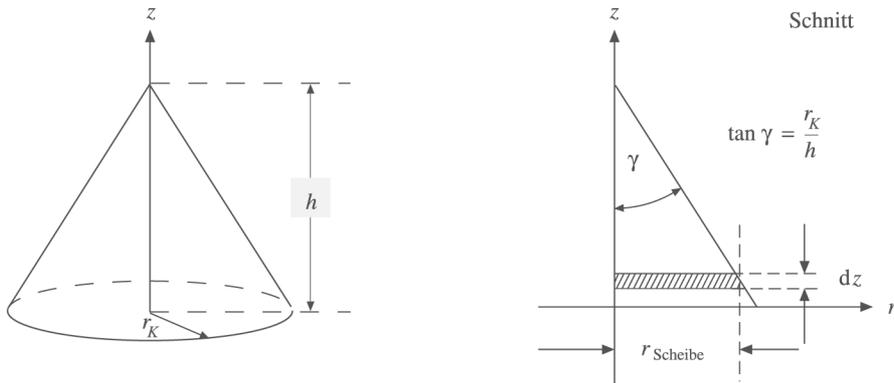


Abb. 2.69 Zur Berechnung des Trägheitsmomentes eines Kegels.

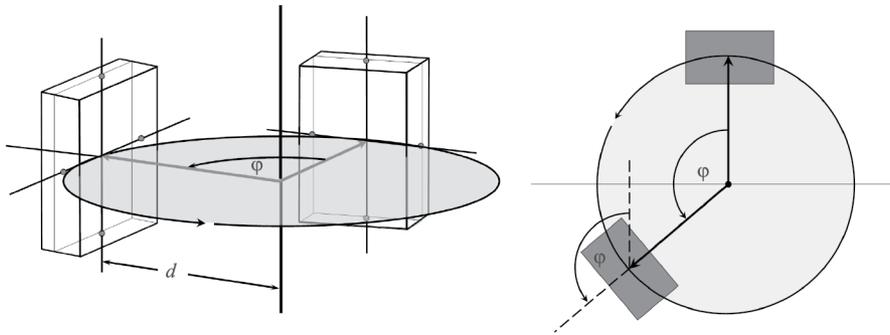


Abb. 2.70 Rotation um eine Achse, die nicht durch den Schwerpunkt verläuft.

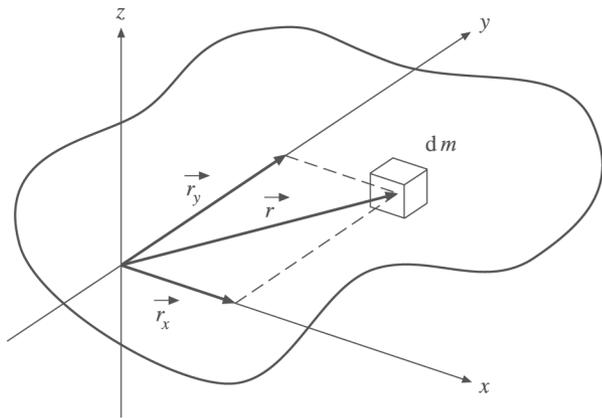


Abb. 2.71 Trägheitsmoment eines scheibenförmigen Körpers.

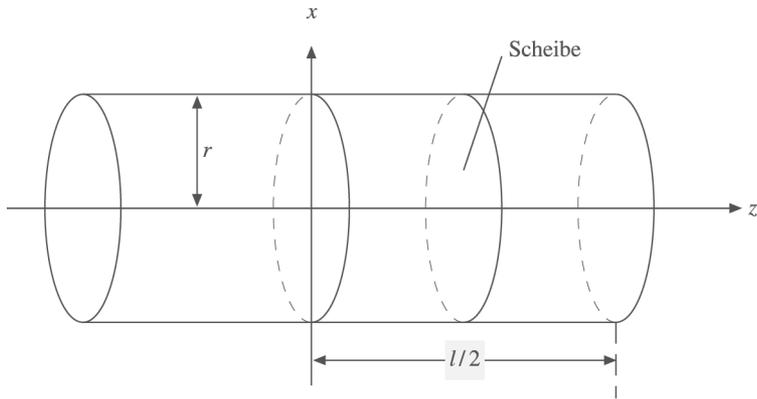


Abb. 2.72 Trägheitsmoment eines Zylinders bezüglich einer Schwerpunktsachse senkrecht zum Mantel.

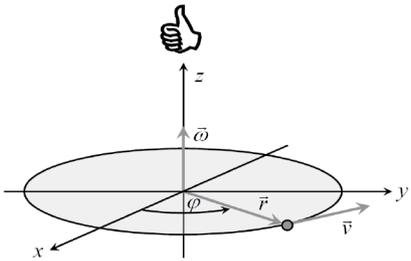


Abb. 2.73 Zur Definition des Vektors der Winkelgeschwindigkeit.

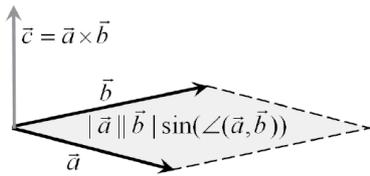


Abb. 2.74 Zur Definition des Vektorproduktes.

Winkel-Größe		Bahn-Größe	
Winkelgeschwindigkeit	$\vec{\omega}$	Bahngeschwindigkeit	$\vec{\omega} \times \vec{r}$
Winkelbeschleunigung	$\vec{\alpha} = \dot{\omega} \vec{e}_\omega$	Tangentialbeschleunigung	$\vec{\alpha} \times \vec{r}$
differentielles Winkelstück	$d\vec{\varphi}$	differentielles Bogenstück	$d\vec{\varphi} \times \vec{r}$

Tab. 2.2 Bahn- und Winkelgrößen bei Drehbewegungen.

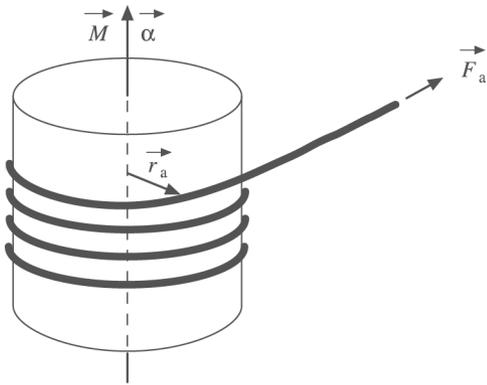


Abb. 2.75 Ein Zylinder wird durch eine tangential angreifende Kraft in Rotation gebracht.

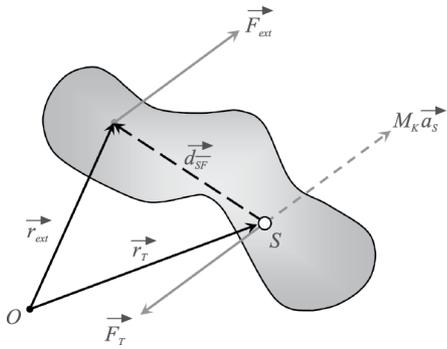


Abb. 2.76 Eine äußere Kraft wirkt auf einen frei beweglichen starren Körper. Im Schwerpunktsystem erfährt der Körper eine Trägheitskraft, die im Schwerpunkt angreift.

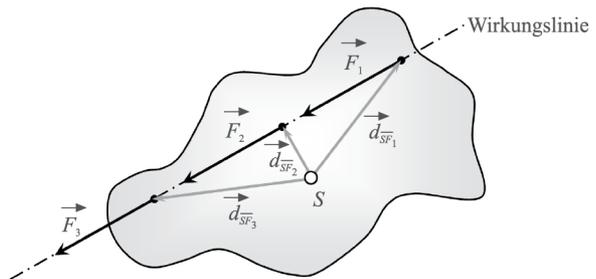


Abb. 2.77 Zur Linienflüchtigkeit äußerer Kräfte.

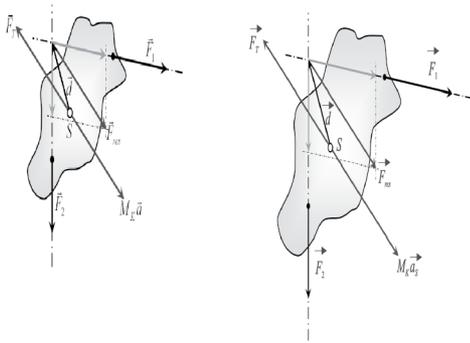


Abb. 2.78 Resultierende Kraft auf einen starren Körper.

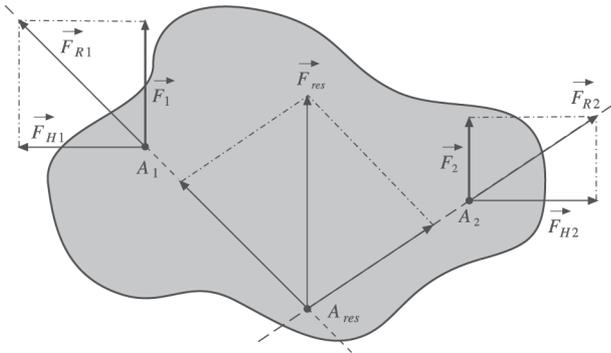


Abb. 2.79 Resultierende Kraft auf einen starren Körper bei kollinearen, dem Betrage nach ungleichen Kräften.

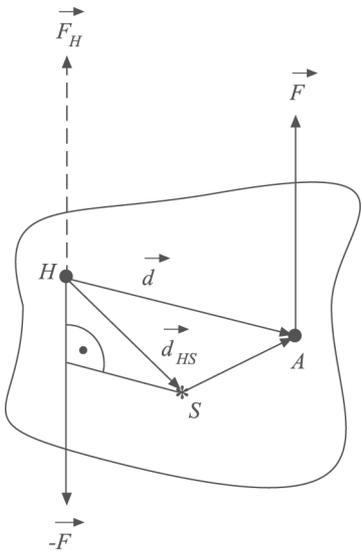


Abb. 2.80 Starrer Körper unter Einfluss einer Kraft. Ein Punkt außerhalb des Schwerpunktes ist fixiert.

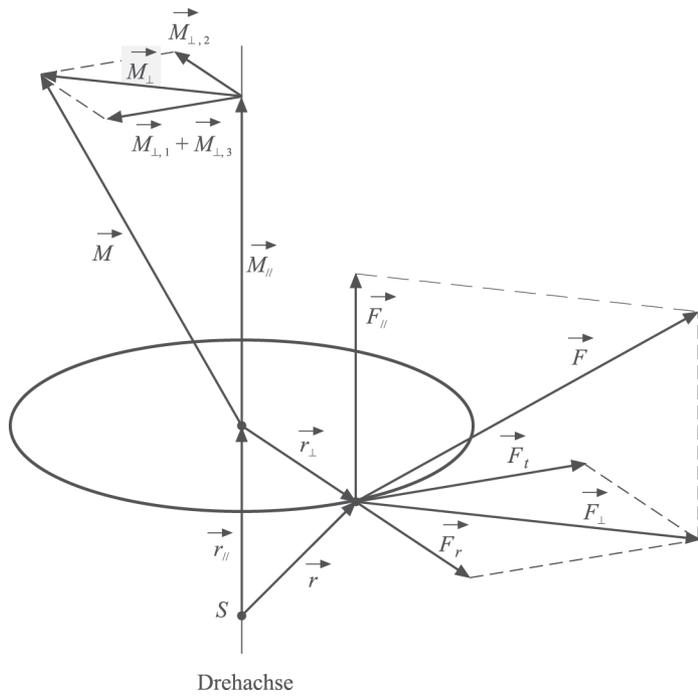


Abb. 2.81 Zerlegung der Kraft, die auf den starren Körper (feste Achse durch den Schwerpunkt) wirkt, in achsenparallele, radiale und tangentielle Komponenten. Auf dem Kreis bewegt sich der Angriffspunkt der Kraft.

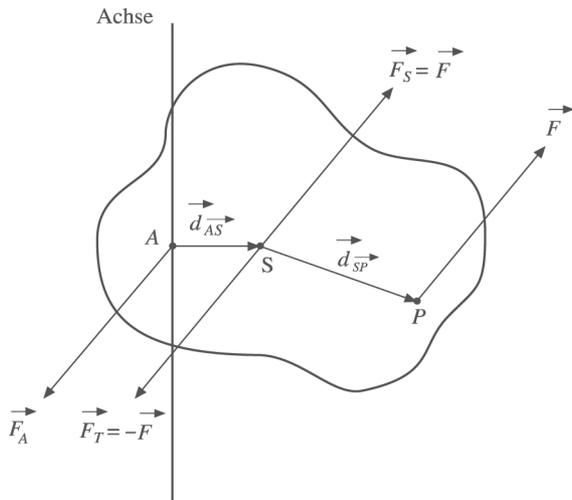


Abb. 2.82 Ein starrer Körper ist durch eine Achse fixiert und bewegt sich unter dem Einfluss einer Kraft.

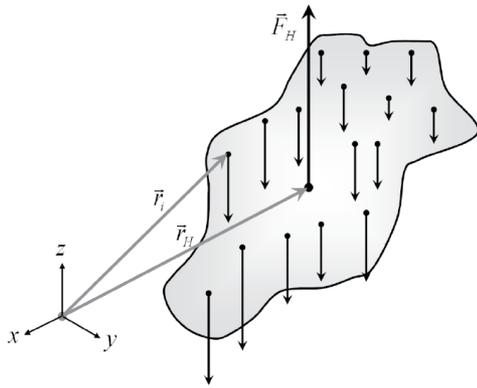


Abb. 2.83 Ein starrer Körper unter Einfluss der Schwerkraft. Wann ist er im Gleichgewicht?

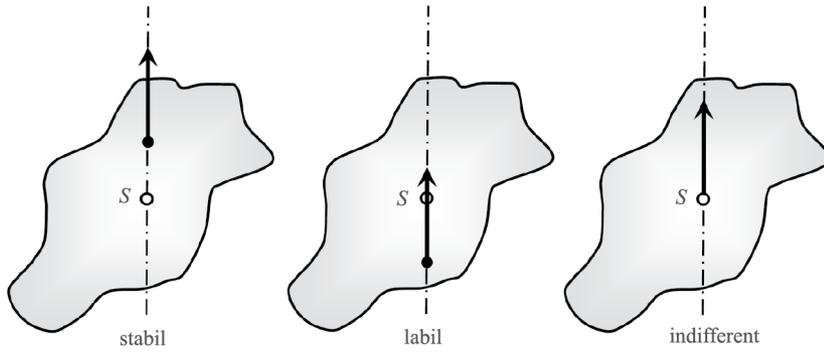


Abb. 2.84 Stabiles, labiles und indifferentes Gleichgewicht beim starren Körper unter Einfluss der Schwerkraft.

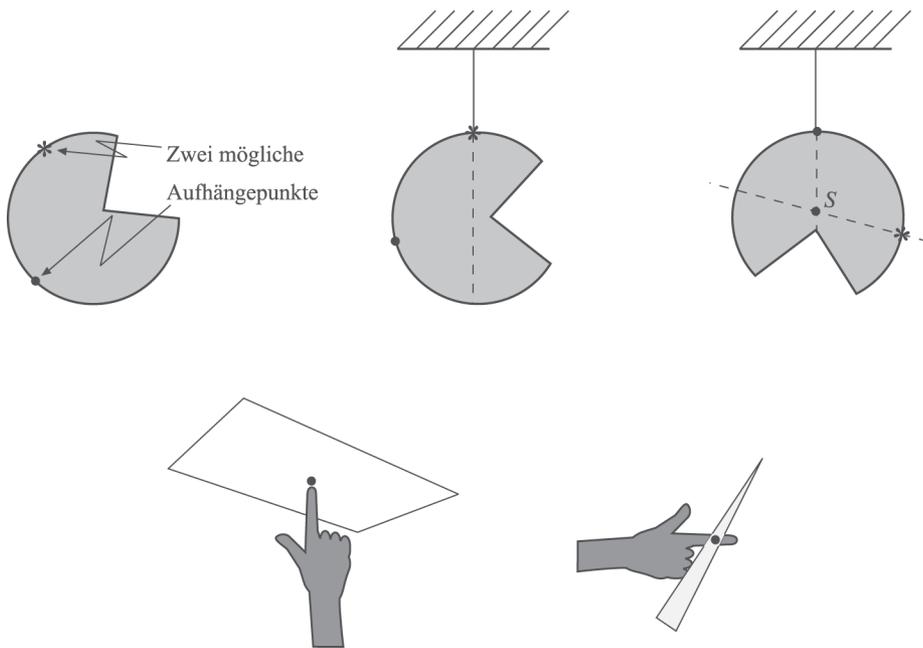


Abb. 2.85 Experimentelle Bestimmung des Schwerpunktes eines Körpers mit unbekannter Massenverteilung.

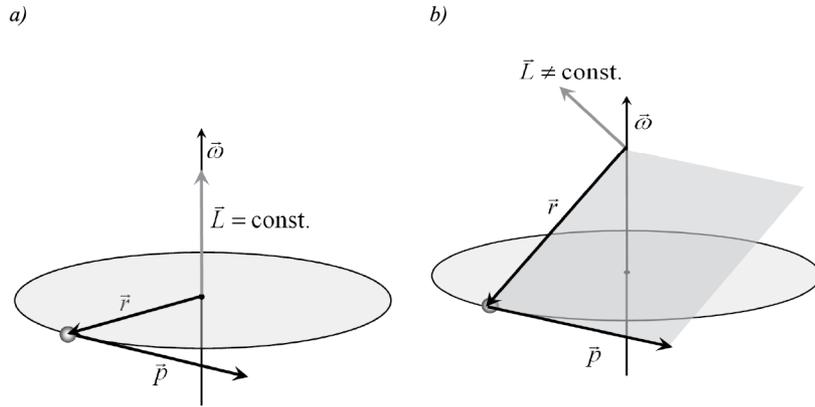


Abb. 2.86 Bewegung eines Massenpunktes auf einer Kreisbahn; (a) Koordinatenursprung im Mittelpunkt des Kreises, (b) Ursprung auf der Achse verschoben.

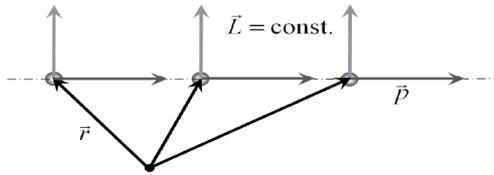


Abb. 2.87 Drehimpuls einer gradlinigen gleichförmigen Bewegung.

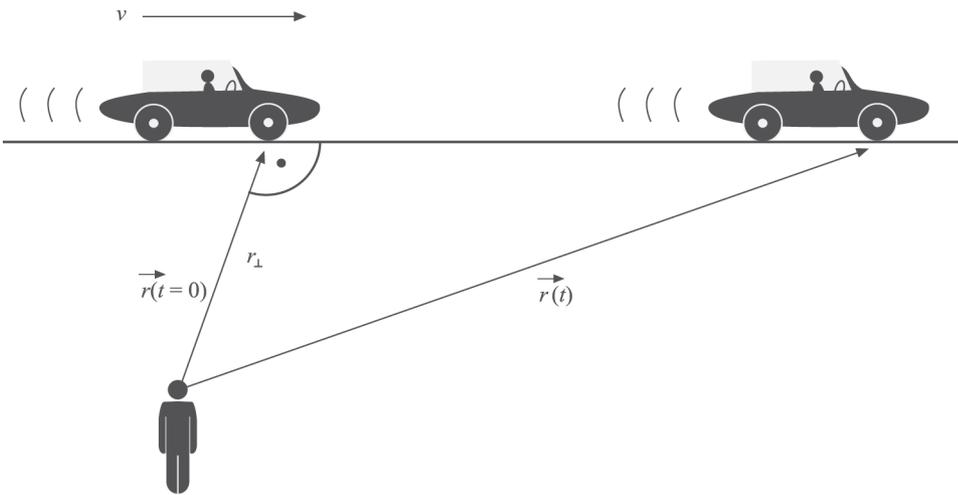


Abb. 2.88 Ein Rennwagen fährt an einem Zuschauer vorbei. Wie schnell muss er seinen Kopf drehen?

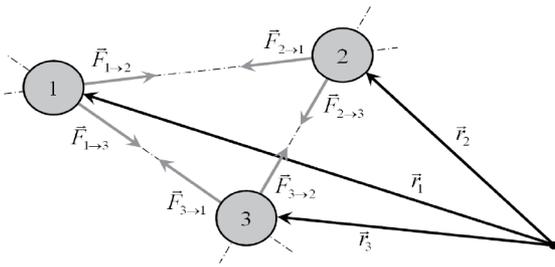


Abb. 2.89 Wechselwirkungskräfte eines abgeschlossenen Systems aus drei Massenpunkten.



Abb. 2.90 Änderung des Trägheitsmomentes einer Person, die auf einem Drehstuhl sitzt: Mit wachsendem Trägheitsmoment sinkt die Winkelgeschwindigkeit.

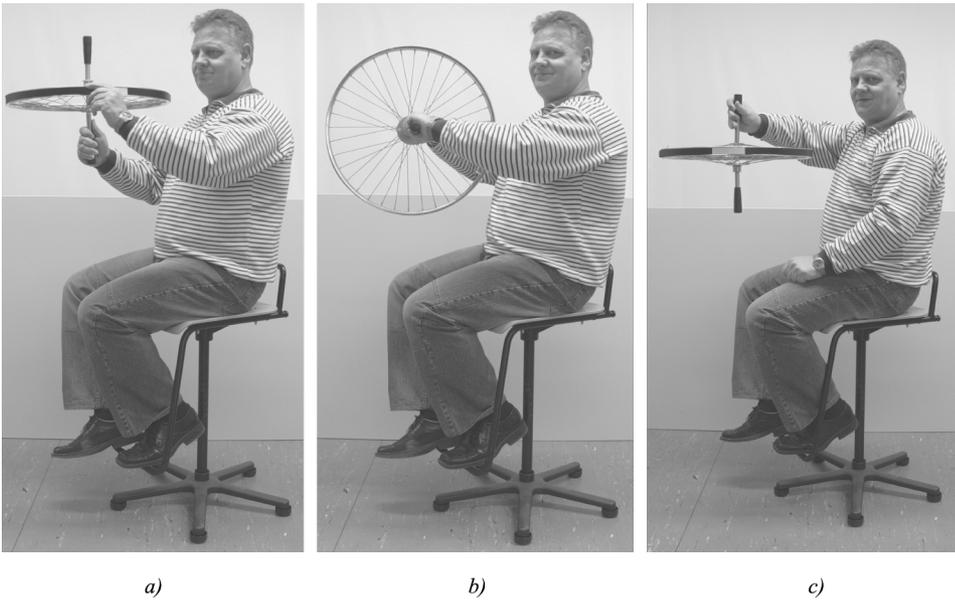


Abb. 2.91 Drehstuhlexperimente: (a) Die auf dem ruhenden Drehstuhl sitzende Person versetzt den Kreisel in Drehung. (b) Die Kreiselachse wird in die Horizontale gedreht. (c) Die Person erhält einen Kreisel von einem Helfer.

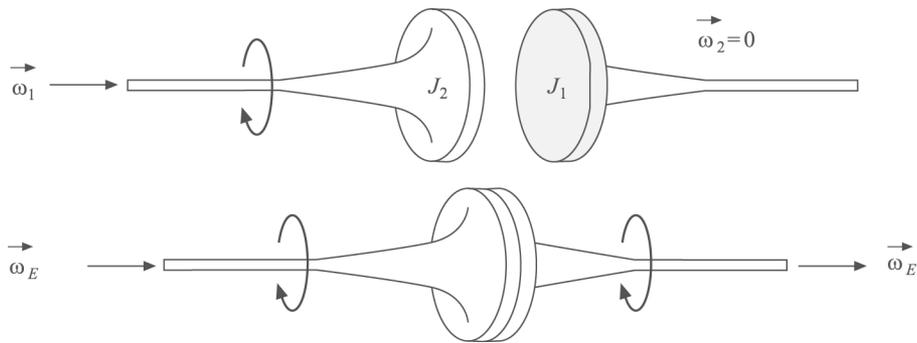


Abb. 2.92 Zwei Scheiben einer Kupplung: unelastischer Drehstoß.

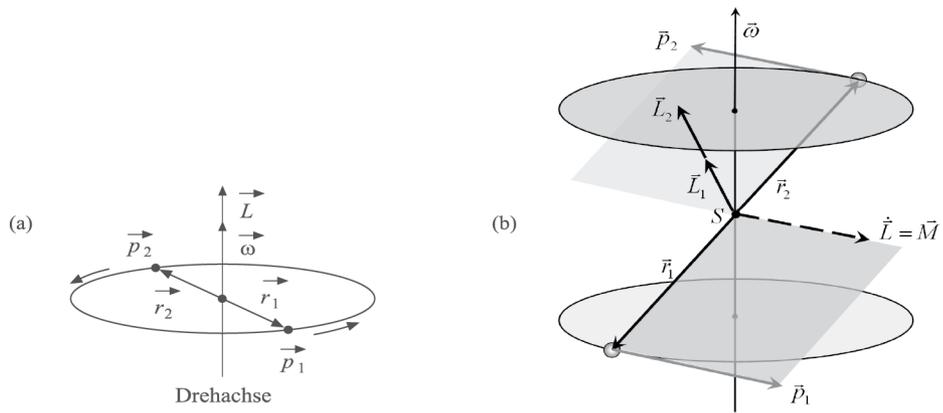


Abb. 2.93 Ein hantelförmiger starrer Körper rotiert um eine feste Achse. (a) Hantelachse und Drehachse stehen senkrecht aufeinander, (b) der Winkel zwischen Hantelachse und Drehachse ist $\neq 90^\circ$.

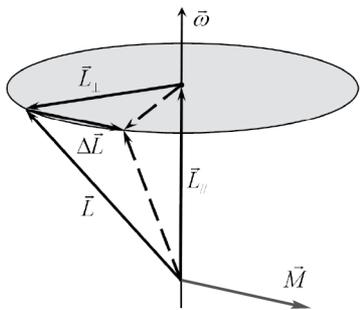


Abb. 2.94 Drehmoment, das durch den Drehimpuls, der nicht kollinear zur Drehachse verläuft, verursacht wird.

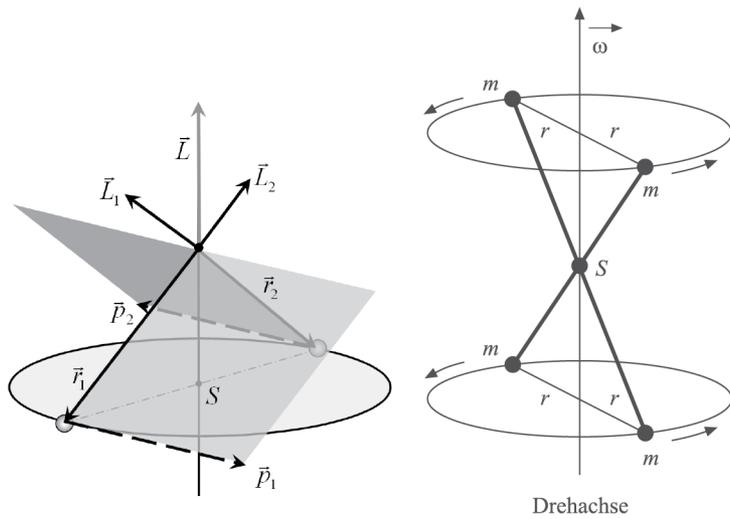


Abb. 2.95 Starrer Körper aus zwei und vier Massenpunkten mit achsensymmetrischer Massenverteilung.

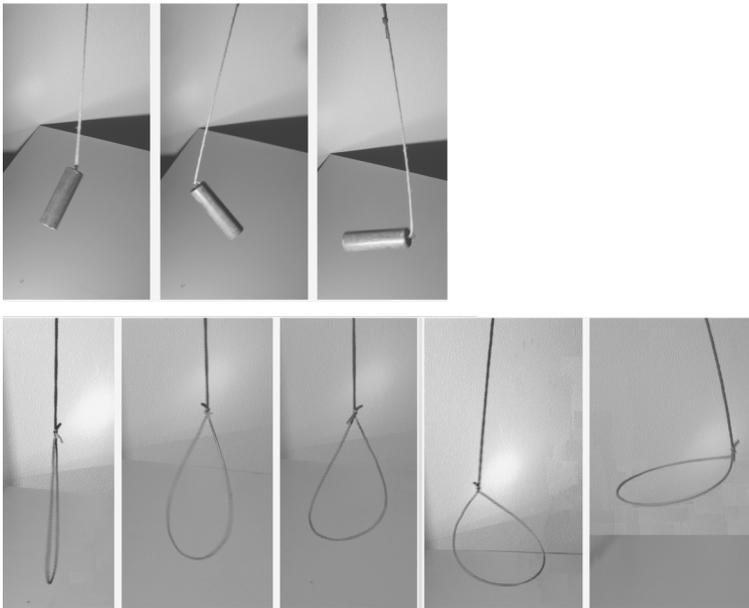


Abb. 2.96 Rotation um freie Achsen.

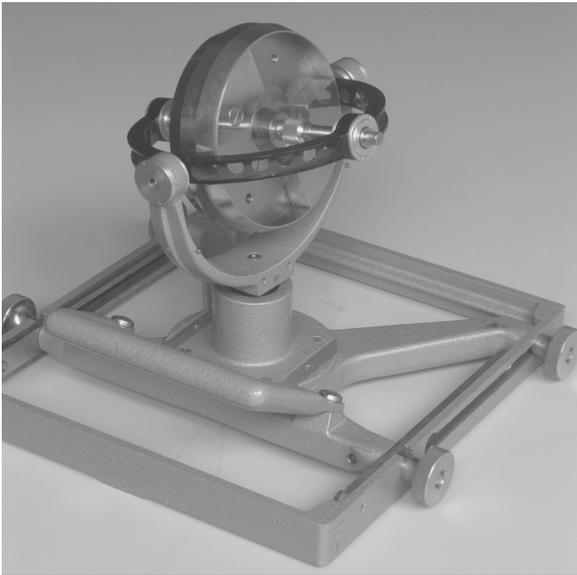


Abb. 2.97 Kreiselmotiv.

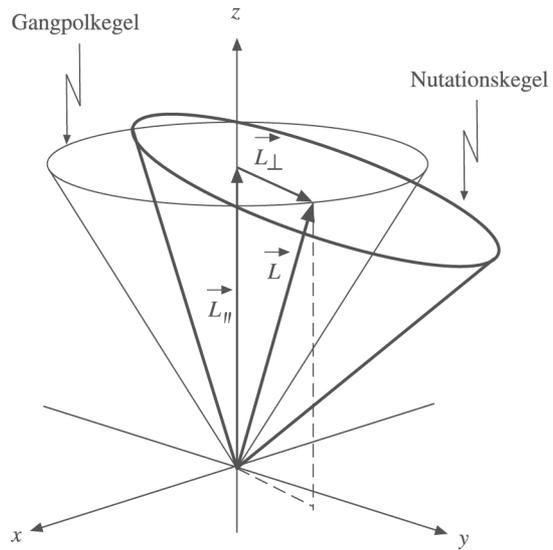


Abb. 2.98 Zerlegung des Drehimpulses bei der Nutation.

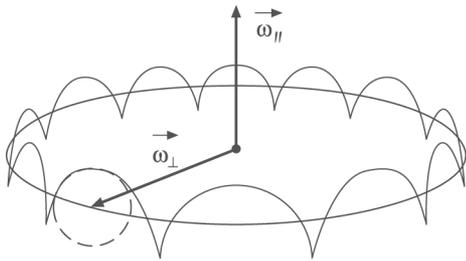


Abb. 2.99 Bahnkurve (schematisch) eines Massenpunktes auf dem Kreisel bei Nutation.

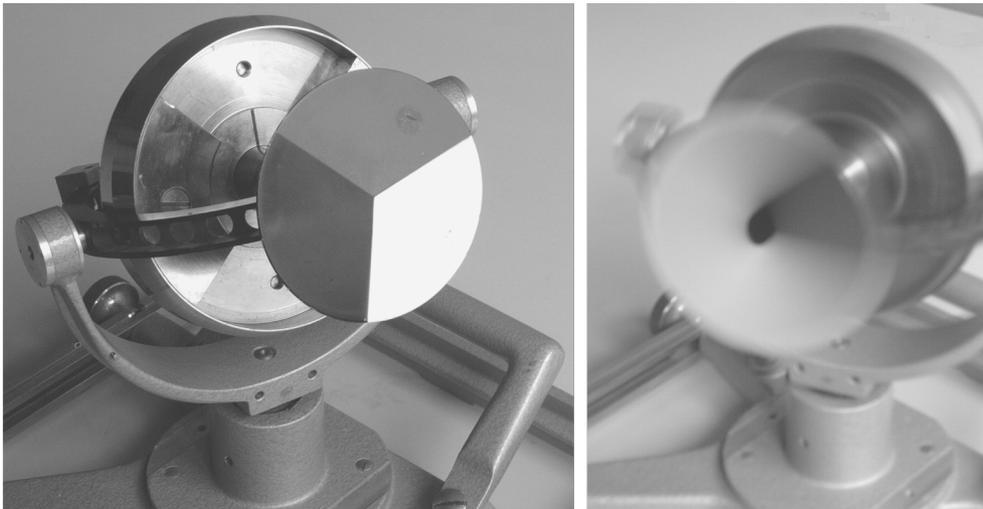


Abb. 2.100 Maxwellsche Scheibe zur Sichtbarmachung der momentanen Drehachse eines Kreisels.

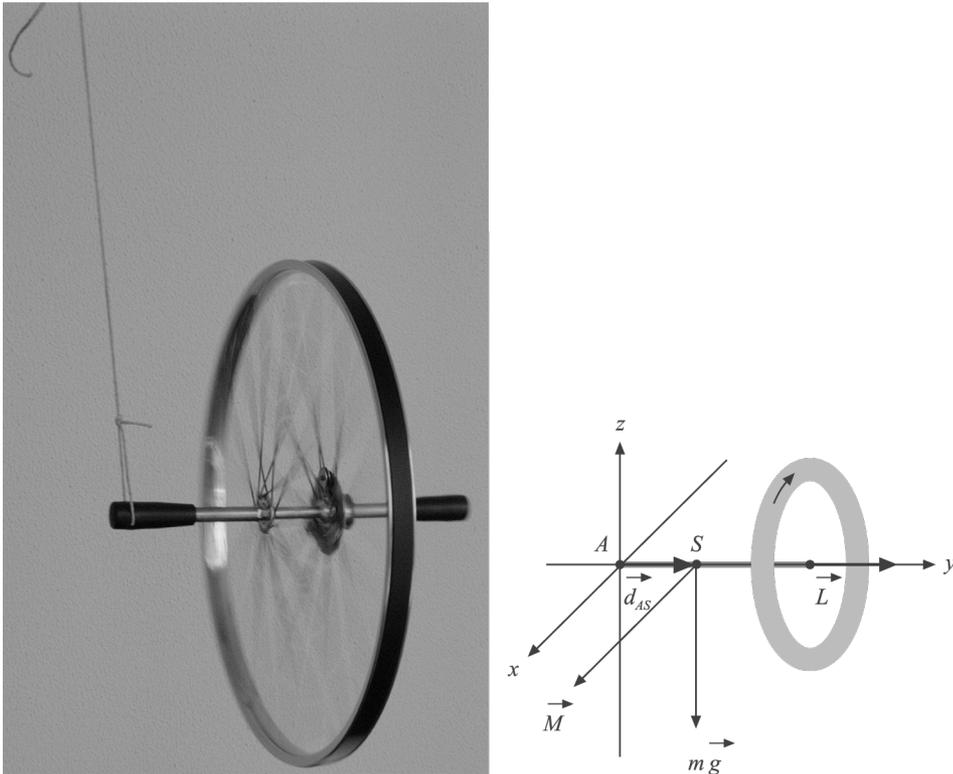


Abb. 2.101 Präzession des Kreisels.

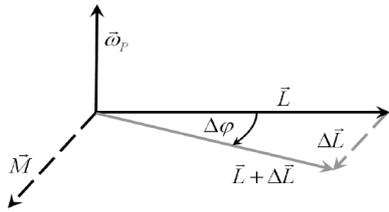


Abb. 2.102 Größen, die die Präzession eines Kreisels beeinflussen.

Translation		Rotation	
Masse	M	Trägheitsmoment	J
Impuls	$\vec{p} = m\vec{v}$	Drehimpuls	$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \quad \vec{L} = J\vec{\omega}$
Kraft	$\vec{F} = \dot{\vec{p}}$	Drehmoment	$\vec{M} = \dot{\vec{L}} = \vec{r} \times \vec{F} \quad \vec{M} = J\dot{\vec{\omega}} = J\vec{\alpha}$
Arbeit	$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{s}$	Arbeit	$W = \int \vec{M} \cdot d\vec{\varphi}$
Leistung	$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = \frac{\dot{\vec{p}} \cdot \vec{p}}{m}$	Leistung	$P = \vec{M} \cdot \vec{\omega} = \frac{\dot{\vec{L}} \cdot \vec{L}}{J}$
kinetische Energie	$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$	kinetische Energie	$E_{kin} = \frac{1}{2}J\omega^2$

Tab. 2.3 Gegenüberstellung von Größen der Dynamik bei Translation und Rotation.

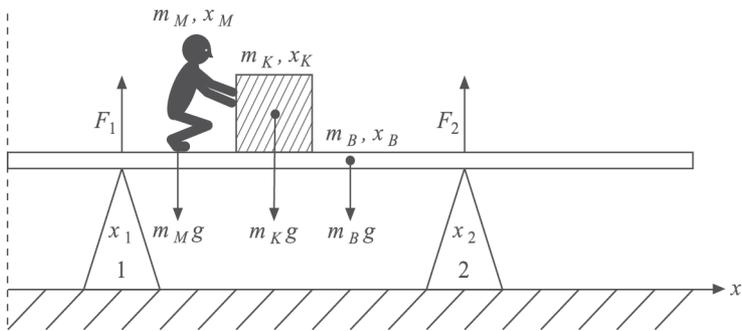


Abb. 2.103 Unsymmetrisch belastete Arbeitsbühne.

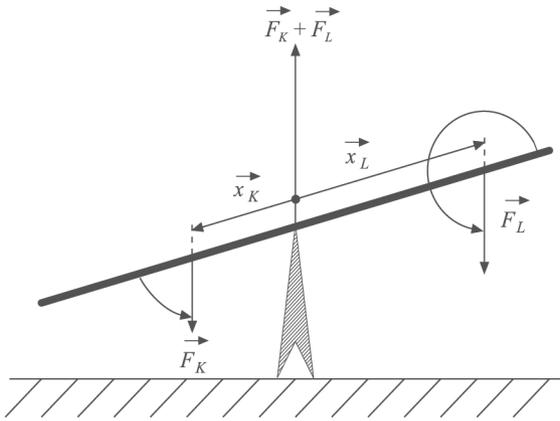


Abb. 2.104 Zweiarmiger Hebel.

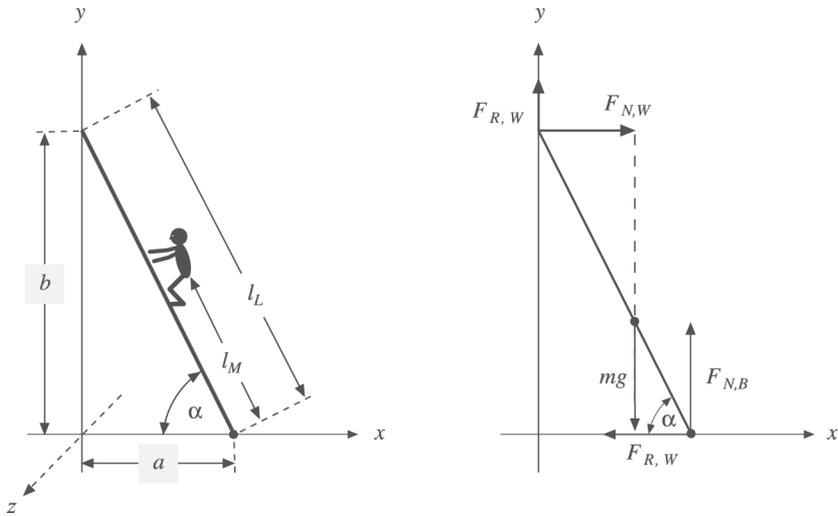


Abb. 2.105 Eine an eine Hauswand gelehnte Leiter soll nicht abrutschen.

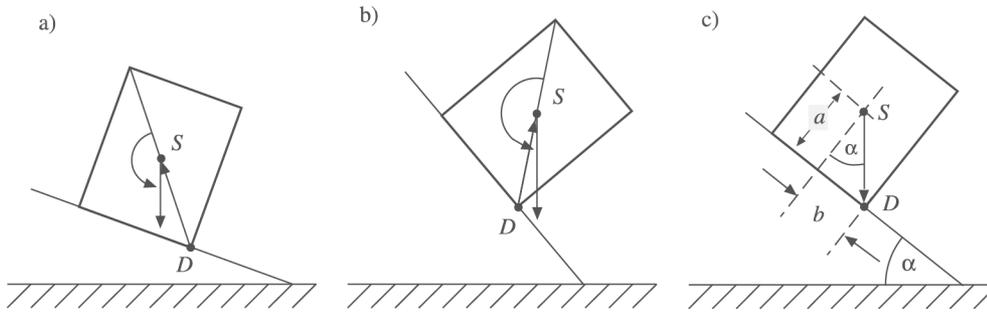


Abb. 2.106 Quader auf schiefer Ebene a) Quader kippt nicht um b) Quader kippt c) kritischer Winkel der schiefen Ebene.

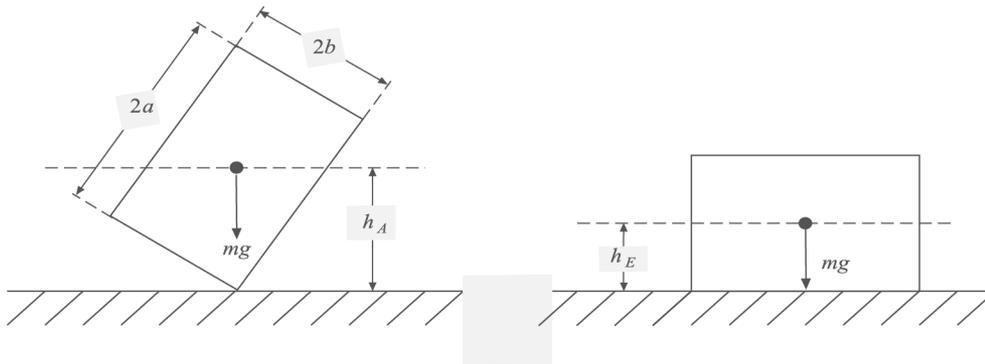


Abb. 2.107 Ein Quader kippt um. Mit welcher Winkelgeschwindigkeit prallt er auf?

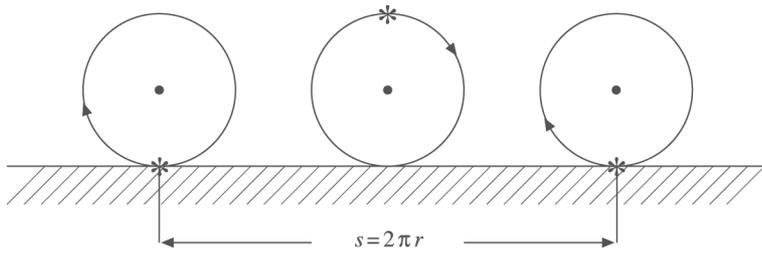


Abb. 2.108 Zur Rollbedingung eines Rades.

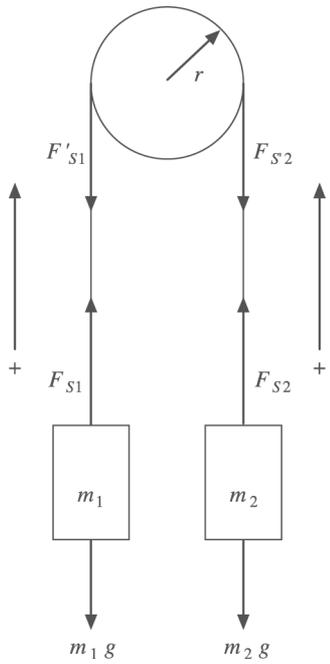


Abb. 2.109 Atwoodsche Fallmaschine mit Seilscheibe.

Stoff	Dichte in g/cm ³	Stoff	Dichte in g/cm ³	Stoff	Dichte in g/cm ³
Aluminium	2,707	Wasser	1,000	Porzellan	2,4
Eisen	7,987	Quecksilber	13,456	Vollziegel	1,1...2,2
Kupfer	8,954	Benzin	0,72	Gasbeton	0,5...0,8
Blei	11,373	Meerwasser	1,02...1,05	Sandstein	2,6
Wolfram	19,350	Äthylalkohol	0,789	Sand	1,2...1,6
Platin	21,450	Glyzerin	1,26	Polystyrol	0,015

Tab. 2.4 Dichte einiger Stoffe bei 20 °C

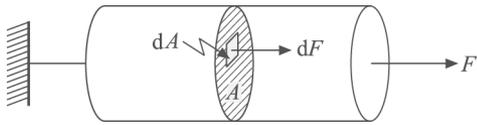


Abb. 2.110 Mechanische Spannung in einem Zylinder, der an der einen Seite befestigt ist und an dem auf der anderen Seite eine Zugkraft wirkt.

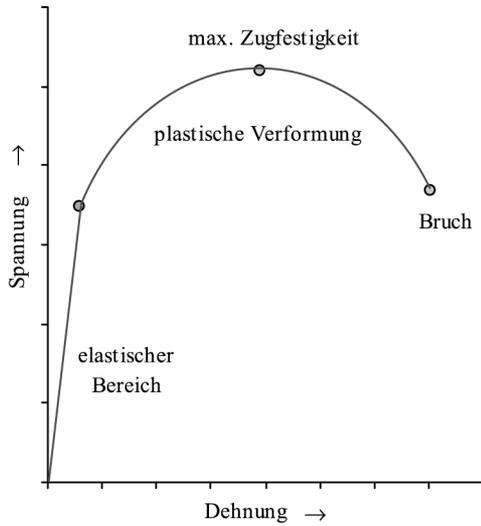


Abb. 2.111 Verlauf Spannung über Dehnung: elastischer Bereich, Bereich plastischer Verformung, Bruch.

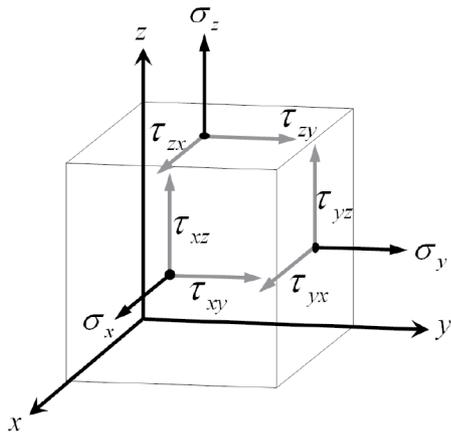


Abb. 2.112 Normal- und Schubspannungen in einem Würfel.

Stoff	Elastizitätsmodul in GN/m ²	Schubmodul in GN/m ²	Querkontraktionszahl
Aluminium	72	75	0,34
Kupfer	126	140	0,35
Messing	100	125	0,38
Stahl V2A	196	170	0,28
Glas	76	75	0,17
Al ₂ O ₃	400		

Tab. 2.5 Mechanische Kenngrößen einiger Werkstoffe (Richtwerte)

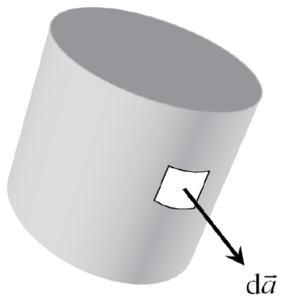


Abb. 2.113 Oberflächenelement einer gekrümmten Gefäßfläche.

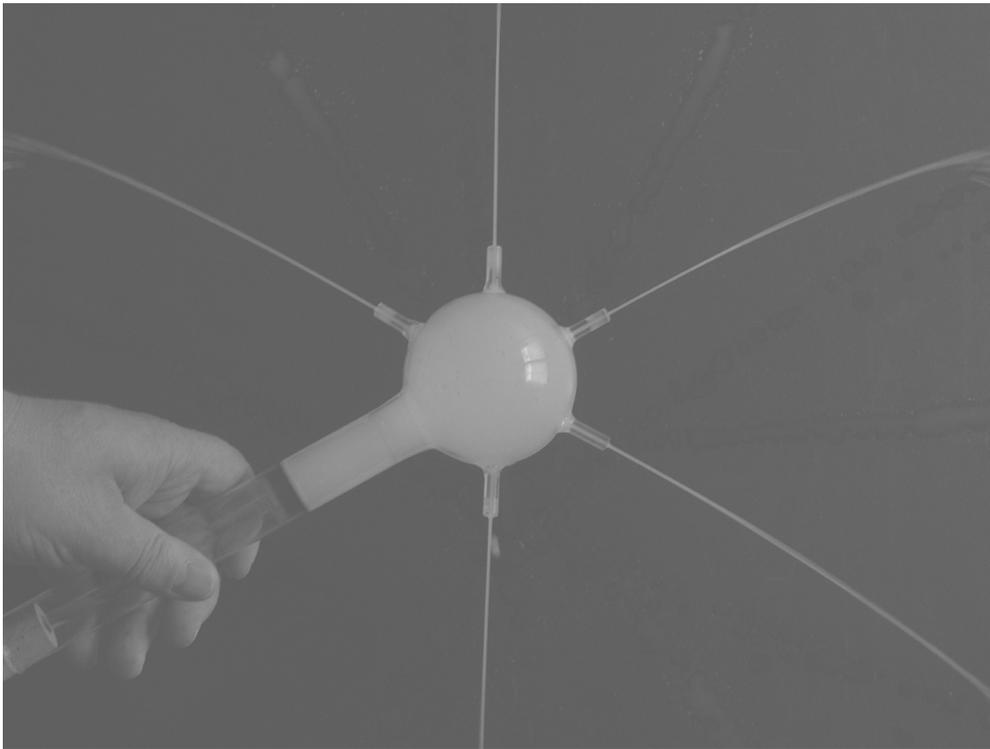


Abb. 2.114 Allseitige Druckerhöhung durch die Wirkung einer lokalen Normalkraft.

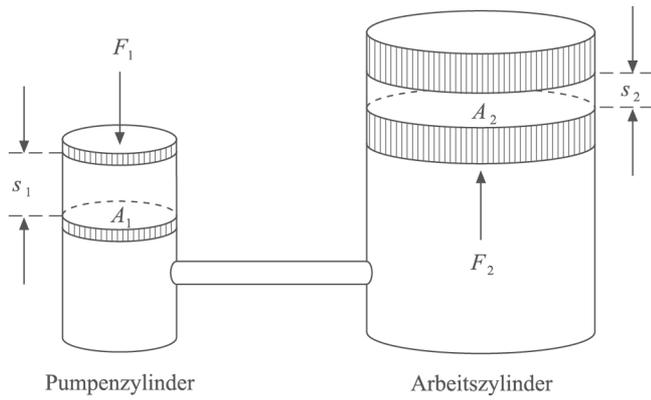


Abb. 2.115 Hydraulisch betriebene Hebebühne.

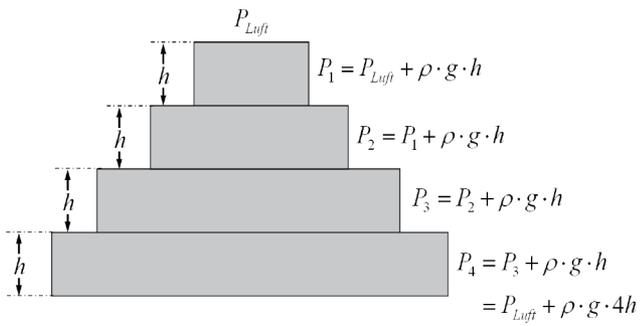


Abb. 2.116 Zum hydrostatischen Paradoxon.

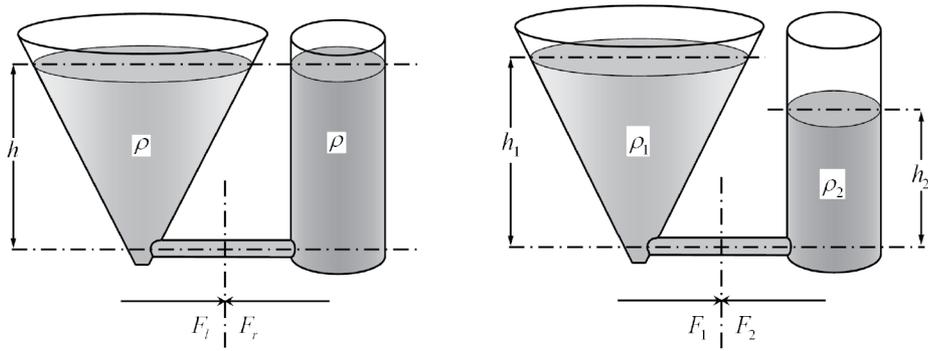


Abb. 2.117 Flüssigkeitsspiegel bei verbundenen Gefäßen.

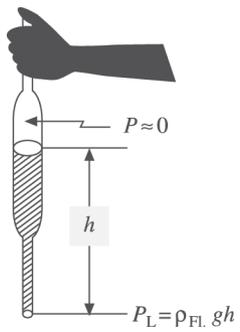


Abb. 2.118 Zur Wirkungsweise einer Pipette.

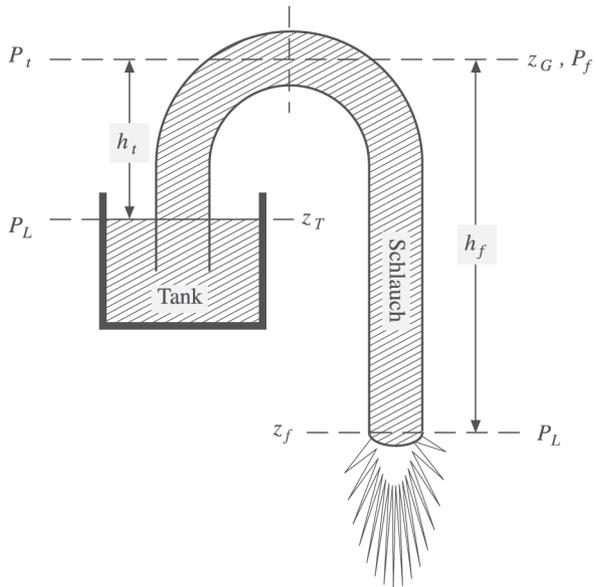


Abb. 2.119 Flüssigkeitsheber.

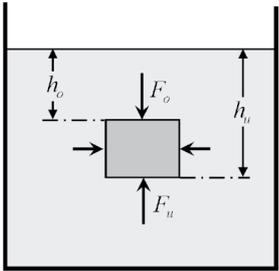


Abb. 2.120 Auftrieb eines von Flüssigkeit umgebenen Quaders.

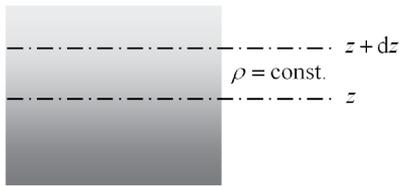


Abb. 2.121 Zur Herleitung der barometrischen Höhenformel. In der Gasschicht wird die Dichte als konstant angenommen.

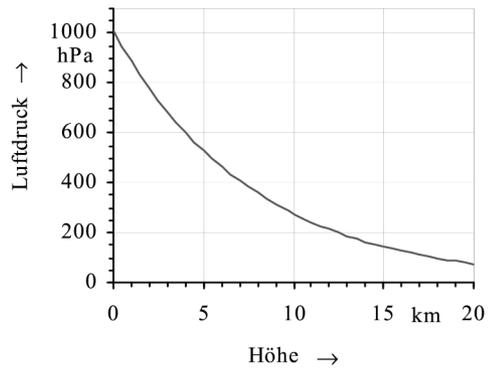


Abb. 2.122 Verlauf des Luftdrucks mit der Höhe.

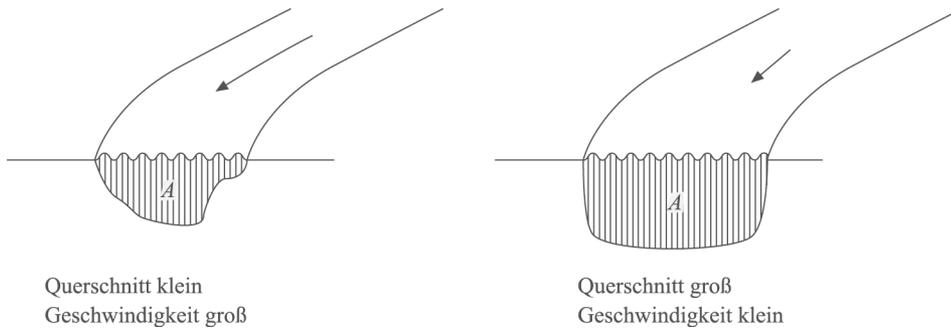


Abb. 2.123 Querschnittsfläche und Strömungsgeschwindigkeit bei Flüssen, die die gleiche Wassermenge pro Zeit transportieren.

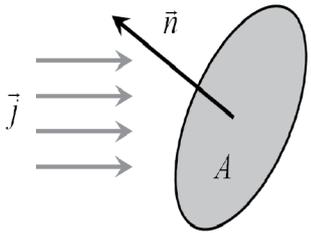


Abb. 2.124 Stromdichte und Flächennormale: Richtungskonvention.



Abb. 2.125 Massenstrom durch ein Rohr.

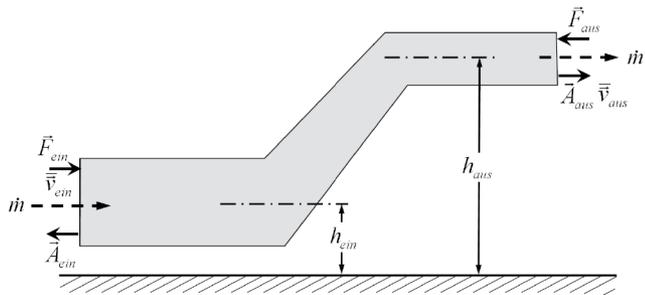


Abb. 2.126 Rohr mit unterschiedlichem Durchmesser und unterschiedlichen Höhen.

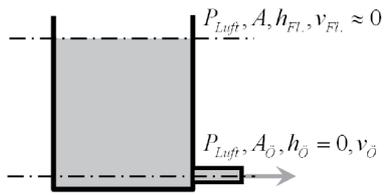


Abb. 2.127 Eine Flüssigkeit strömt aus einer kleinen Öffnung.

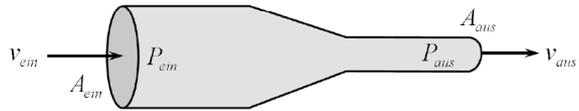


Abb. 2.128 Zum Venturi-Effekt.

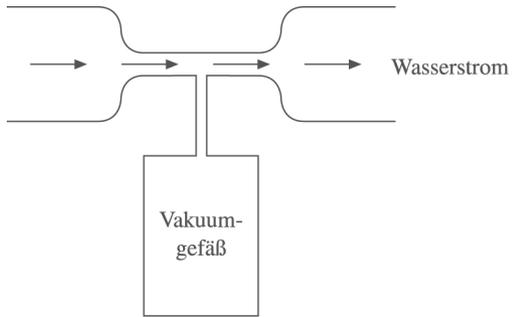


Abb. 2.129 Wasserstrahlpumpe.

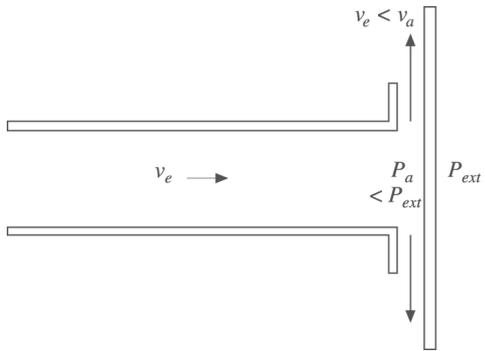


Abb. 2.130 Hydrodynamisches Paradoxon.

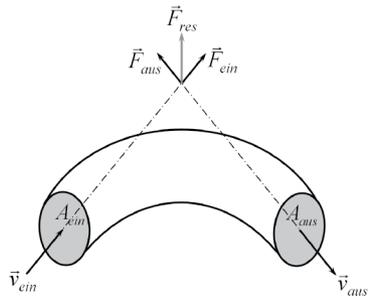


Abb. 2.131 Kraft auf einen von einer Flüssigkeit durchströmten Rohrkrümmer.

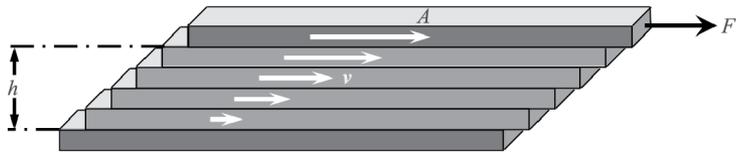


Abb. 2.132 Schichtenmodell einer laminaren Strömung.

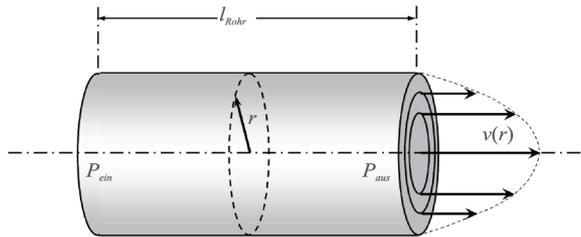


Abb. 2.133 Parabolisches Geschwindigkeitsprofil gemäß dem Hagen-Poiseulleschen Gesetz.

Gleichgewichtszustand	Temperatur in K	Temperatur in °C
Siedepunkte Helium (versch. <i>P</i>)	3...5	−270,15...−268,15
Tripelpunkt Wasserstoff	13,8033	−268,15
Tripelpunkt Neon	24,5561	−248,5939
Tripelpunkt Sauerstoff	54,3584	−218,7916
Tripelpunkt Argon	83,8058	−189,3442
Tripelpunkt Quecksilber	234,3156	−38,8344
Tripelpunkt Wasser	273,16	0,01
Schmelzpunkt Gallium	302,9146	29,7646
Erstarrungspunkt Indium	429,7485	156,5985
Erstarrungspunkt Zinn	505,078	231,928
Erstarrungspunkt Zink	692,677	419,527
Erstarrungspunkt Aluminium	933,473	660,323
Erstarrungspunkt Silber	1234,93	961,78
Erstarrungspunkt Gold	1337,33	1064,18
Erstarrungspunkt Kupfer	1357,77	1084,62

Tab. 3.1 Fixpunkte der internationalen Temperaturskala von 1990 beim Druck von 1013,25 hPa.

Typ	Messbereich in °C	Messprinzip
Flüssigkeitsthermometer , gefüllt mit		Thermische Ausdehnung einer Flüssigkeit, die sich in einer Glaskapillare befindet. Messgröße: Flüssigkeitsstand
- Alkohol	- 110 bis 210	
- Toluol	- 90 bis 100	
- Quecksilber	- 38 bis 800	
Bimetallthermometer	- 50 bis 400	Zwei fest miteinander verbundene Metalle dehnen sich unterschiedlich aus, dadurch krümmt sich das Bimetall
Thermoelemente		Herrschen an den Kontaktstellen von 2 verschiedenen Metallen unterschiedliche Temperaturen, so entsteht eine Thermospannung
- Cu-Konstantan	- 200 bis 400	
- Fe-Konstantan	- 200 bis 700	
- NiCr-Konstantan	- 200 bis 900	
- Pt-PtRh	0 bis 1500	
- W-WMo	0 bis 3200	
Widerstandsthermometer		Der elektrische Widerstand ändert sich mit der Temperatur
- Platin	- 250 bis 1000	
- Nickel	- 60 bis 180	
- Halbleiter (Halbleiter)	- 270 bis 400	
Gasthermometer	- 272 bis 2000	In einem Gefäß eingeschlossenes Gas ändert seinen Druck in Abhängigkeit von der Temperatur
Pyrometer	- 30 bis 3000	Ein warmes Objekt emittiert elektromagnetische Strahlung, deren Spektrum charakteristisch für die Temperatur ist

Tab. 3.2 Beispiele von Thermometern.

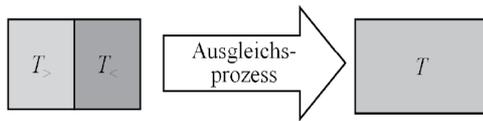


Abb. 3.1 Thermisches Gleichgewicht zwischen zwei Objekten im direkten Kontakt.

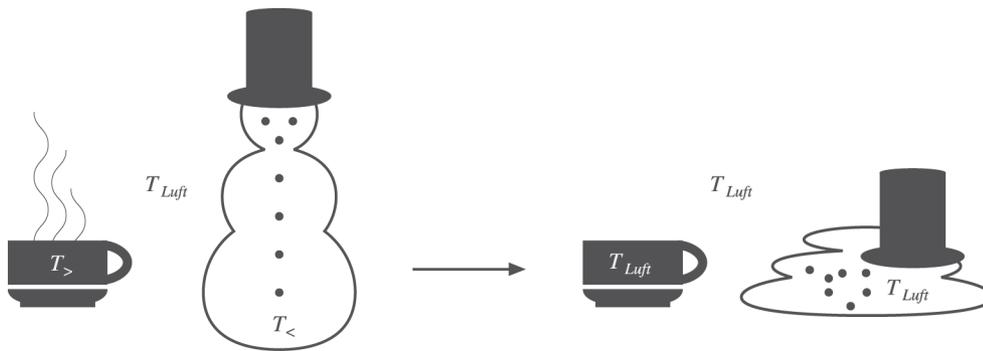


Abb. 3.2 Thermisches Gleichgewicht zwischen zwei Objekten, die sich mit einem dritten im thermischen Gleichgewicht befinden.

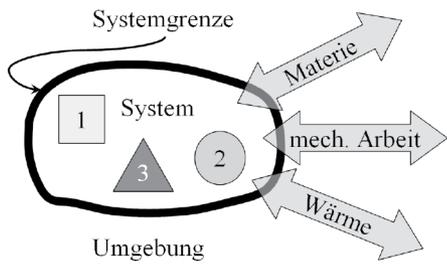


Abb. 3.3 System und Systemgrenze.

Stoff	$10^6 \alpha$ in K^{-1}
Aluminium	23,8
Kupfer	16,4
Stahl C 60	11,2
VA-Stahl	16,4
Glas	9,0
Quarzglas	0,5

Tab. 3.3 Lineare Längenausdehnungskoeffizienten einiger fester Stoffe im Temperaturbereich von 0 °C–100 °C.

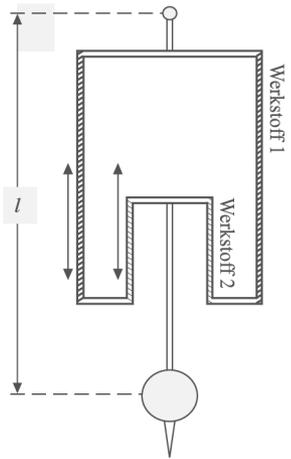


Abb. 3.4 Ausgleichspendel bei einer Uhr. Die Längen und Werkstoffe der einzelnen Stäbe werden so gewählt, dass die Gesamtlänge des Pendels für alle Temperaturen konstant ist.

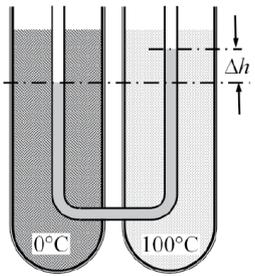


Abb. 3.5 Bestimmung des Volumenausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten nach Dulong und Petit.

Stoff	$10^3 \gamma \text{ in K}^{-1}$
Wasser	0,18
Quecksilber	0,1818
Heizöl	0,9 ... 1,0
Benzin	1,01 ... 1,06
Äthanol	1,12
Benzol	1,15
Pentan	1,60

Tab. 3.4 Volumenausdehnungskoeffizienten einiger Flüssigkeiten bei 20 °C.

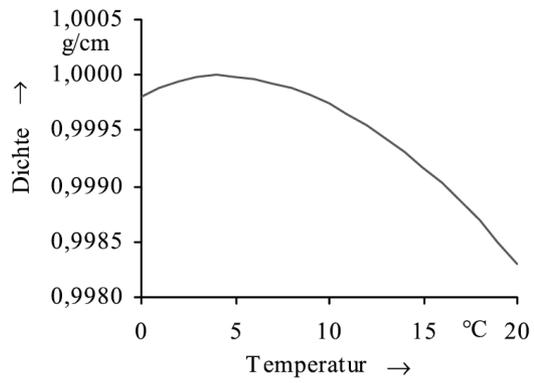


Abb. 3.6 Verlauf der Dichte von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur.

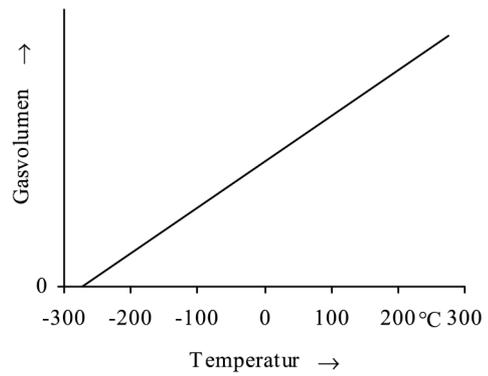


Abb. 3.7 Verlauf der Funktion $V(T)$ für ein ideales Gas.

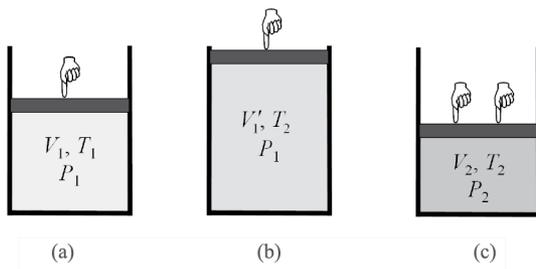


Abb. 3.8 Zur Herleitung der Zustandsgleichung: (a) Ausgangszustand V_1, P_1, T_1 , (b) isobare Erwärmung P_1, V'_1, T_2 , (c) isotherme Kompression T_2, V_2, P_2 .

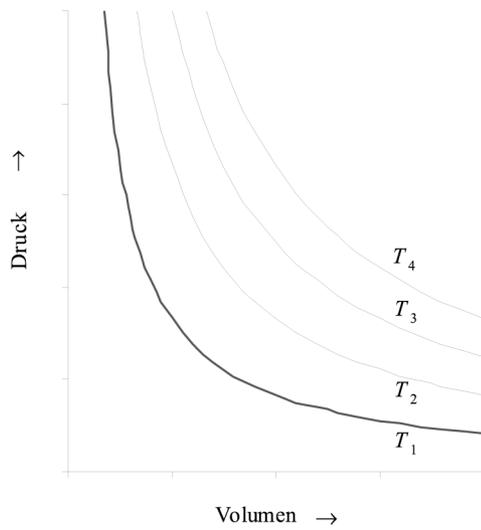


Abb. 3.9 Isothermen eines idealen Gases bei verschiedenen Temperaturen.

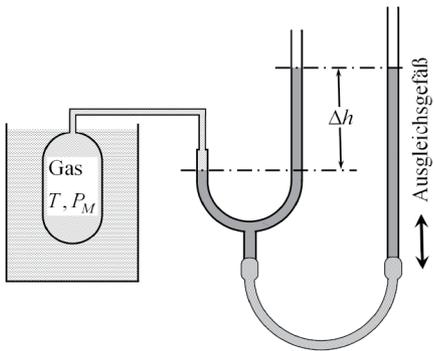


Abb. 3.10 Prinzipieller Aufbau eines Gasthermometers nach Jolly².

² P. von Jolly (1809–1884).

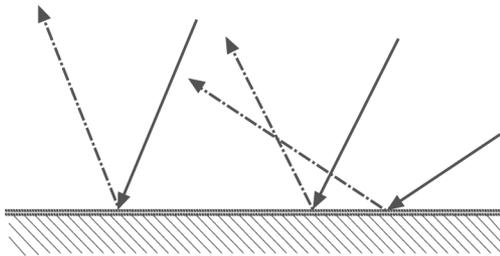


Abb. 3.11 Moleküle unterschiedlicher Geschwindigkeiten prallen auf eine Wand.

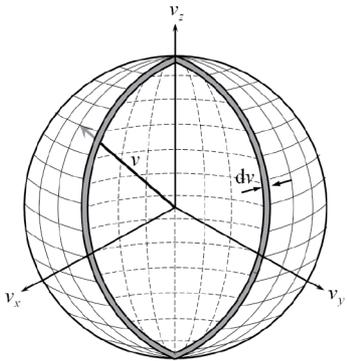


Abb. 3.12 Geschwindigkeitskugel für alle Moleküle, deren Geschwindigkeiten den gleichen Betrag haben.

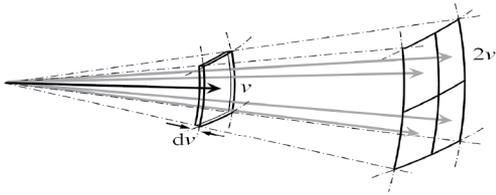


Abb. 3.13 Zellen, die die individuellen Geschwindigkeitsvektoren auf der Geschwindigkeitskugel beanspruchen.

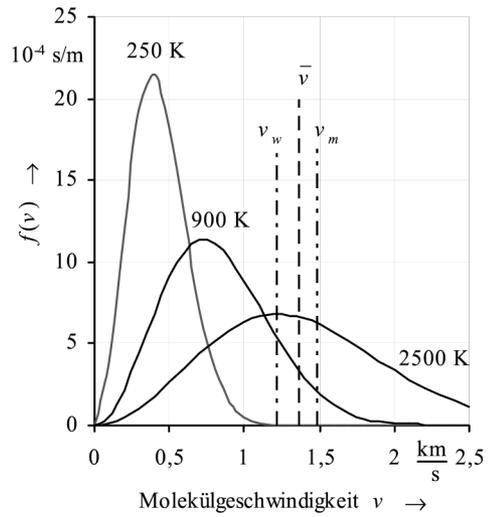


Abb. 3.14 Verlauf der Maxwell-Verteilung bei verschiedenen Temperaturen für Stickstoff N_2 .

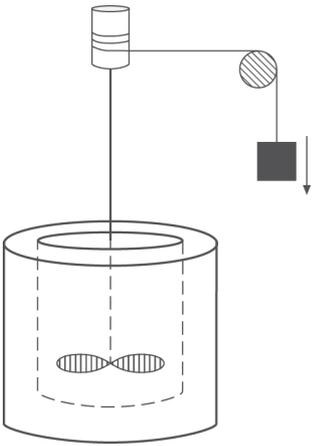


Abb. 3.15 Apparatur von Joule zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalentes.

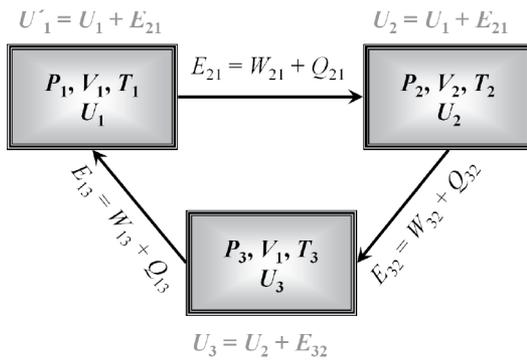


Abb. 3.16 Kreisprozess, bei dem ein thermodynamisches System drei Zustandsänderungen erfährt.

Stoff	$c_{s,p}$ in J/gK	$C_{m,p}$ in J/molK
Aluminium	0,900	24,3
Kupfer	0,386	24,5
Eisen	0,462	25,2
Äthanol	2,365	110,8
Wasser	4,187	75,4
Quecksilber	0,140	28,3

Tab. 3.5 Spezifische und molare Wärmekapazitäten einiger Stoffe bei $T_C = 20 \text{ °C}$ und $P = 1013 \text{ hPa}$.

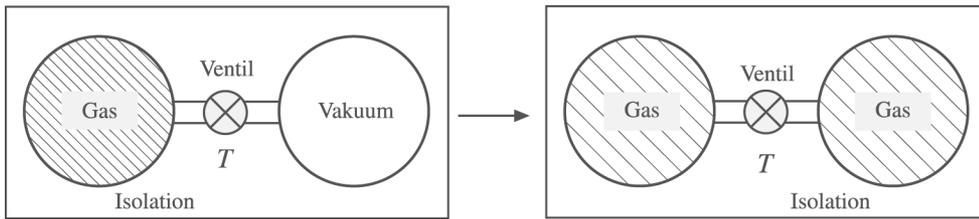


Abb. 3.17 Überströmversuch von Gay-Lussac. Die Temperaturen vor und nach der Expansion sind gleich.

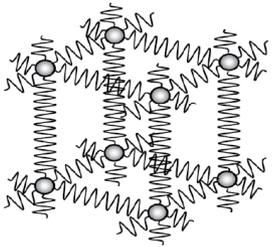


Abb. 3.18 Atome im Kristall werden elastisch in ihrer Gleichgewichtslage gehalten.

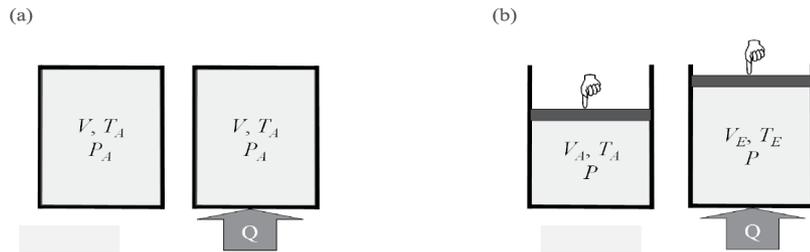


Abb. 3.19 (a) Isochore und (b) isobare Zustandsänderung (Erwärmung) eines geschlossenen Systems. Die Hand symbolisiert eine konstante äußere Kraft, die auf den Kolben wirkt.

Molekültyp		f (Translation)	f (Rotation)	f (Schwingung)	gesamt	κ
punktförmig	•	3			3	1,67
Hantel, starr	•—•	3	2		5	1,40
Hantel, elastisch	•  •	3	2	2	7	1,29
räumlich, starr		3	3		6	1,33

Tab. 3.6 Theoretische Werte für den Adiabatenexponenten für verschiedene Molekültypen.

Gas		κ	$c_{m,V}$ in J/gK	$c_{m,P}$ in J/molK	f nach (3.98)
Helium	He	1,67	12,47	20,80	2,99
Argon	Ar	1,67	12,47	20,80	2,99
Wasserstoff	H ₂	1,41	20,43	28,76	4,88
Sauerstoff	O ₂	1,40	21,06	29,43	5,00
Stickstoff	N ₂	1,40	20,76	29,09	5,00
Chlor	Cl ₂	1,35	25,74	34,70	5,71
Kohlendioxid	CO ₂	1,30	28,46	36,96	6,67
Schwefeldioxid	SO ₂	1,29	31,40	40,39	6,90
Methan	CH ₄	1,32	26,19	34,59	6,25
Ammoniak	NH ₃	1,31	27,84	36,84	6,45
Äthan	C ₂ H ₆	1,21	43,12	51,70	9,52

Tab. 3.7 Experimentelle Werte für Adiabatenexponenten und molare Wärmekapazitäten verschiedener Gase bei 20 °C und 1013 hPa.

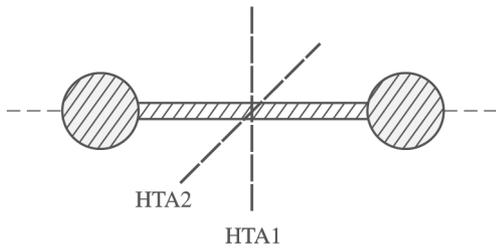


Abb. 3.20 Zweiatomiges Molekül: Nur Rotation um Hauptträgheitsachsen senkrecht zur Verbindungslinie.

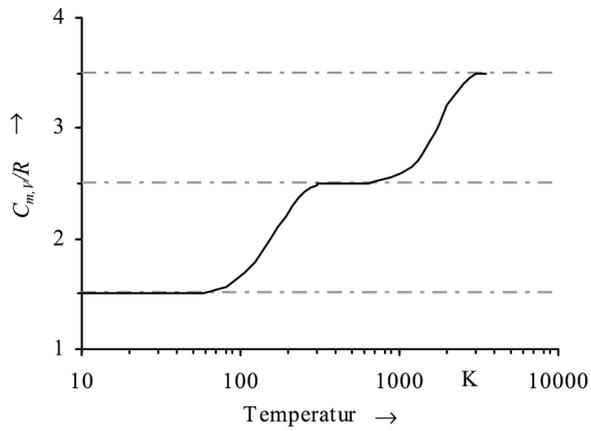


Abb. 3.21 Molare Wärmekapazität $c_{m,v}$ von Wasserstoff in Abhängigkeit von der Temperatur. Oberhalb 3200 K zerfällt das Molekül.

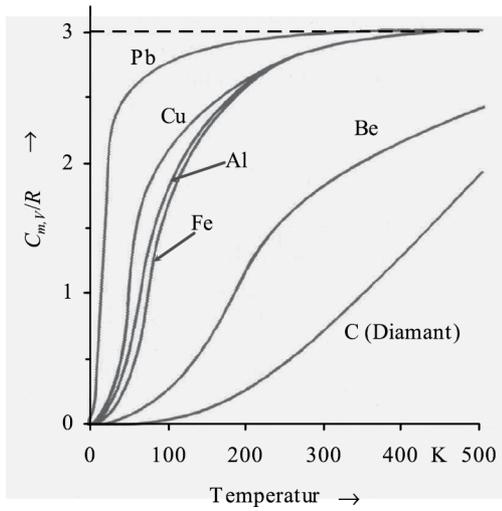


Abb. 3.22 Verlauf der molaren Wärmekapazität von kristallinen Festkörpern in Abhängigkeit von der Temperatur.

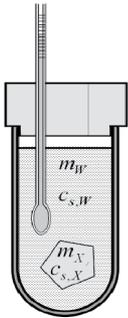


Abb. 3.23 Mischungskalorimeter zur Bestimmung der Wärmekapazität von Festkörpern und Flüssigkeiten.

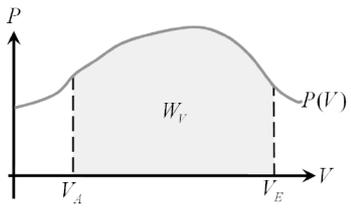


Abb. 3.24 Arbeitsdiagramm (P-V-Diagramm).

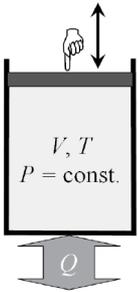


Abb. 3.25 Isobare Zustandsänderung.

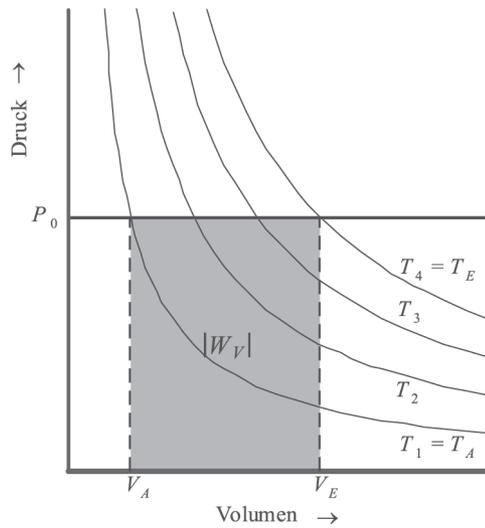


Abb. 3.26 Isobare Zustandsänderung im P-V-Diagramm. Die Volumenänderungsarbeit wird durch das Rechteck dargestellt.

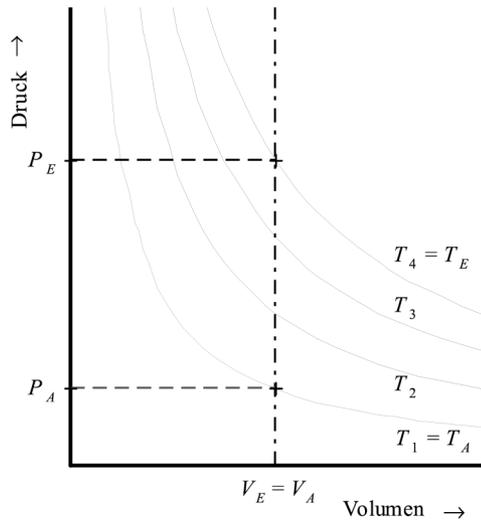


Abb. 3.27 Isochore Zustandsänderung im P-V-Diagramm.

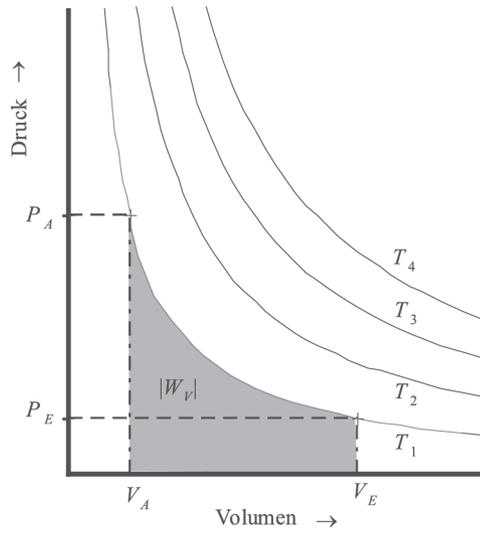


Abb. 3.28 Isotherme Zustandsänderung im P-V-Diagramm.

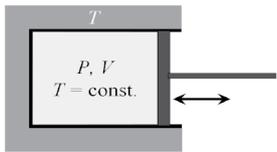


Abb. 3.29 Isotherme Zustandsänderung.

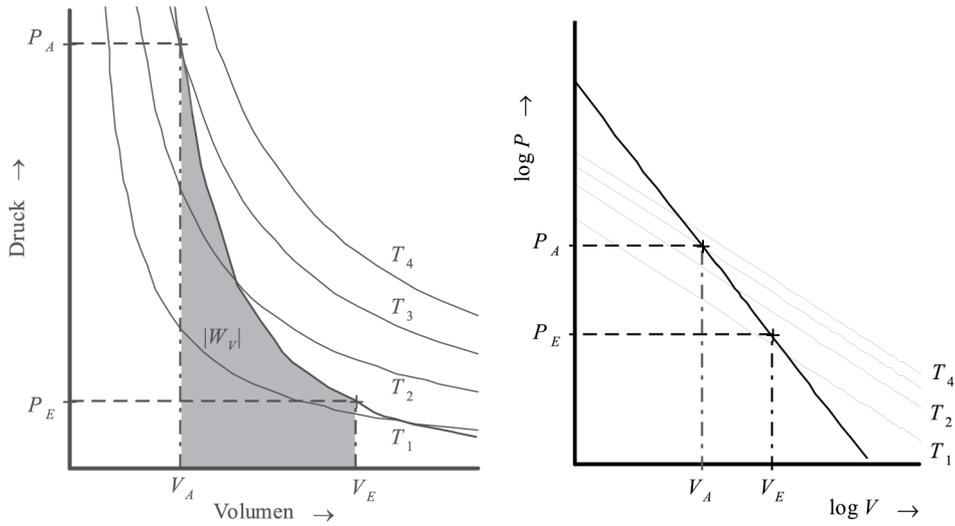


Abb. 3.30 Adiabate im P-V-Diagramm.

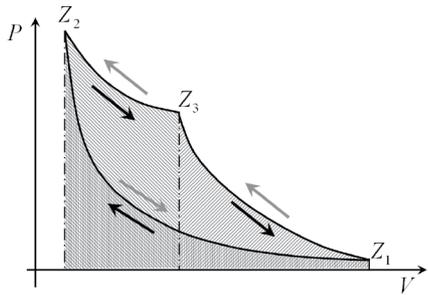


Abb. 3.31 Kreisprozess mit drei Zustandsänderungen im P-V-Diagramm.

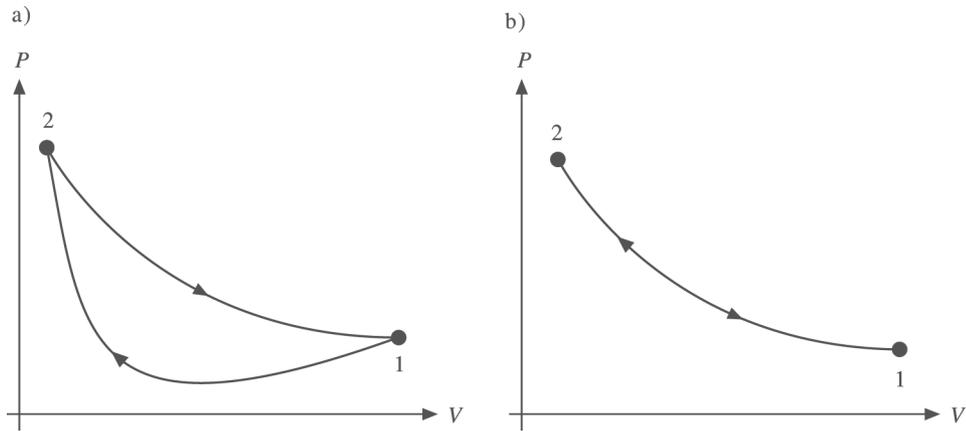


Abb. 3.32 Kreisprozesse zwischen zwei Zuständen: (a) unterschiedliche Zustandsänderungen, (b) gleiche Zustandsänderungen.

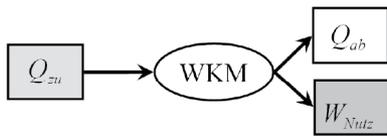


Abb. 3.33 Energiefluss bei einer Wärmekraftmaschine.

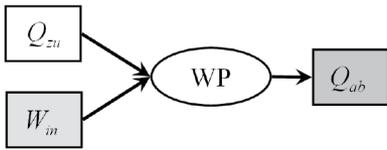


Abb. 3.34 Energiefluss bei einer Wärmepumpe.

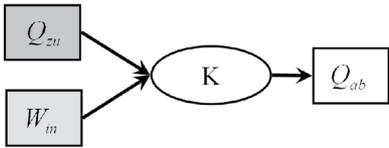


Abb. 3.35 Energiefluss bei einem Kühlaggregate.

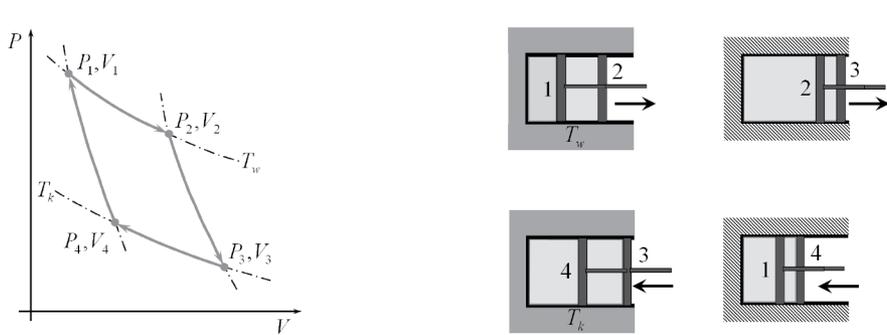


Abb. 3.36 Rechtsläufiger Carnot-Prozess im P-V-Diagramm und als Zustandsänderung eines idealen Gases, das in einem Zylinder mit beweglichen Kolben eingeschlossen ist.

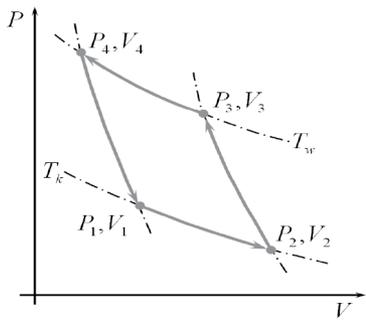


Abb. 3.37 Linksläufiger Carnot-Prozess im P-V-Diagramm.

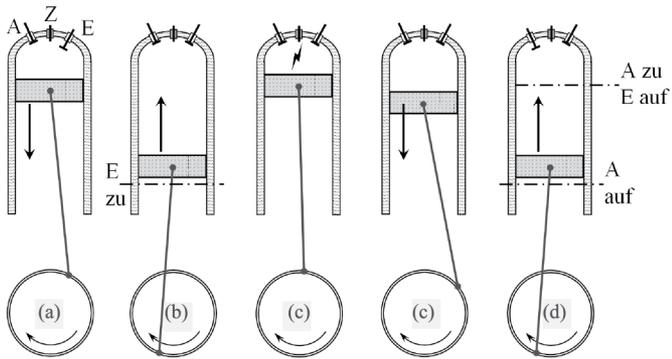


Abb. 3.38 Vier Takte des Otto-Zyklus: (a) Ansaugen des Benzin-Luftgemisches, (b) Verdichten des Benzin-Luftgemisches, (c) Arbeitstakt: Zündung mit anschließender Expansion der Verbrennungsgase und Druckentlastung, (d) Ausstoßen der Abgase aus dem Zylinder.

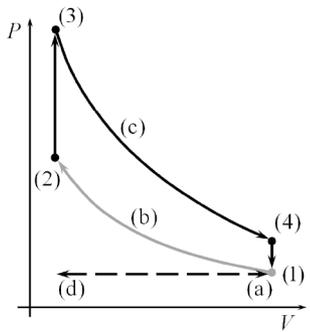


Abb. 3.39 Der Otto-Prozess (Vergleichsprozess für den Otto-Motor) im P-V-Diagramm.

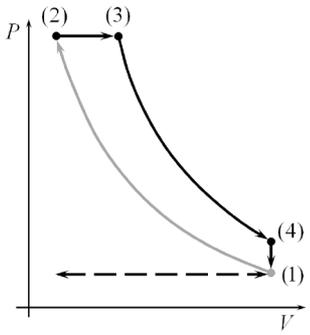


Abb. 3.40 Der Dieselprozess im P-V-Diagramm.

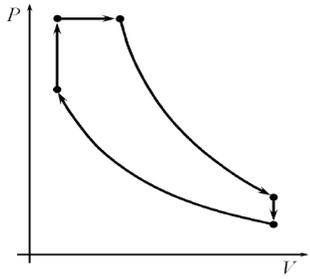


Abb. 3.41 Seiliger-Prozess im P-V-Diagramm.

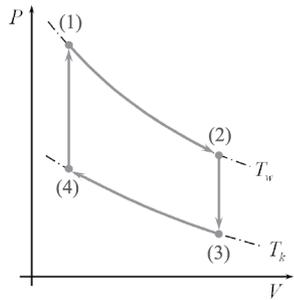


Abb. 3.42 Stirling-Prozess im P-V-Diagramm.

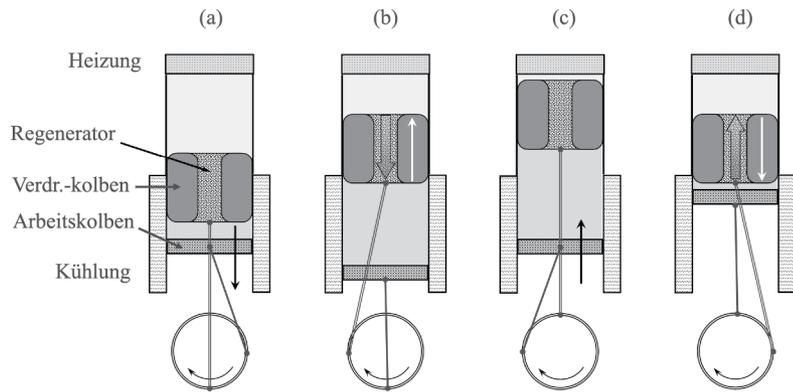


Abb. 3.43 Stirling-Motor. Realisierung der Teilprozesse durch die Bewegung der Kolben. (a) isotherme Expansion, (b) isochore Abkühlung, (c) isotherme Kompression, (d) isochore Erwärmung.

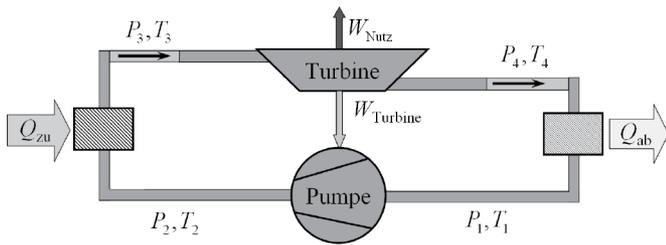


Abb. 3.44 Turbine mit geschlossenem Stoffkreislauf.

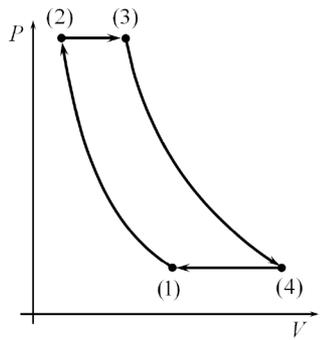


Abb. 3.45 Joule-Prozess im P-V-Diagramm.

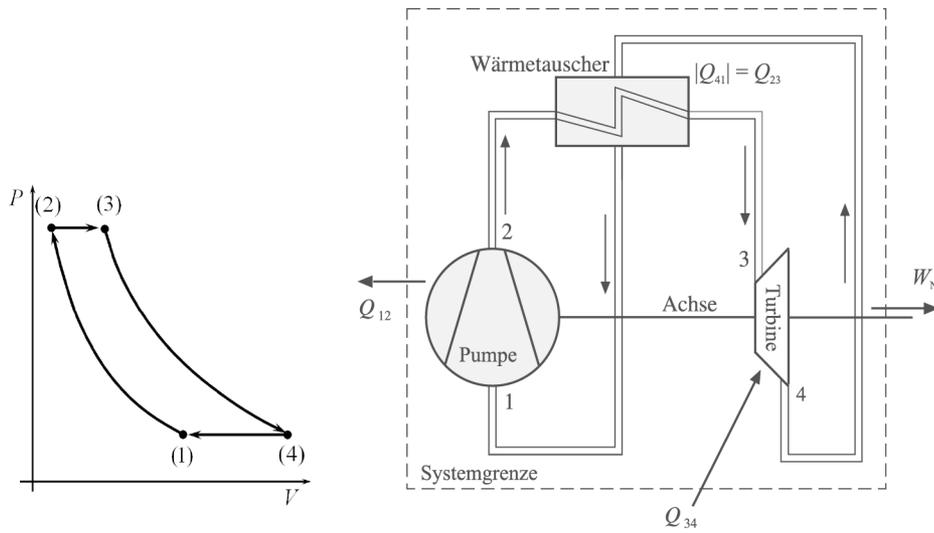


Abb. 3.46 Ericsson-Prozess im P-V-Diagramm und als geschlossener Stoffkreislauf.

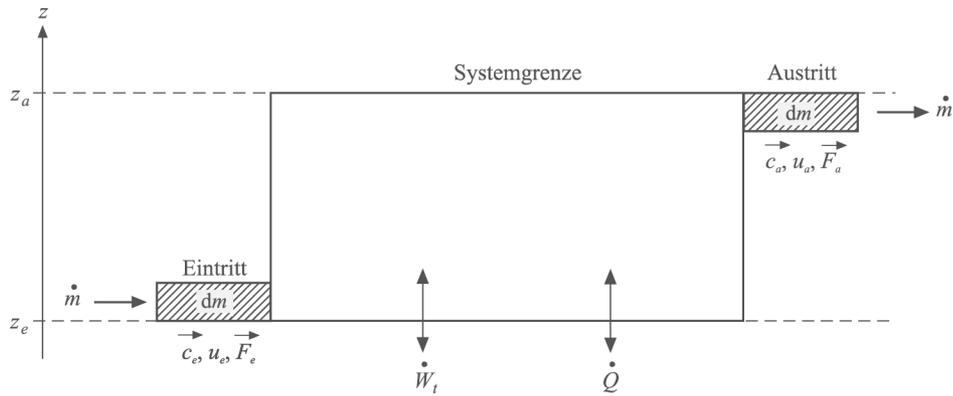


Abb. 3.47 Offenes System, durch das ein zeitlich konstanter Massenstrom fließt.

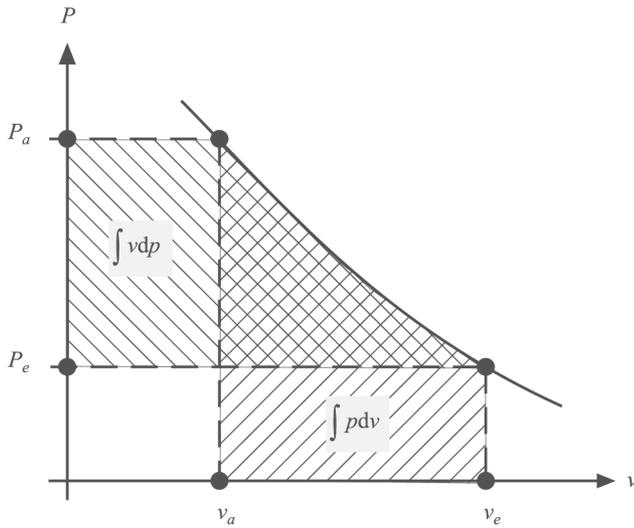


Abb. 3.48 Flächen, die von der $P(v)$ -Kurve zwischen $(P_e$ und $v_e)$, dem Zustand beim Eintritt in das offene System und dem Zustand $(P_a$ und $v_a)$ beim Austritt eingeschlossen werden.

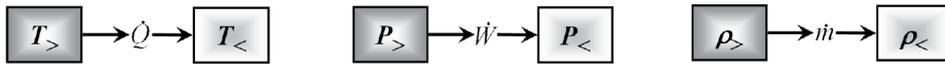


Abb. 3.49 Ausgleichsprozesse der intensiven Größen eines abgeschlossenen Systems und die entsprechenden Ströme.

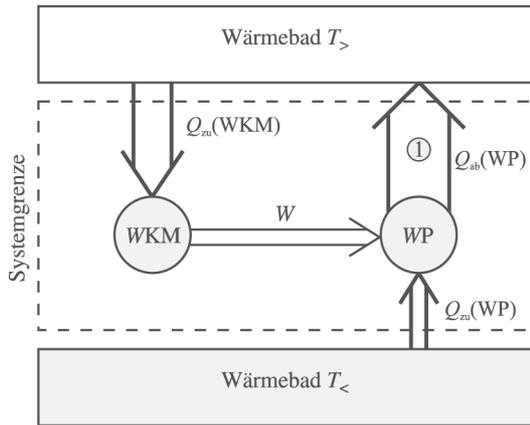


Abb. 3.50 Die Kombination einer Wärmekraftmaschine, die gegen den 2. Hauptsatz verstößt, mit einer normalen Wärmepumpe ergibt eine Kältemaschine, die ein Perpetuum mobile 2. Art darstellt.

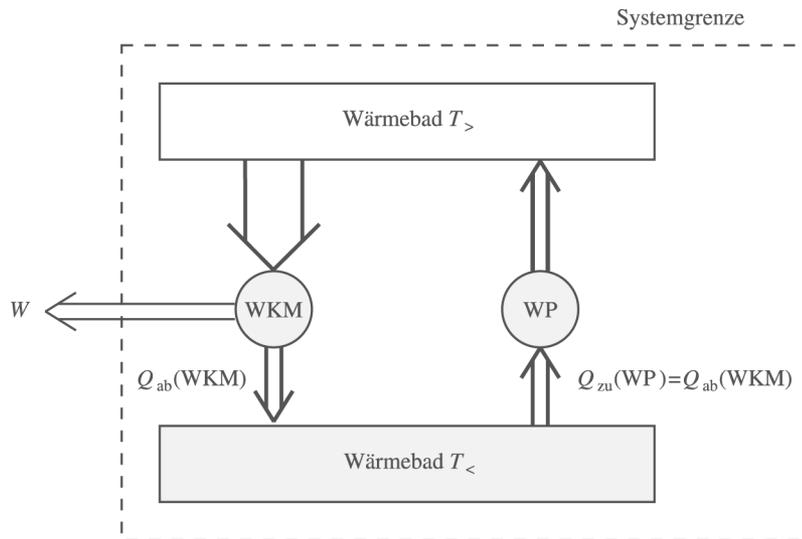


Abb. 3.51 Die Kombination einer Wärmepumpe, die gegen den 2. Hauptsatz verstößt, mit einer normalen Wärmekraftmaschine ergibt eine Wärmekraftmaschine, die ein Perpetuum mobile 2. Art darstellt.

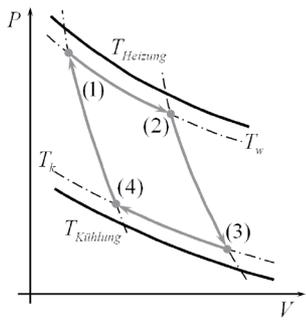


Abb. 3.52 Rechtsläufiger Carnot-Prozess im P-V-Diagramm mit Temperaturdifferenzen zwischen Heizung bzw. Kühlung und Gas.

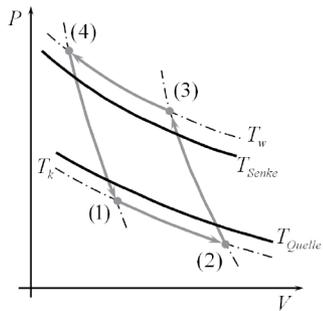


Abb. 3.53 Linksläufiger Carnot-Prozess im P-V-Diagramm mit Temperaturdifferenzen zwischen Wärmequelle bzw. Wärmesenke und Gas.

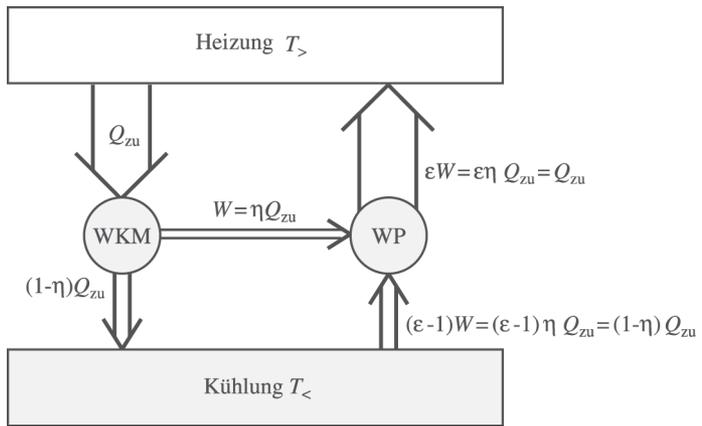


Abb. 3.54 Eine Wärmekraftmaschine treibt eine Wärmepumpe gleichen Typs an. Beide arbeiten reversibel. Die Wärmepumpe kompensiert den von der Wärmekraftmaschine verursachten Wärmefluss von der Heizung zur Kühlung.

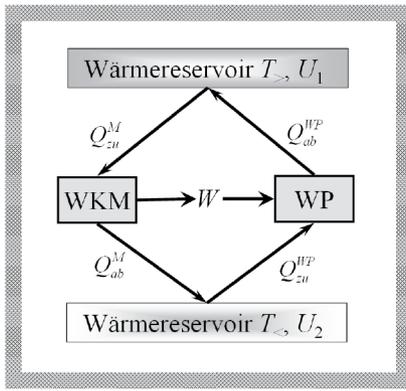


Abb. 3.55 Kombination von Wärmekraftmaschine und Wärmepumpe in einem abgeschlossenen System. Beide können keine größeren Wirkungsgrade bzw. Leistungszahlen als die nach Carnot aufweisen. Sonst wäre die Kombination ein Perpetuum mobile 2. Art und die innere Energie des Systems würde sich ändern.

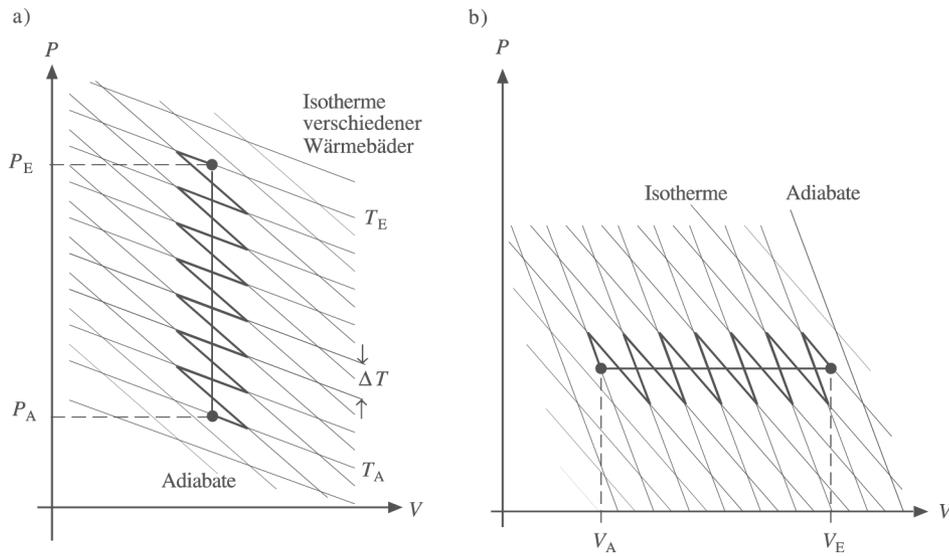


Abb. 3.56 a) Isochorer und b) isobarer Prozess wird ersetzt durch eine Folge von isothermen und adiabatischen Zustandsänderungen.

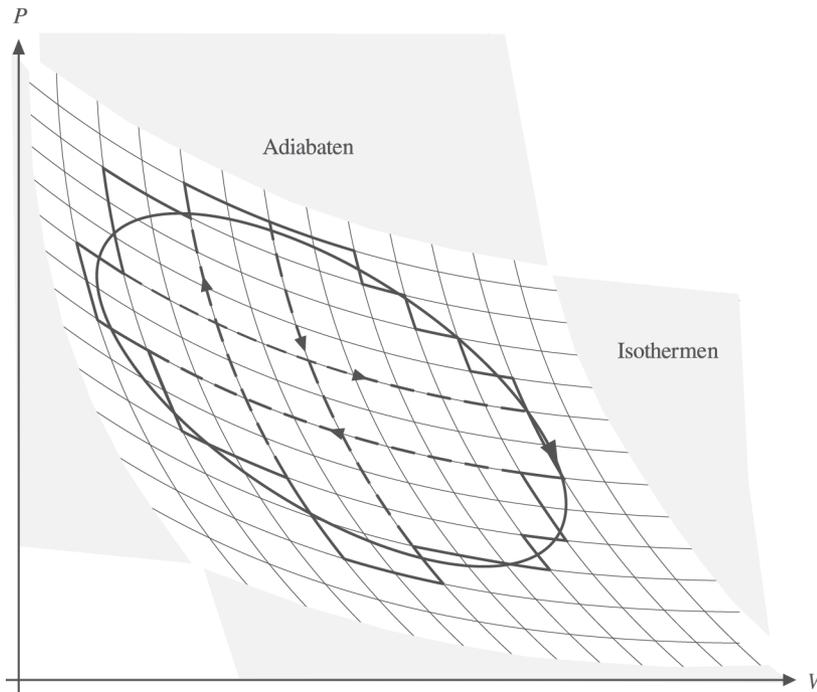


Abb. 3.57 Beliebiger Kreisprozess wird durch eine Folge von Carnot-Prozessen ersetzt. Die abgegebene mechanische Arbeit wird im P-V-Diagramm durch die eingeschlossene Fläche dargestellt. Bei nicht allzu grober Rasterung sind die Fläche des Kreisprozesses und die Summe der Flächen der Carnot-Prozesse gleich.

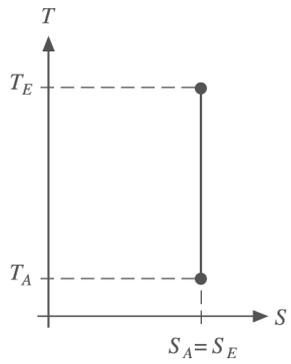


Abb. 3.58 Adiabate oder Isentrope im T-S-Diagramm.

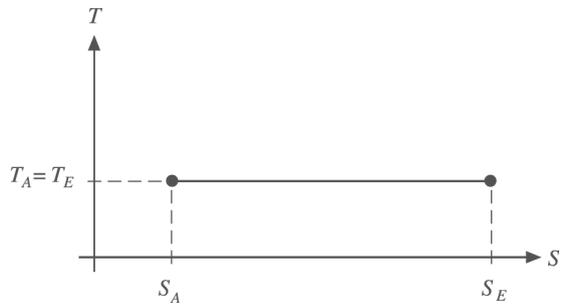


Abb. 3.59 Isotherme im T-S-Diagramm.

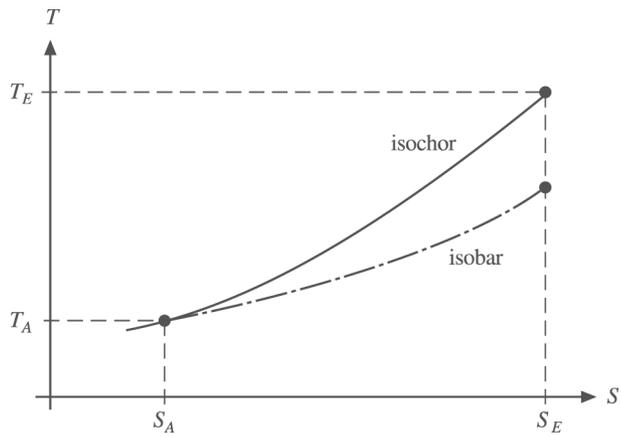


Abb. 3.60 Isochore und Isobare im T-S-Diagramm.

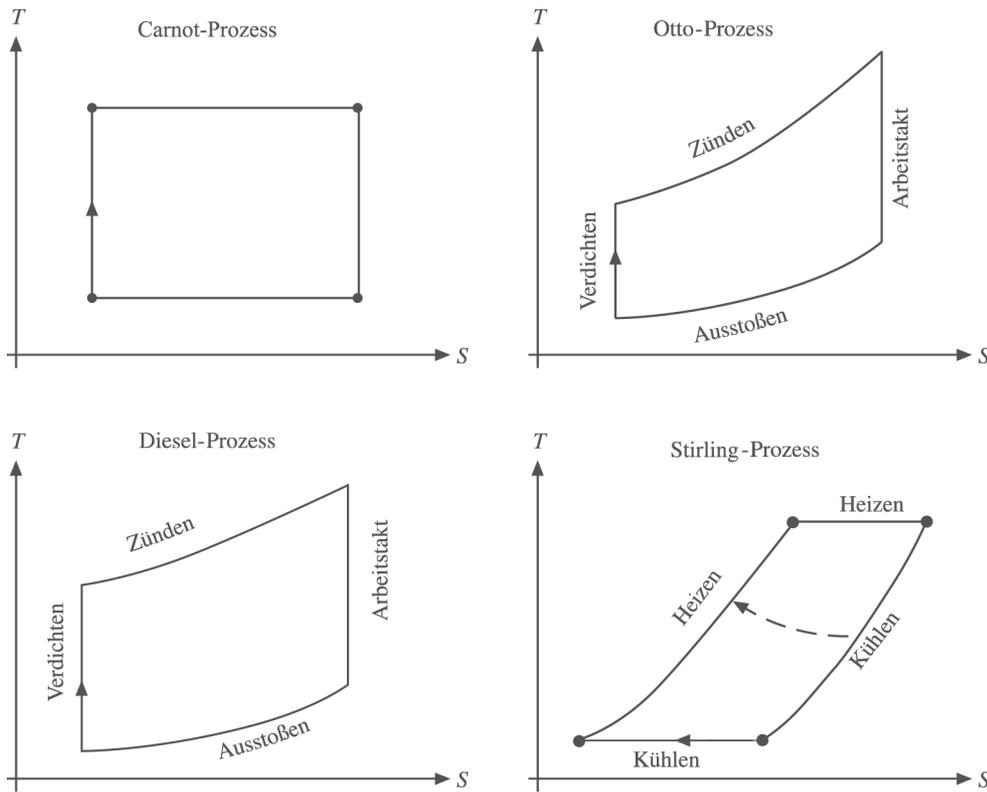


Abb. 3.61 Carnot-, Otto-, Diesel- und Stirling-Prozess im T-S-Diagramm.

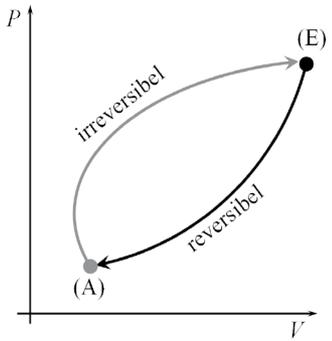


Abb. 3.62 Kreisprozess mit teilweise irreversibler Prozessführung.

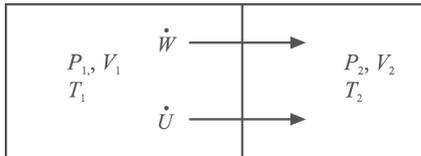


Abb. 3.63 Abgeschlossenes System mit zwei Teilsystemen, zwischen denen ein Temperatur- und Druckausgleich erfolgen kann.

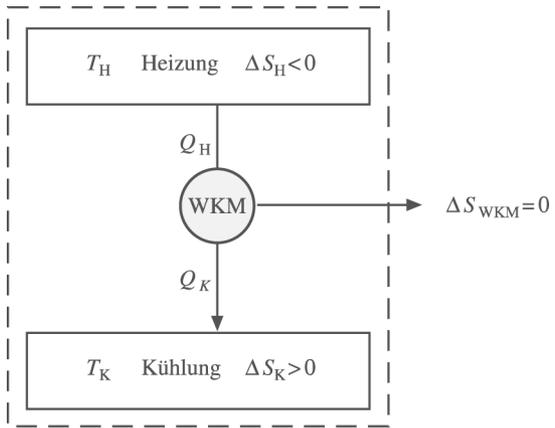


Abb. 3.64 Wärmekraftmaschine, Heizung und Kühlung zusammengefasst zum adiabaten System.

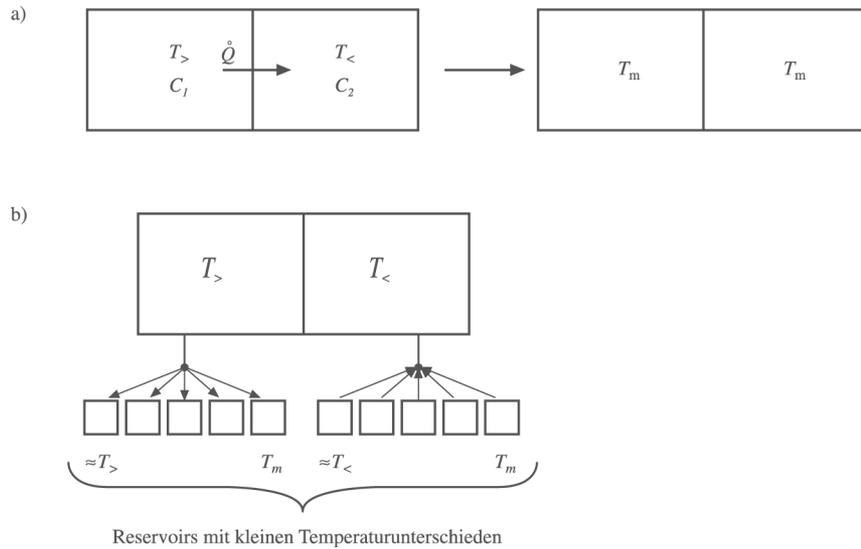


Abb. 3.65 Reversibler Ersatzprozess für den Temperatenausgleich zweier Teilsysteme eines adiabaten Systems.

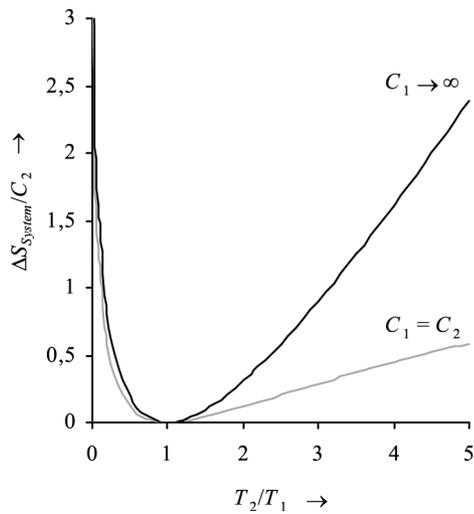


Abb. 3.66 Vergleich der Entropieänderung zwischen zwei Teilsystemen gleicher und unterschiedlicher Wärmekapazität in Abhängigkeit vom Verhältnis der Ausgangstemperaturen. Teilsystem 1 stellt im zweiten Fall ein Wärmereservoir dar.

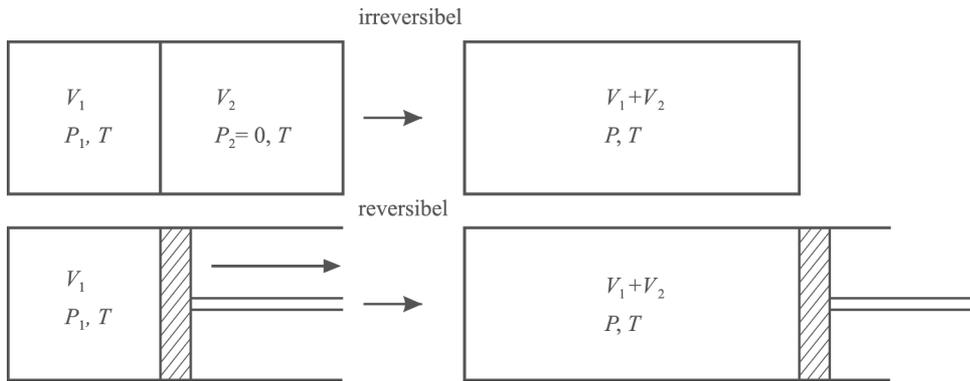


Abb. 3.67 Ersatzprozess für den Überströmversuch von Gay-Lussac zur Berechnung der Entropieänderung.

V_1, P_1 T, v_1	V_2, P_2 T, v_2
------------------------	------------------------

Abb. 3.68 In zwei verbundenen Gefäßen befinden sich unterschiedliche Gase. Jedes Gas führt einen Gay-Lussacschen Überströmversuch in das jeweils andere Gefäß aus.

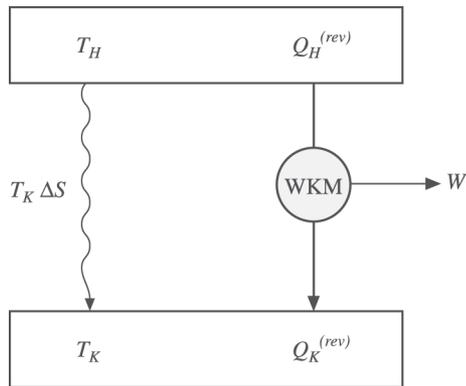


Abb. 3.69 Bei einer irreversibel arbeitenden Wärmekraftmaschine wird ein Teil der aus der Heizung fließenden Wärme über einen „Kurzschluss“ zur Kühlung geleitet, ohne dass mechanische Arbeit (Exergie) abgeführt wird.

	Z ₁	Z ₂		Z ₃			Z ₄	Z ₄
N = 1	•							
		•						
N = 2	• ⊗	•	⊗					
		⊗	•	• ⊗				
N = 4	• ▲ ⊗ □	• ▲ ⊗		• ▲	▲ □		□	
		□		⊗ □	• ⊗	• ▲ ⊗	• ▲ ⊗ □	• ▲ ⊗ □
		• ▲ □		• ⊗	⊗ □	⊗		
		⊗		▲ □	• ▲	• ▲ □		
		• ⊗ □		• □	▲ ⊗	▲		
		▲		▲ ⊗	• □	• ⊗ □		
		▲ ⊗ □				•		
		•				▲ ⊗ □		

Abb. 3.70 Mikrozustände von Molekülen, die sich entweder im oberen oder im unteren Gefäß aufhalten können.

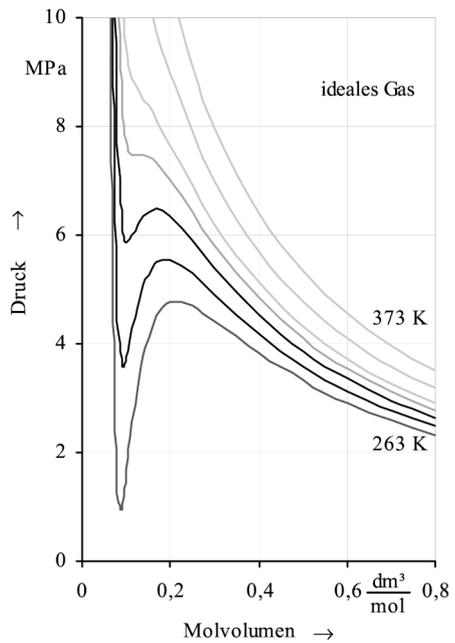


Abb. 3.71 Isothermen von CO_2 bei verschiedenen Temperaturen: 37 K, 343 K, 318 K, 30 K („kritische“ Isotherme), 27 K, 26 K.

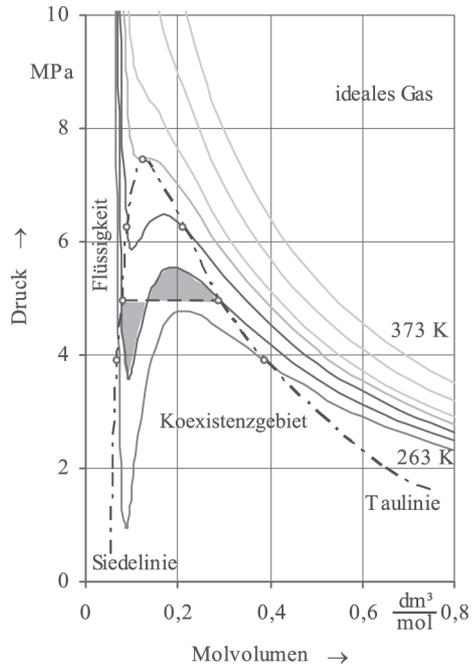


Abb. 3.72 Koexistenzgebiet im P-V-Diagramm eines realen Gases und Maxwellkonstruktion für den Dampfdruck.

Stoff		T_k in K	P_k in MPa
Wasserstoff	H ₂	33,240	1,296
Helium	He	5,2010	0,2275
Sauerstoff	O ₂	126,20	3,400
Stickstoff	N ₂	154,576	5,043
Luft		132,507	3,766
Chlor	Cl ₂	417	7,70
Wasser	H ₂ O	647,30	22,120
Ammoniak	NH ₃	405,6	11,30
Kohlendioxid	CO ₂	304,2	7,3825
Methan	CH ₄	190,56	4,5950
Propan	C ₃ H ₈	370	4,26
Butan	C ₄ H ₁₀	425,18	3,796

Tab. 3.8 Kritische Temperatur und kritischer Druck für einige Stoffe.

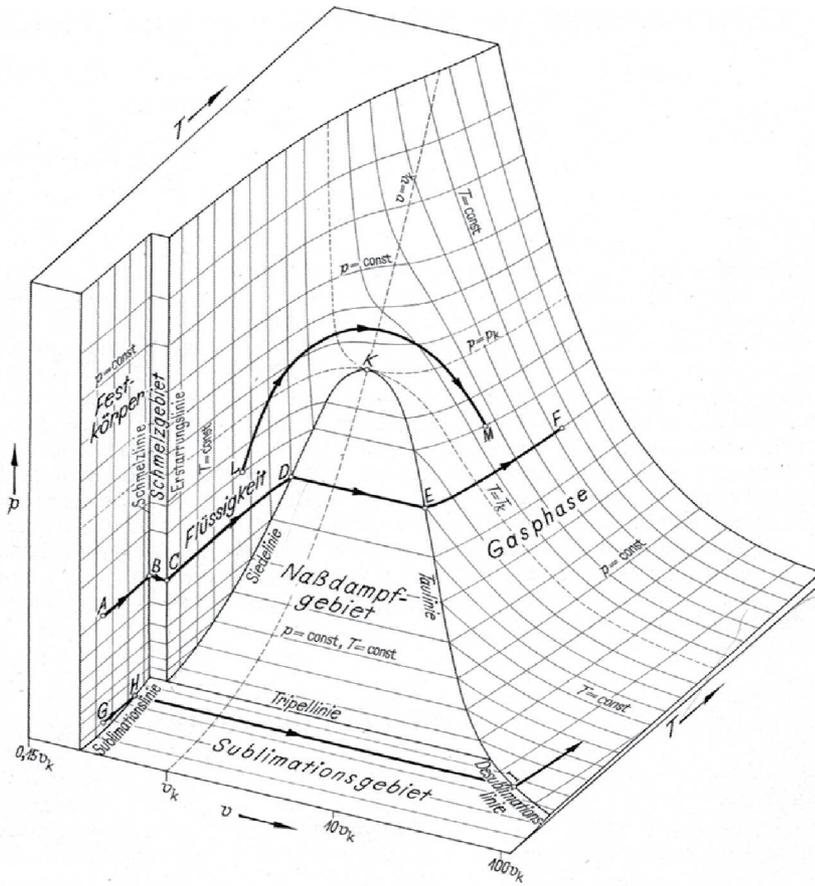


Abb. 3.73 Phasendiagramm² eines reinen Stoffes. Man unterscheidet die Gebiete mit nur einer Phase, Gebiete in denen 2 Phasen koexistieren und ein Gebiet (Linie) mit drei koexistierenden Phasen.

² Aus Baehr, Hans Dieter, Thermodynamik, Springer-Verlag 1988, 6. Auflage S. 154.

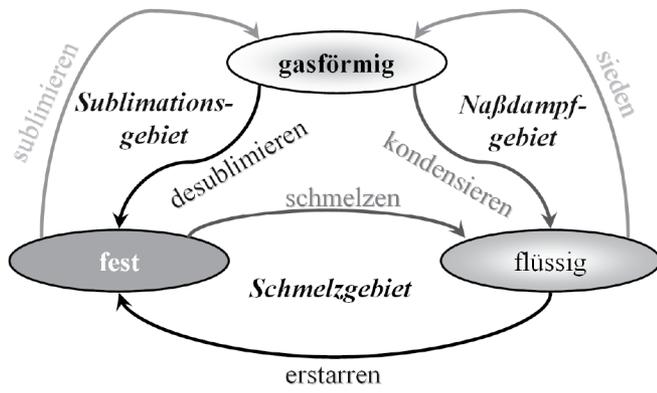


Abb. 3.74 Übergänge von einem Aggregatzustand in einen anderen.

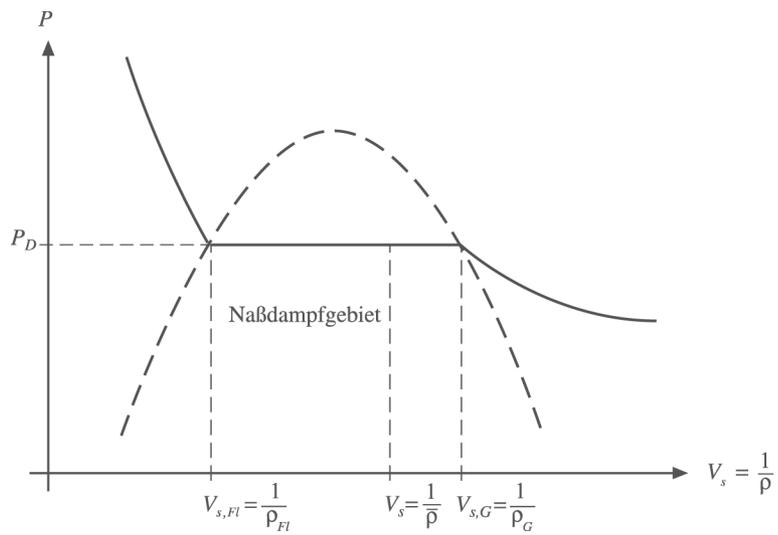


Abb. 3.75 Spezifische Volumina von Flüssigkeit und Gas im Nassdampfgebiet. Der Stoff hat das mittlere spezifische Volumen V_s . Die Massen von Flüssigkeit und Dampf werden mit dem „Hebelgesetz“ der Phasenmengen bestimmt.

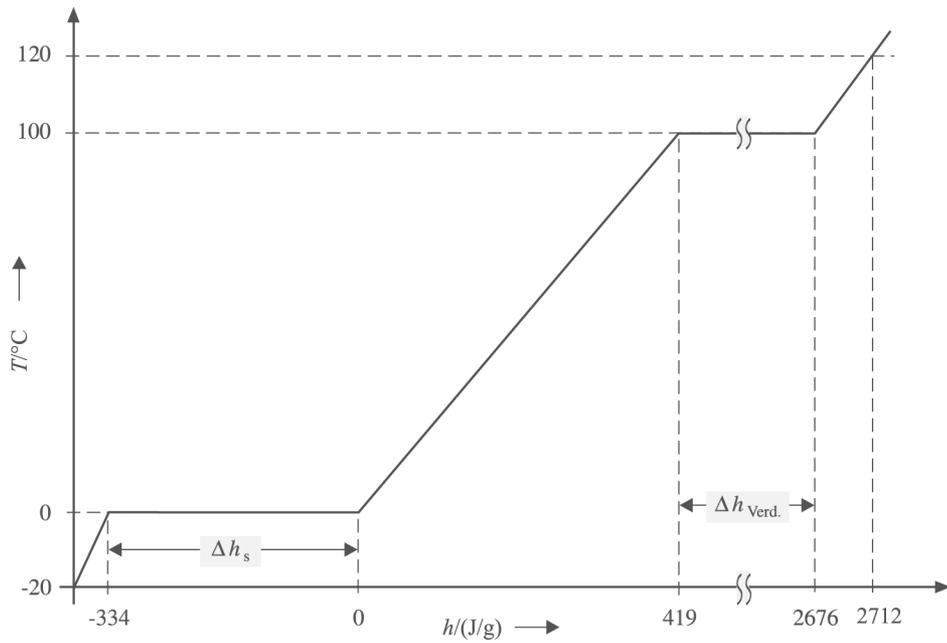


Abb. 3.76 Spezifische Enthalpie von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur bei einem Druck von 1013 hPa. Dabei wurde die spezifische Enthalpie von flüssigem Wasser $h(0\text{ °C}) = 0$ gesetzt.

	Stoff		Schmelzen		Verdampfen	
			T_S in °C	$\Delta h_{Schm.}$ in J/g	T_V in °C	$\Delta h_{Verd.}$ in J/g
Elemente	Wasserstoff	H ₂	-259,15	58,6	-252,75	461
	Stickstoff	N ₂	-209,85	25,75	-195,75	201
	Sauerstoff	O ₂	-218,75	13,82	-182,95	214
	Chlor	Cl ₂	-100,95	90,4	-34,45	289
	Aluminium	Al	660,37	397	2467	10900
	Natrium	Na	91,8	113	882,9	390
	Zink	Zn	419,58	111	907	1755
	Jod	J ₂	113,5	124	184,35	172
Verbindungen (anorganisch)	Wasser	H ₂ O	0,00	334	100,00	2257
	Ammoniak	NH ₃	-80	339	-33,45	1369
	Kohlendioxid	CO ₂	-78,45	184	-	137
Verbindungen (organisch)	Methan	CH ₄	-182,45	58,6	-161,45	510
	Propan	C ₃ H ₈	-187,65	80,0	-42,05	426
	Butan	C ₄ H ₁₀	-138,35	77,5	-0,65	386
	Äthanol	C ₂ H ₅ OH	-114,1	108	78,32	840
	Benzol	C ₆ H ₆	5,53	128	80,1	394

Tab. 3.9 Schmelz- und Verdampfungstemperaturen sowie spezifische Schmelz- und Verdampfungsenthalpien bei P = 1013 hPa.

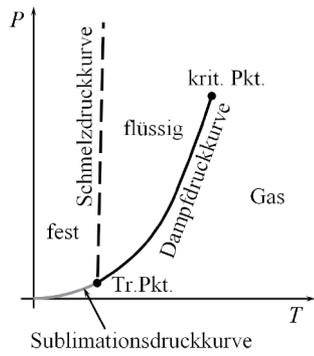


Abb. 3.77 P-T-Zustandsdiagramm eines reinen Stoffes.

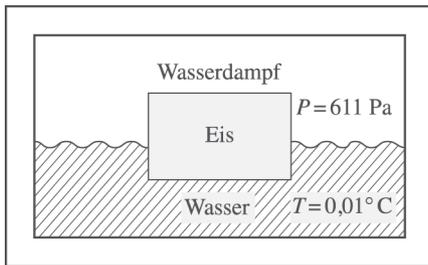


Abb. 3.78 Gefäß mit H_2O am Tripelpunkt. Eis, Wasser und Wasserdampf koexistieren.

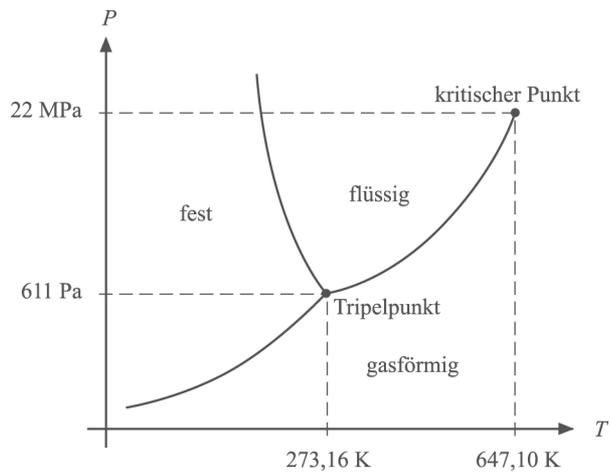


Abb. 3.79 Zustandsdiagramm von H₂O.

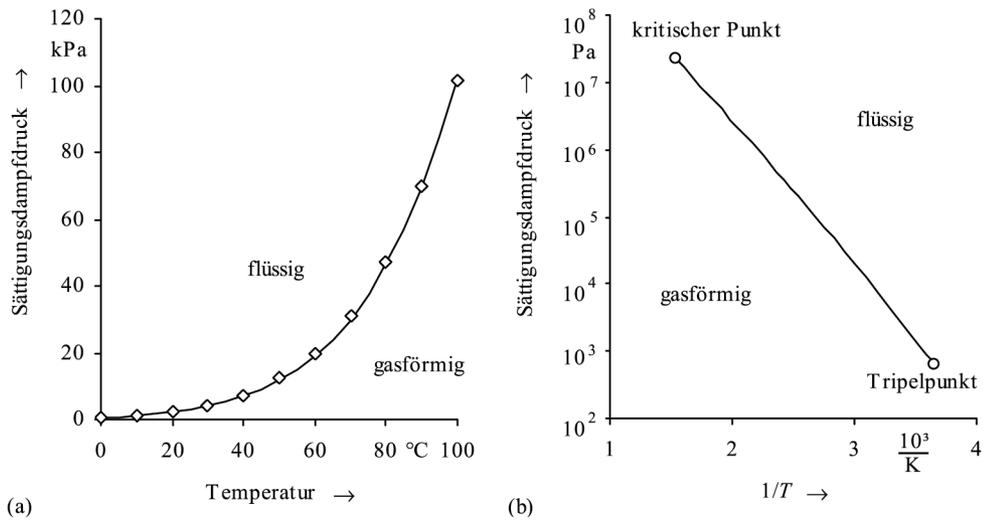


Abb. 3.80 Dampfdruckkurve von Wasser (a) linear, (b) in Arrheniusdarstellung. Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden kann die mittlere Verdampfungsenthalpie berechnet werden.

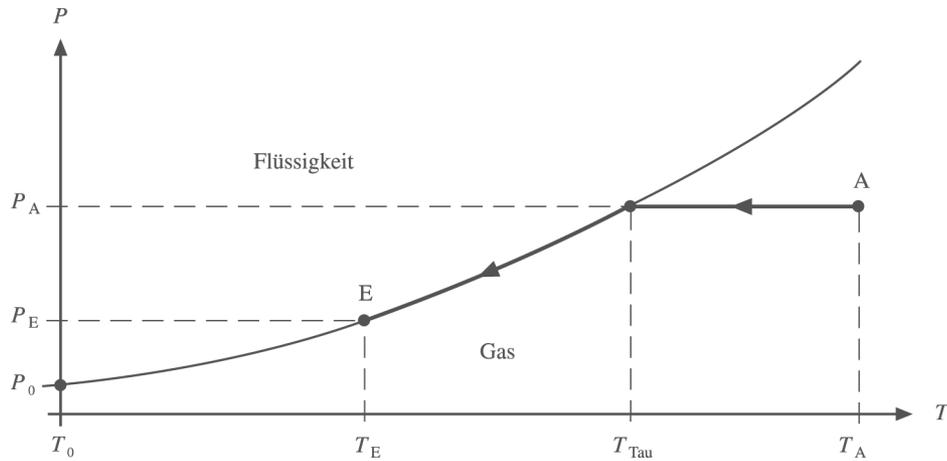


Abb. 3.81 Abkühlen aus der Gasphase. Mit Erreichen des Taupunktes beginnt die Kondensation. Temperaturabsenkung bewirkt weitere Kondensation. Die Menge des Kondensats ist proportional zu $P_a - P_E$.

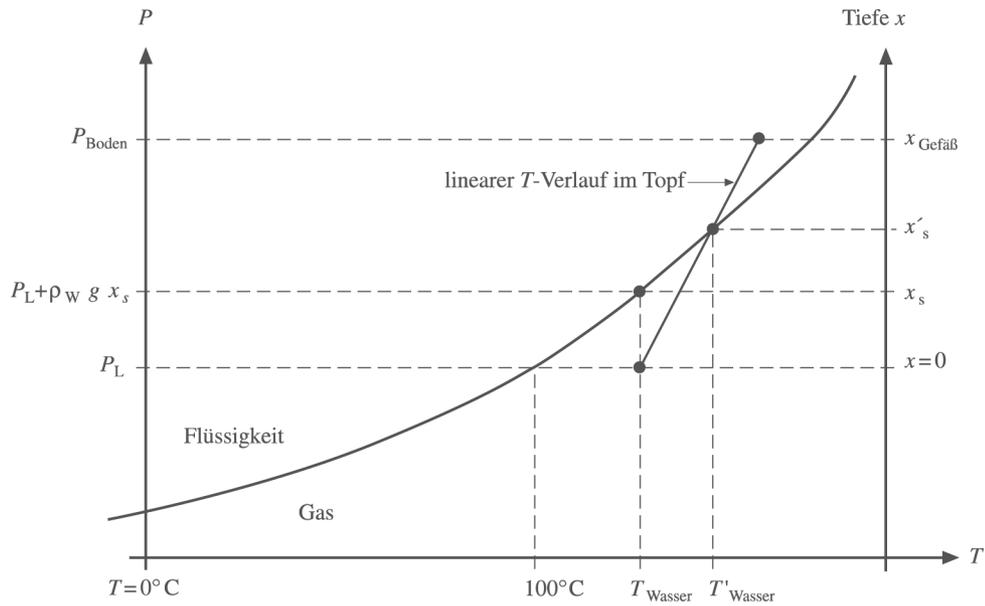


Abb. 3.82 Tiefe, bis zu der in einem Gefäß eine Flüssigkeit (Wasser) siedet.

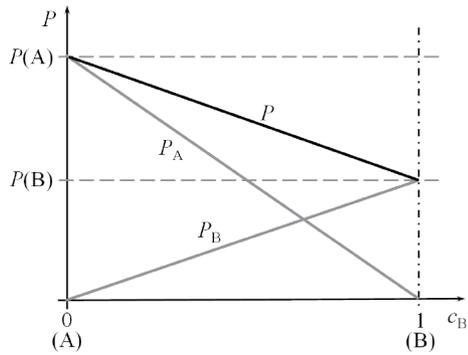


Abb. 3.83 Verlauf der Dampfdrücke der beiden Komponenten einer idealen Mischung in Abhängigkeit der Konzentration der Komponente B.

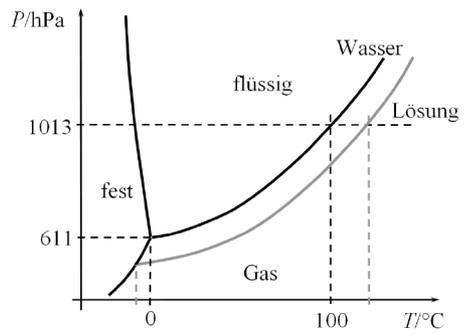


Abb. 3.84 Die Verschiebung der Dampfdruckkurve einer Salzlösung bewirkt eine Siedepunkterhöhung und eine Gefrierpunktniedrigung.

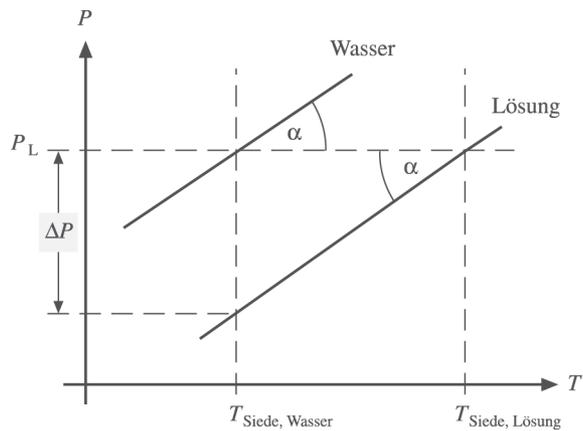


Abb. 3.85 Zur Abschätzung der Siedepunkterhöhung: Annäherung der Dampfdruckkurven von reinem Wasser und der Salzlösung durch parallele Geraden.

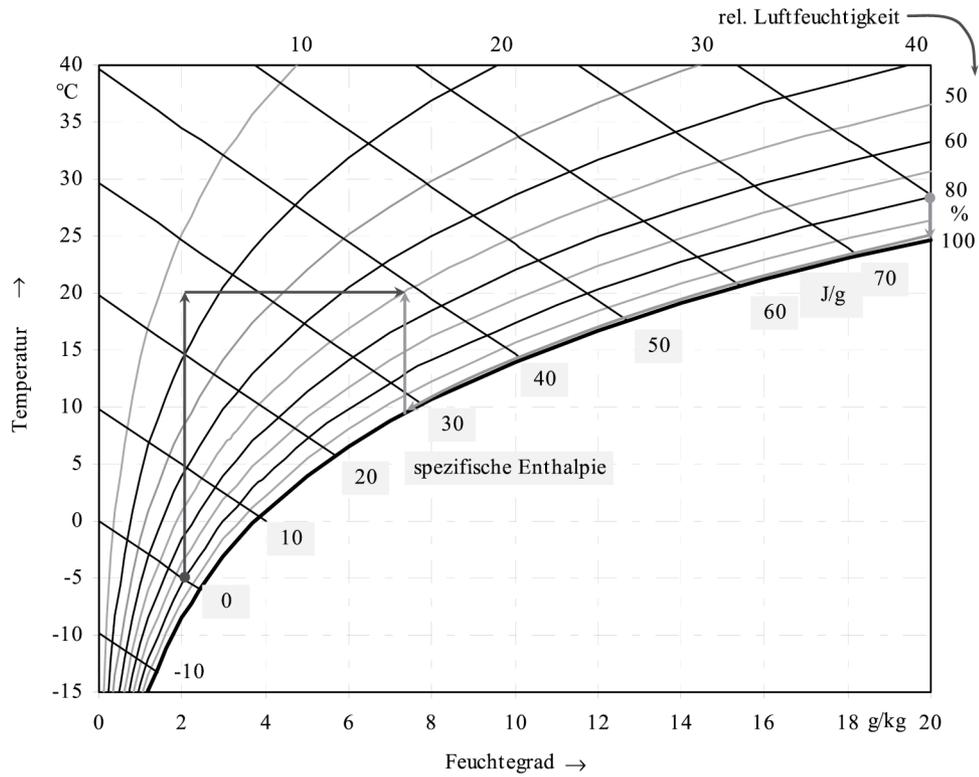


Abb. 3.86 h,x-Diagramm für feuchte Luft bei $P = 1013 \text{ hPa}$.

Prozess	treibende Kraft	Strom	Energiestrom	Zusammenhang treibende Kraft - Strom	Leitwert G
Bewegung mit innerer Reibung	Geschwindigkeitsdifferenz Objekt - Umgebung	Impulsstrom $\dot{p} = F_R$	$\Delta v \dot{p} = \Delta v F_R$	$F_R = b \Delta v$ (2.66)	$G = b$
Strömung einer viskosen Flüssigkeit	Druckdifferenz zwischen Rohrfang und Rohrende	Volumenstrom \dot{V}	$\Delta P \dot{V}$	$\dot{V} = G_{Rohr} \Delta P$	$G_{Rohr} \sim \frac{A_{Rohr}}{l_{Rohr}}$ (2.396), (2.406)
elektrischer Strom durch Leiter	Spannung oder Potentialdifferenz $U = \Delta \varphi$	Ladungsstrom $\dot{q} = I$	$\Delta \varphi I$	$I = G_{el} \Delta \varphi$ oder $U = RI$	$G_{el} \sim \frac{A_{Leiter}}{l_{Leiter}}$

Tab. 3.10 Dissipative Prozesse in Mechanik und Elektrodynamik.

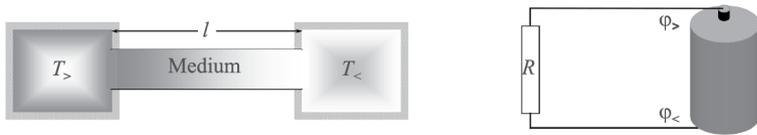


Abb. 3.87 Analogie zwischen elektrischer Leitung und Wärmeleitung. Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Systemen entspricht der elektrischen Spannung der Batterie.

Gase		Flüssigkeiten		Nichtmetalle		Metalle	
Kohlendioxid	0,015	Benzol	0,17	Styropor	0,04	Stahl	50
Argon	0,016	Wasser	0,6	Glaswolle	0,04	Eisen	67
Luft	0,026	Wärmeträgeröl	0,134	Schnee	0,11	Grauguss	55
Wasserdampf	0,031	Quecksilber	8,5	Kork	0,03...0,06	Messing	110
Helium	0,144			Holz	0,1 ...0,2	Aluminium	220
				Ziegelmauer	0,35...0,9	Kupfer	384
				Glas	0,7	Silber	421
				Beton	0,8 ...1,3		
				Eis	2,2		
				Diamant	2000		

Tab. 3.11 Wärmeleitfähigkeit in $\frac{W}{m \cdot K}$ von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern bei 20 °C und 1013 hPa.

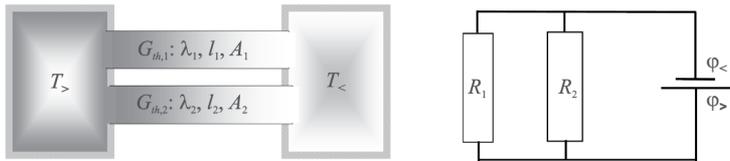


Abb. 3.88 Parallelschaltung von Wärmeleitern und das elektrische Analogon.



Abb. 3.89 Serienschaltung von Wärmeleitern und das elektrische Analogon.

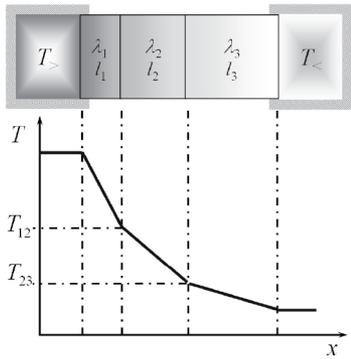


Abb. 3.90 Temperaturverlauf in einer aus drei Schichten bestehenden Wand. $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$. Die Steigungen der Geraden sind umgekehrt proportional zu den Wärmeleitfähigkeiten.

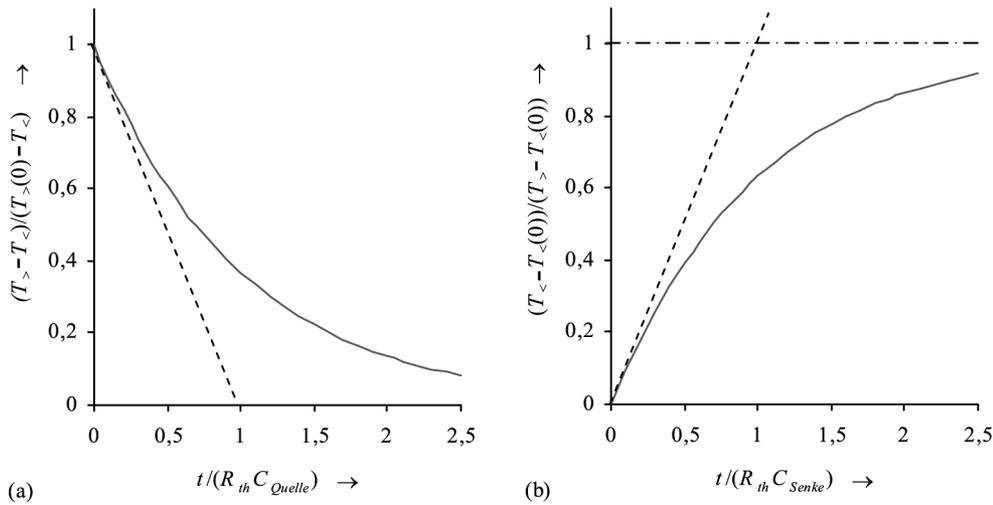


Abb. 3.91 Abkühlen (a) einer Wärmequelle und Aufheizen (b) einer Wärmesenke durch ein Wärmereservoir.

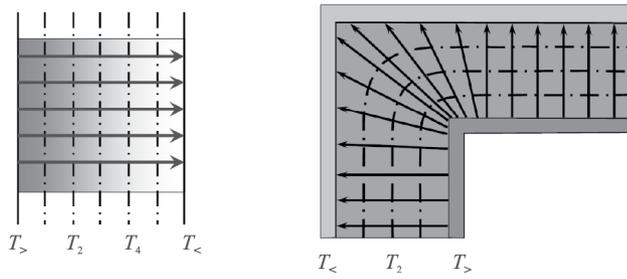


Abb. 3.92 Wärmestromdichten und Isothermen einer ebenen Wand und einer Kante.

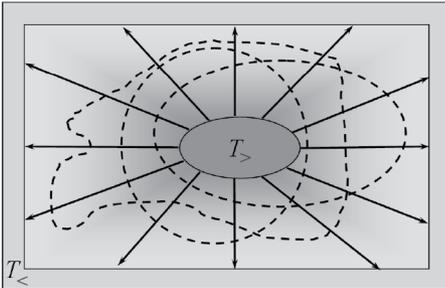


Abb. 3.93 Wärmestrom durch eine geschlossene Hülle um die Wärmequelle. Der Wärmestrom durch die Hülle ist unabhängig von der Größe und Form der Hülle.

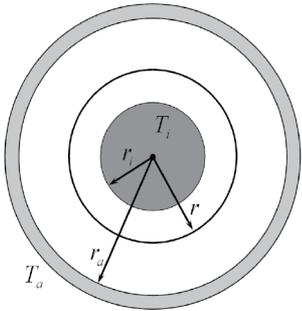


Abb. 3.94 Wärmeleitung im zylindersymmetrischen Wärmeleiter: Wärmequelle und -senke sind lange, konzentrische Zylinder. Der Wärmestrom fließt radial von der innen liegenden Wärmequelle zur Wärmequelle.

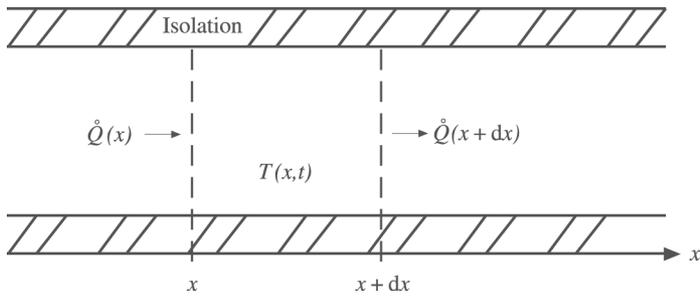


Abb. 3.95 Eindimensionaler Wärmeleiter, in dem die Wärme nur in x-Richtung strömt, bei dem die Wärmekapazität des leitenden Materials zu berücksichtigen ist.

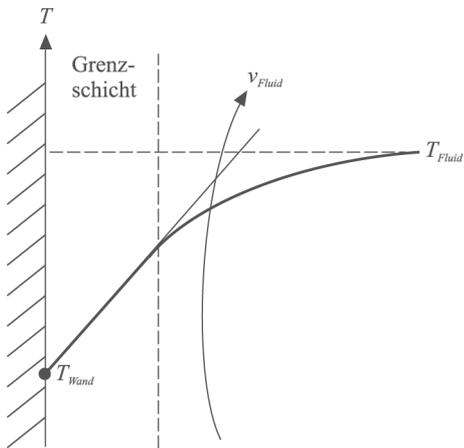


Abb. 3.96 Temperaturverlauf im Fluid einer angeströmten ebenen Wand. Das Fluid ist wärmer als die Wand.

Tab. 3.12 Wärmeübergangskoeffizienten für Luft und Wasser für typische Anwendungsfälle.

	Luft	α_k in $\text{W/m}^2\text{K}$	Wasser	α_k in $\text{W/m}^2\text{K}$
Gebäude, Anlagen	Innenseite Wand	8,1	um Rohre, ruhend	350 ... 580
	Außenseite Wand	23	um Rohre, strömend	$350 + 2100 (\nu\text{W/ms-1})^{0,5}$
	Außenseite Wand bei Sturm bis zu	116	in Kesseln	580 ... 2300
	Innenseite Fenster	8,1	in Kesseln mit Rührwerk	2300 ... 4700
	Außenseite Fenster	12	strömend, in Rohren	2300 ... 4700
	Fußböden und Decken (oben \rightarrow unten)	8,1	siedend in Rohren	4700 ... 7000
	dto. unten \rightarrow oben	5,8	siedend an Metallfläche	3500 ... 5800
Senkrecht zur Metallwand	ruhend	3,5 ... 35	kondensierender Wasserdampf	11600
	mäßig bewegt	23 ... 70		
	kräftig bewegt	59 ... 290		
Längs ebener Wände	polierte Oberfläche $\nu_L \leq 5 \text{ m/s}$	$5,6 + 4 \nu/\text{ms-1}$		
	$\nu_L > 5 \text{ m/s}$	$7,12 (\nu\text{W/ms-1})^{0,78}$		
	Mauerwerk $\nu_L \leq 5 \text{ m/s}$	$6,2 + 4,2 \nu/\text{ms-1}$		
	$\nu_L > 5 \text{ m/s}$	$7,52 (\nu\text{W/ms-1})^{0,78}$		

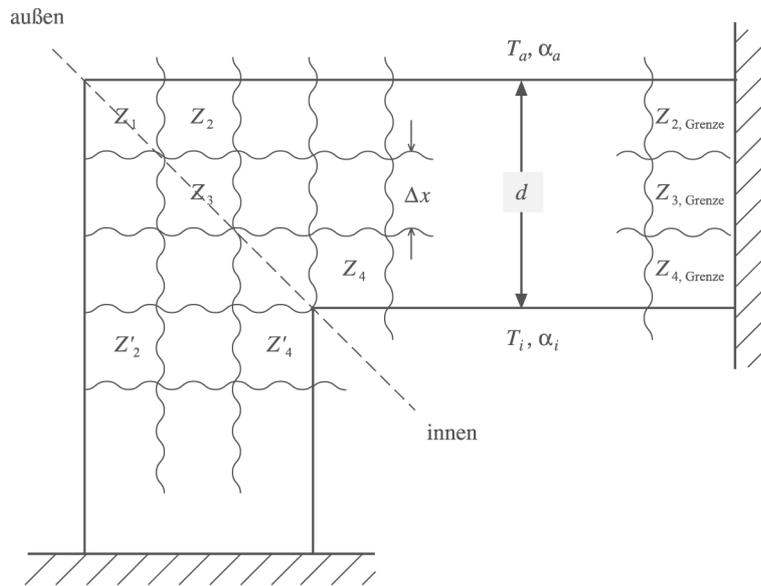


Abb. 3.97 Bestimmung der Temperaturverteilung einer Kante von einer Wand. Rasterung des Bereiches in der Umgebung der Kante durch Zellen mit quadratischer Grundfläche.

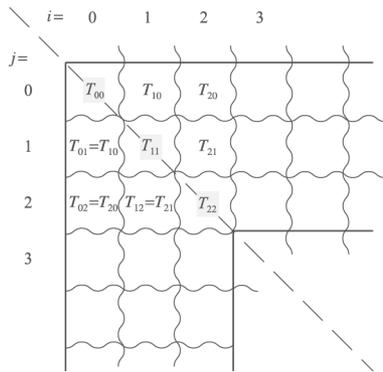


Abb. 3.98 Symmetrie der Temperaturverteilung in einer Wandkante.

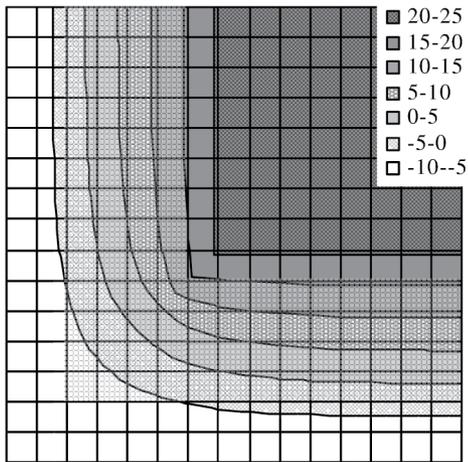


Abb. 3.99 Temperaturverlauf in einer Wandkante, Außentemperatur $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, Innentemperatur $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Angedeutet ist die Lage der Mauer. Die Iteration wurde mit dem Tabellenkalkulationsprogramm „Excel“ durchgeführt.

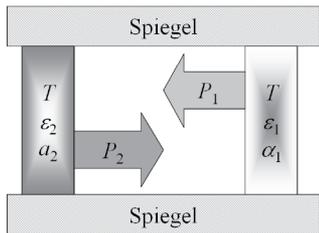


Abb. 3.100 Zwei schwarze Körper, zwischen denen Wärme nur durch Strahlung transportiert werden kann, im thermischen Gleichgewicht. Durch die (idealen) Spiegel wird erzwungen, dass das gesamte, von einem der Körper abgestrahlte Licht den anderen trifft.

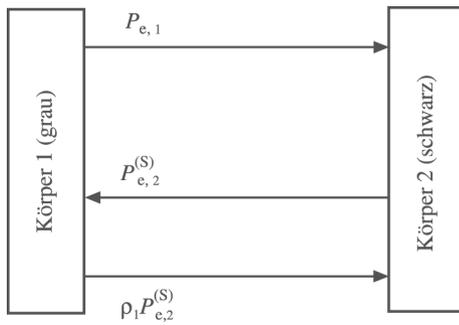


Abb. 3.101 Schwarzer und grauer Körper im thermischen Gleichgewicht.

	Material	T in °C	ε		Material	T in °C	ε
Metalle	Aluminium, poliert	20	0,04	Nicht- metalle	Beton	20	0,94
	Aluminium, oxidiert	20	0,25		Dachpappe	20	0,90
	Chrom, poliert	150	0,071		Glas	20	0,88
	Gold, poliert	230	0,018		Holz	25	0,90
	Eisen, poliert	100	0,20		Mauerwerk	20	0,93
	Eisen, angerostet	20	0,65		Kunststoffe	20	0,90
	Eisen, verzinkt	25	0,25		Lacke, Farben	100	0,92 ... 0,97
	Messing, blank	25	0,045		Wasser	20	0,90
	Messing, oxidiert	200	0,61				

Hinweis: Bei Glas und Wasser wurde die Dicke so gewählt, dass keine Strahlung mehr durchgelassen wurde.

Tab. 3.13 Emissionsgrade verschiedener Materialien. Es sind die Temperaturen angegeben, für die ε angegeben wurde.

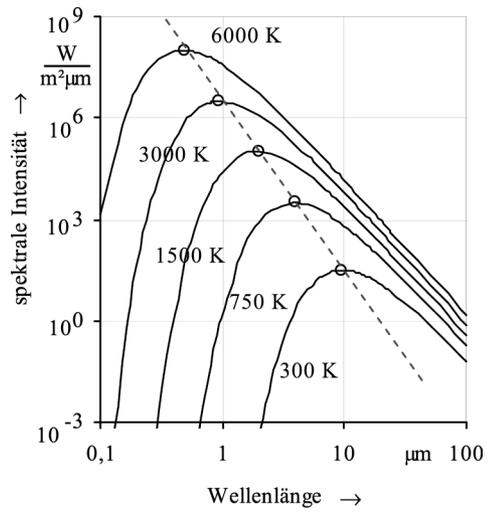


Abb. 3.102 Spektrale Verteilung der Strahlung schwarzer Körper bei unterschiedlichen Temperaturen.

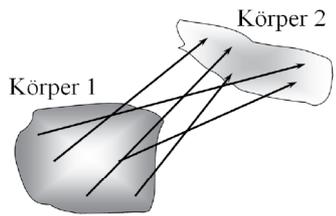


Abb. 3.103 Zum Strahlungsaustausch zweier schwarzer Körper: Welcher Anteil der vom Körper 1 emittierten Strahlung trifft den Körper 2?

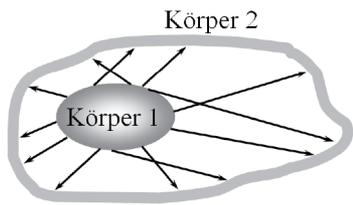


Abb. 3.104 Strahlungsaustausch zwischen zwei schwarzen Körpern, wobei der eine den anderen umschließt.

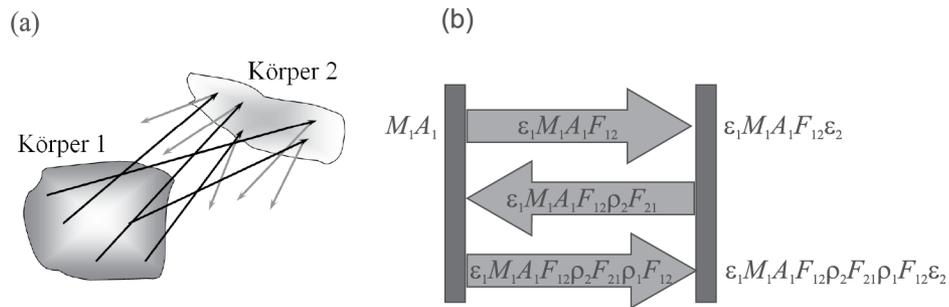


Abb. 3.105 (a) Strahlungsaustausch zwischen zwei grauen Körpern. Die vom Körper 1 emittierte Strahlung wird fortwährend zwischen den Körpern teilweise reflektiert. (b) zur Herleitung von (3.370).

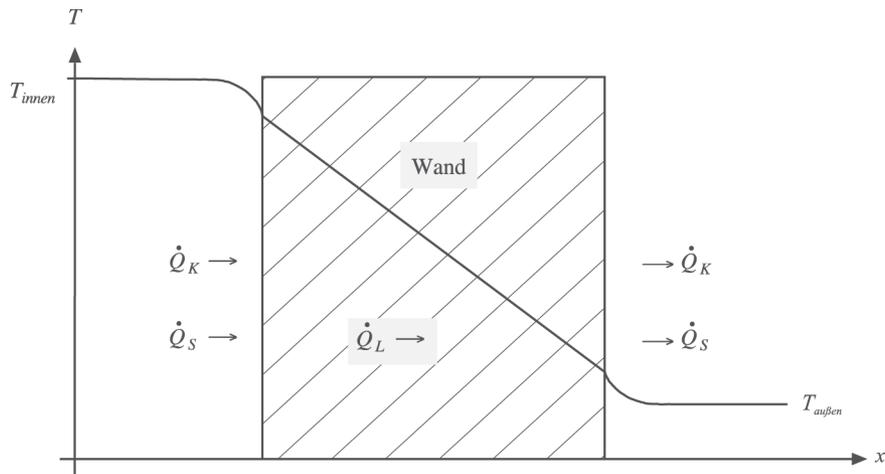


Abb. 3.106 Wärmetransport durch Konvektion und Strahlung außerhalb und durch Wärmeleitung innerhalb einer Hauswand.

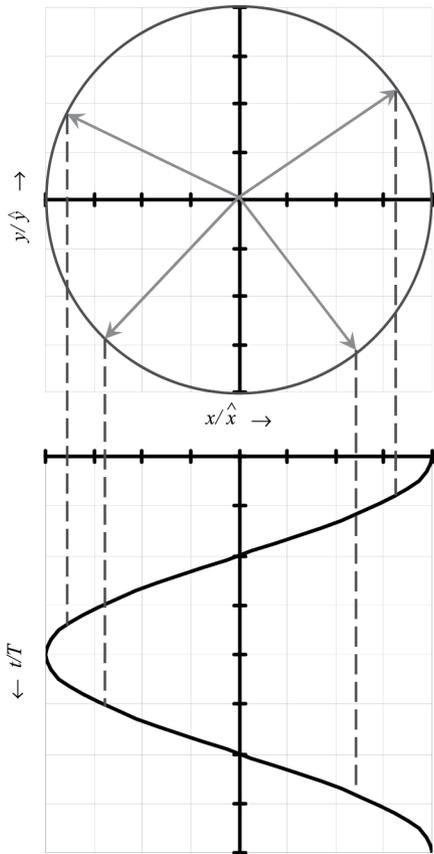


Abb. 4.1 Zusammenhang zwischen harmonischer Schwingung und gleichförmiger Kreisbewegung. Die Bewegungen beginnen, wenn der Oszillator mit der Amplitude in positive Richtung aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt ist bzw. das kreisende Objekt sich bei $x = r$ befindet.

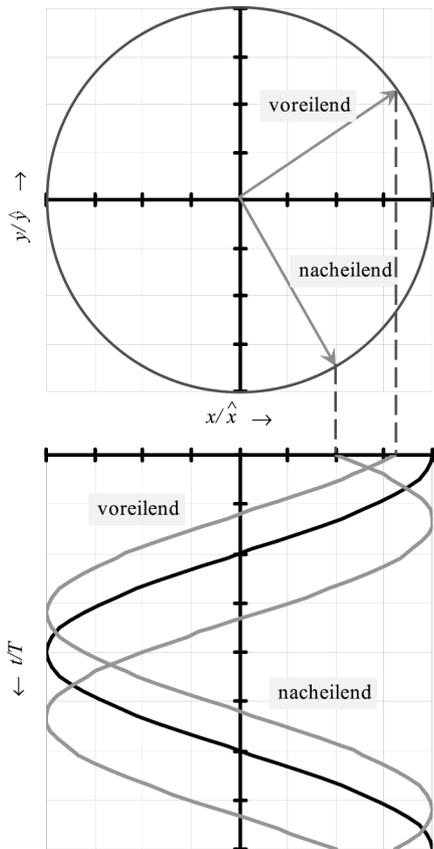


Abb. 4.2 Harmonische Schwingung und Kreisbewegung bei verschiedenen Nullphasenwinkeln.

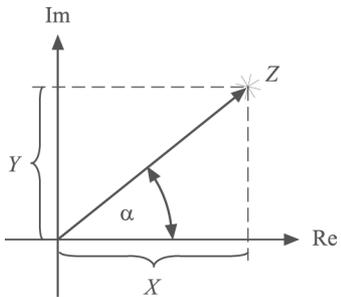


Abb. 4.3 Darstellung einer komplexen Zahl in der Gaußschen Zahlenebene durch Real- und Imaginärteil bzw. Betrag und Phasenwinkel.

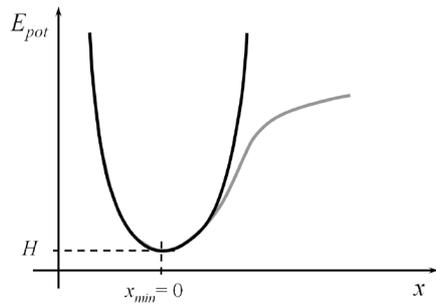


Abb. 4.4 Minimum potentieller Energie und Annäherung durch eine Parabel in der Umgebung des Minimums.

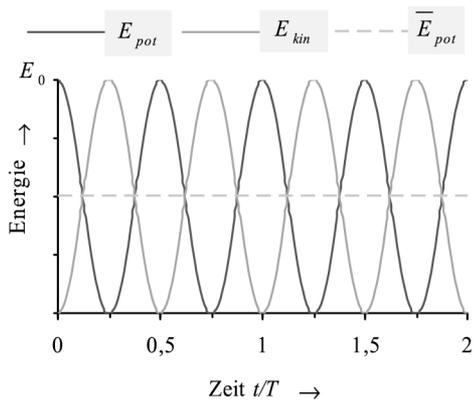


Abb. 4.5 Verlauf von potentieller, kinetischer und mittlerer potentieller Energie eines mechanischen Oszillators.

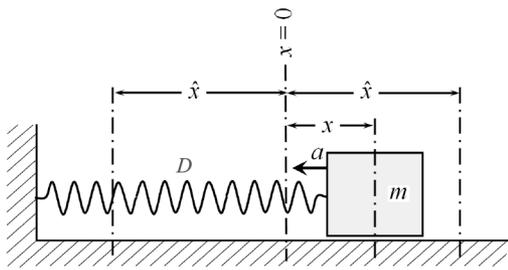


Abb. 4.6 Horizontal angeordnetes Federpendel.

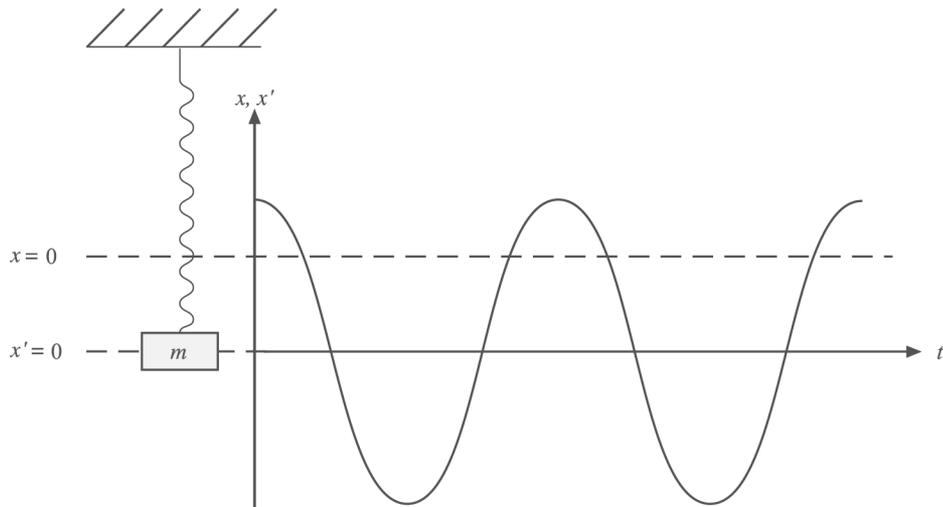


Abb. 4.7 Federpendel unter Einfluss der Schwerkraft.

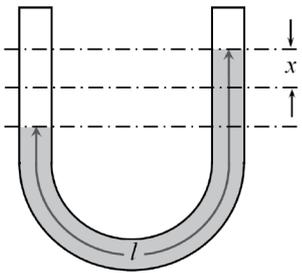


Abb. 4.8 Schwingung einer Flüssigkeit in einem U-Rohr.

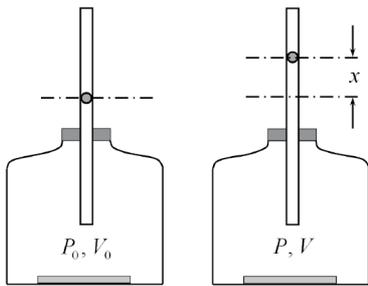


Abb. 4.9 Schwingungen einer Kugel auf einem Gaspolster.

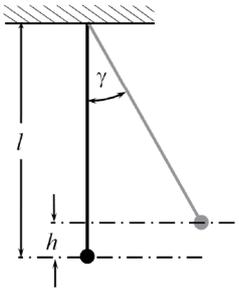


Abb. 4.10 Mathematisches Pendel.

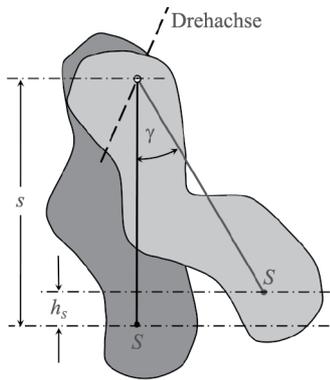


Abb. 4.11 Physikalisches Pendel.

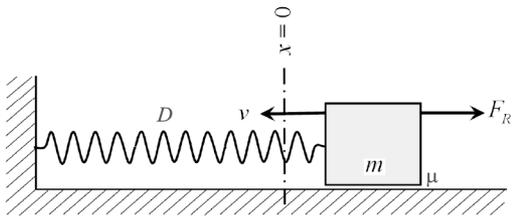


Abb. 4.12 Federpendel schwingt unter dem Einfluss äußerer Reibung.

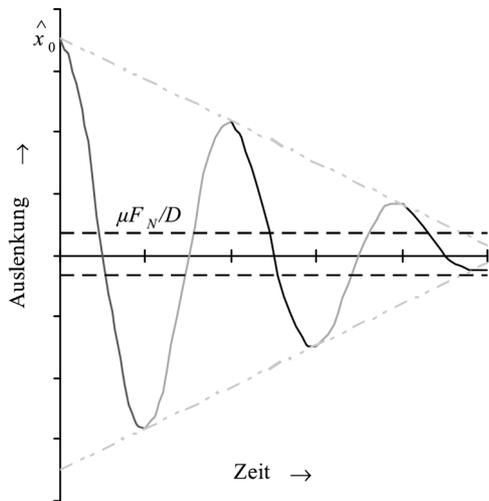


Abb. 4.13 Verlauf der Auslenkung bei äußerer Reibung. Pro Periode fällt die Amplitude um $4\mu F_N / D$ ab.

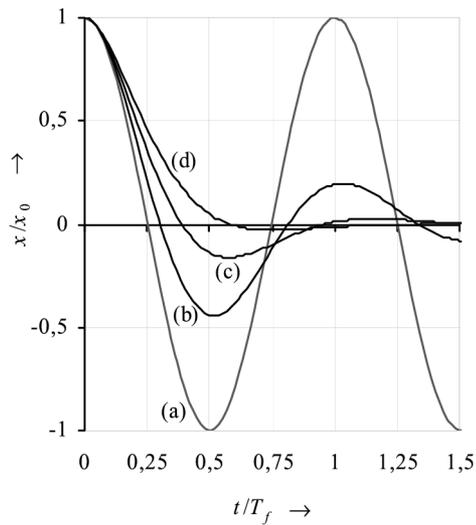


Abb. 4.14 Gedämpfte Schwingung (geschwindigkeitsproportionale Reibung). Verlauf der Auslenkung bei gleichen Anfangsbedingungen, aber unterschiedlich großen Dämpfungskoeffizienten. (a): $\delta/\omega_f = 0$; (b): 0,25; (c): 0,5; (d): 0,75. Die Periodendauer nimmt mit wachsender Dämpfung zu.

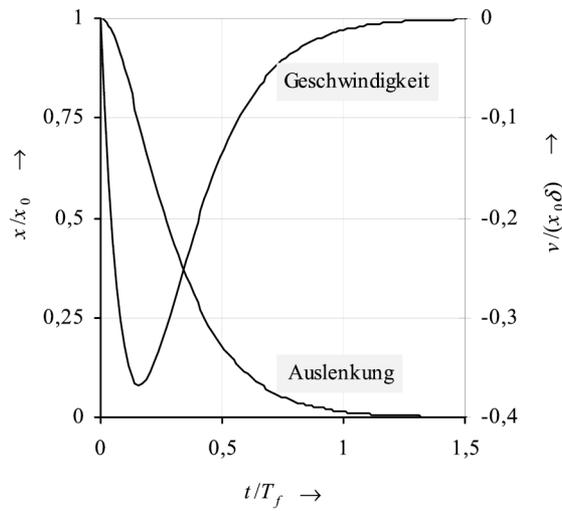


Abb. 4.15 Auslenkung und Geschwindigkeit einer gedämpften Schwingung (geschwindigkeitsproportionale Reibung) im aperiodischen Grenzfall.

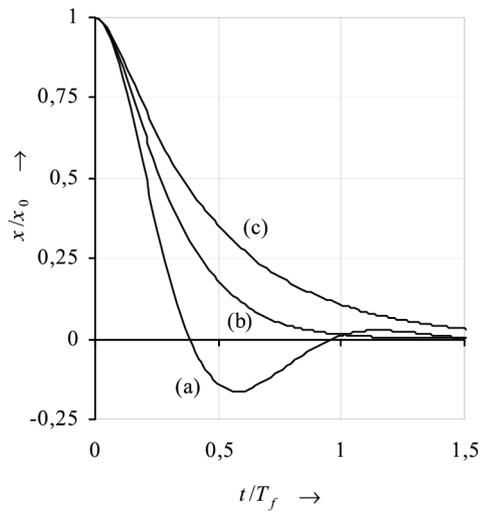


Abb. 4.16 Vergleich des Verlaufes der Auslenkung eines Oszillators in (a) Schwingfall, (b) aperiodischen Grenzfall und (c) Kriechfall (gleiche Anfangsbedingungen).

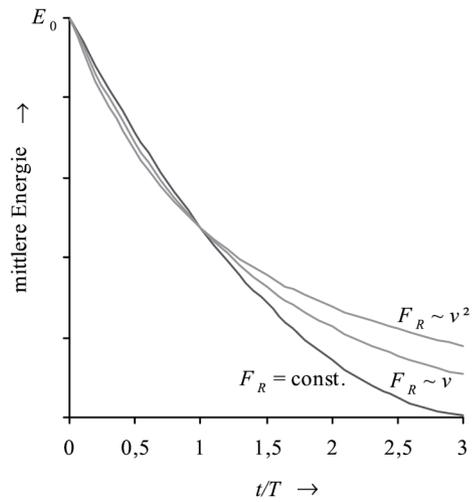


Abb. 4.17 Verlauf der mittleren Energie von Schwingungen unter dem Einfluss von äußerer und innerer Reibung. Die Parameter für die Reibungskräfte sind so gewählt, dass in der ersten Periode die Energieverluste gleich sind.

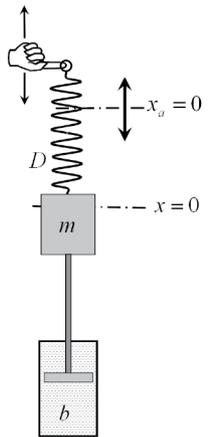


Abb. 4.18 Periodische Auf- und Abbewegung der Aufhängung eines Federpendels, bei dem geschwindigkeitsproportionale Reibungskräfte wirken.

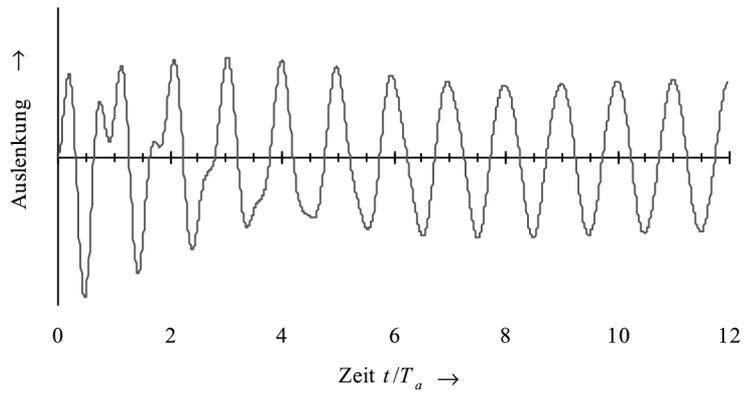


Abb. 4.19 Einschwingen eines Oszillators unter dem Einfluss einer äußeren Kraft. (Oszillator: $\omega_f = 6,32 \text{ s}^{-1}$, $\delta = 0,16 \text{ s}^{-1}$, äußere Kraft: $\omega_a = 3,00 \text{ s}^{-1}$, $\hat{F}_a = 10 \text{ N}$).

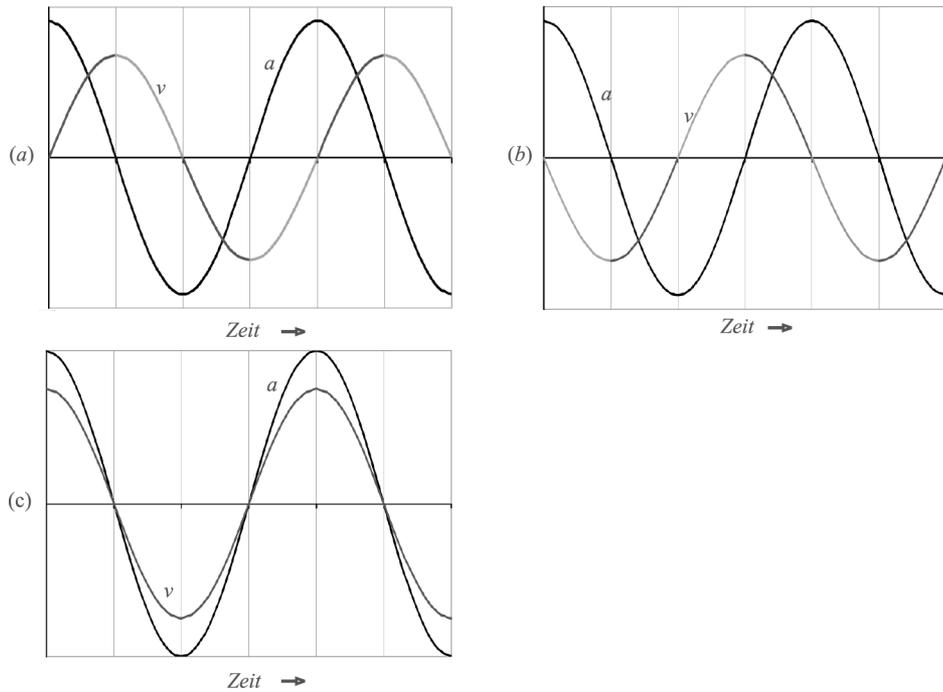


Abb. 4.20 Verläufe von äußerer Kraft und Geschwindigkeit des Oszillators bei (a) statischer, (b) hochfrequenter und (c) resonanter Anregung.

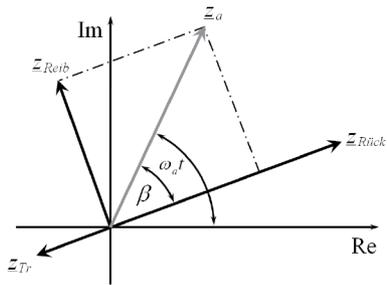


Abb. 4.21 Stellung der Zeiger für die Trägheits-, Reibungs- und Rückstellkraft sowie der äußeren Kraft zu einem beliebigen Zeitpunkt.

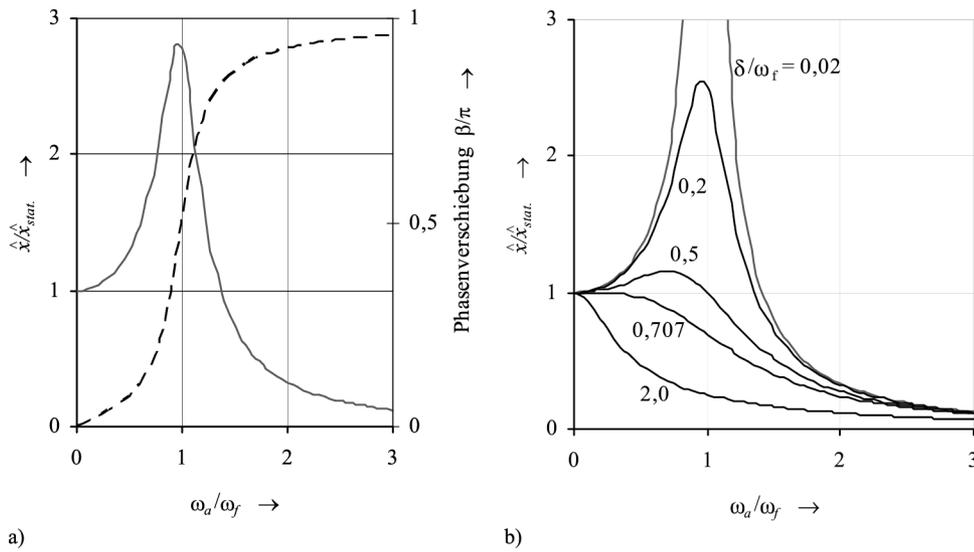


Abb. 4.22 (a): Amplituden- und Phasenresonanzfunktion ($\delta/\omega_f = 0,18$), (b): Amplitudenresonanzfunktion bei unterschiedlich starker Dämpfung. Als „kritische“ Dämpfung bezeichnet man $\delta/\omega_f = 0,707 = 1/\sqrt{2}$.

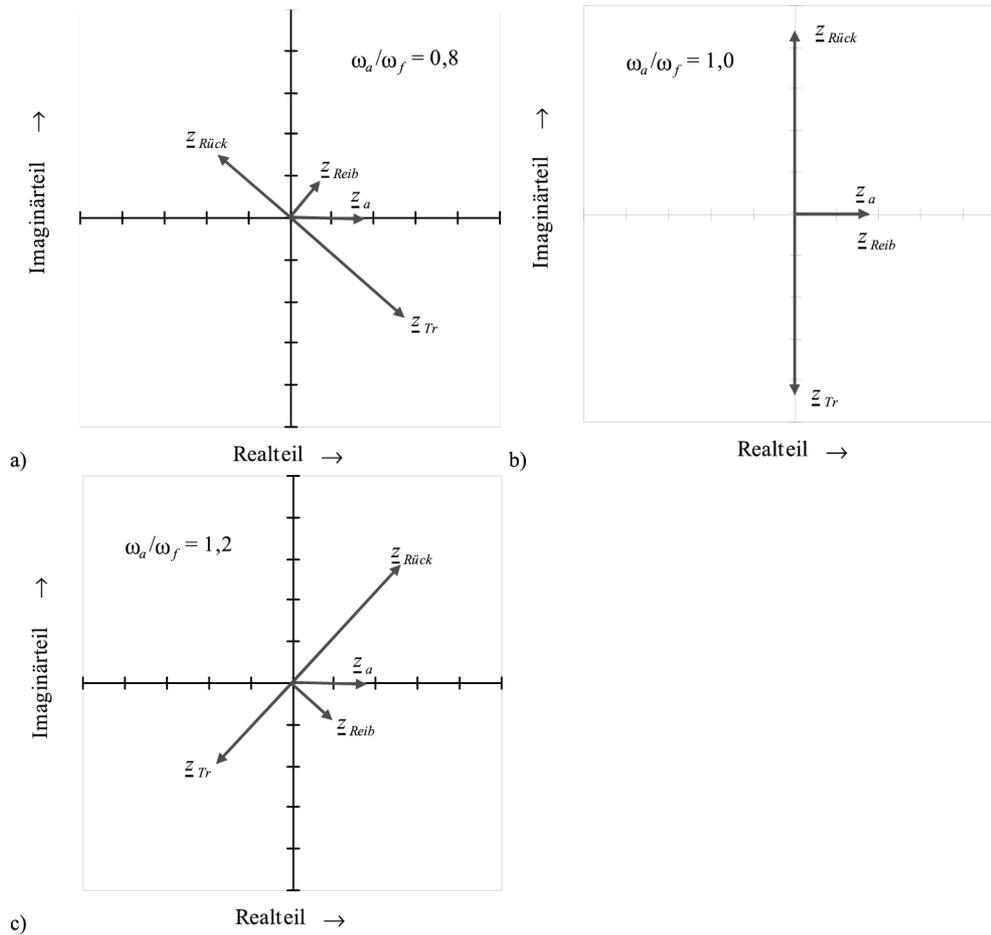


Abb. 4.23 Stellungen der Zeiger zum Zeitpunkt $t = 0$ aus **Abb. 4.21** bei (a) statischer, (b) resonanter und (c) hochfrequenter Anregung.

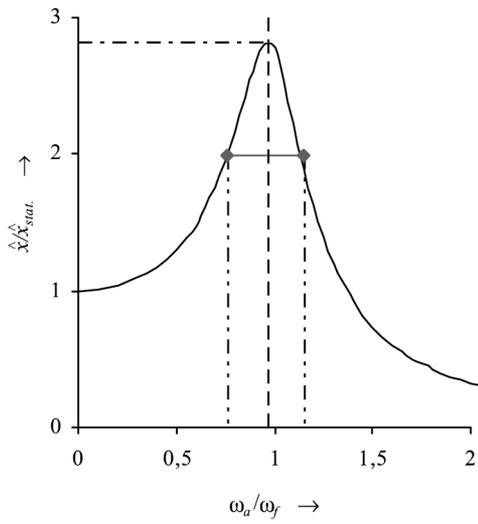


Abb. 4.24 Halbwertsbreite und Resonanzüberhöhung.

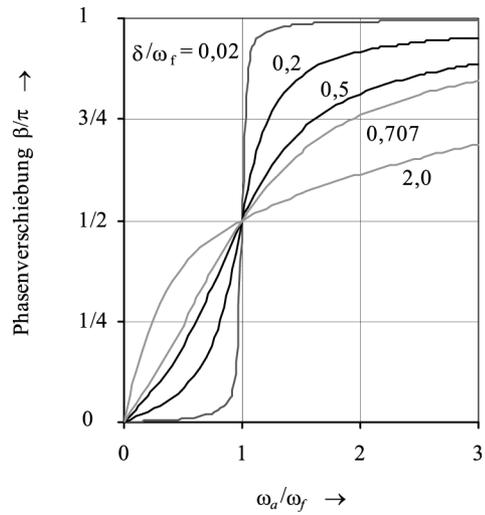


Abb. 4.25 Phasenresonanzfunktion bei unterschiedlicher Dämpfung.

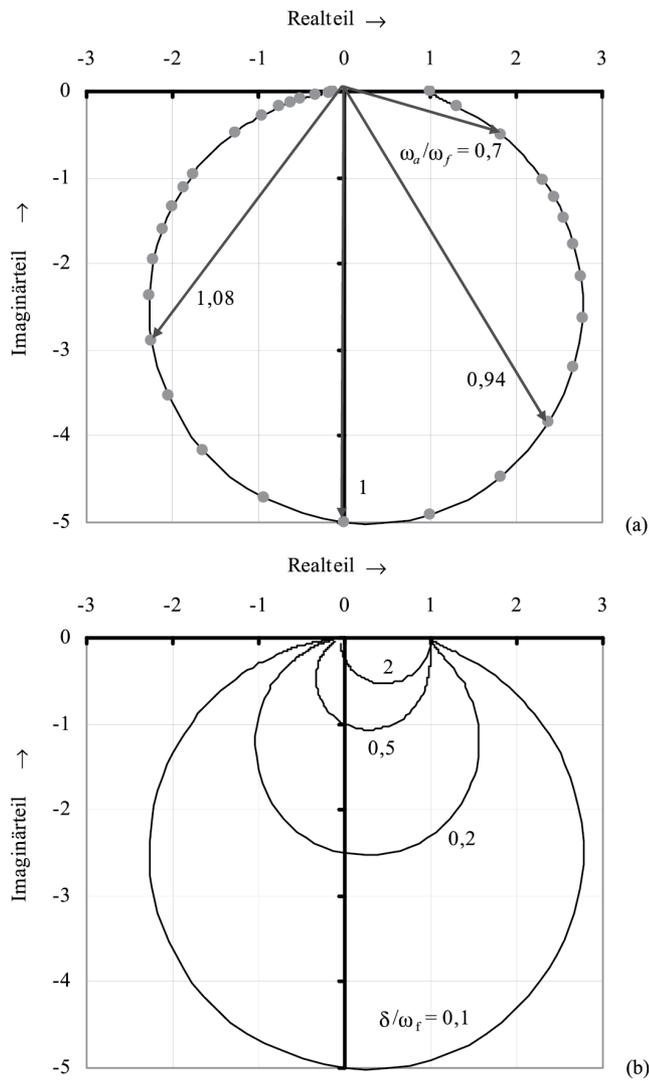


Abb. 4.26 (a) Ortskurve eines Oszillators mit $\delta/\omega_f = 0,1$; (b) unterschiedliche Dämpfungen.

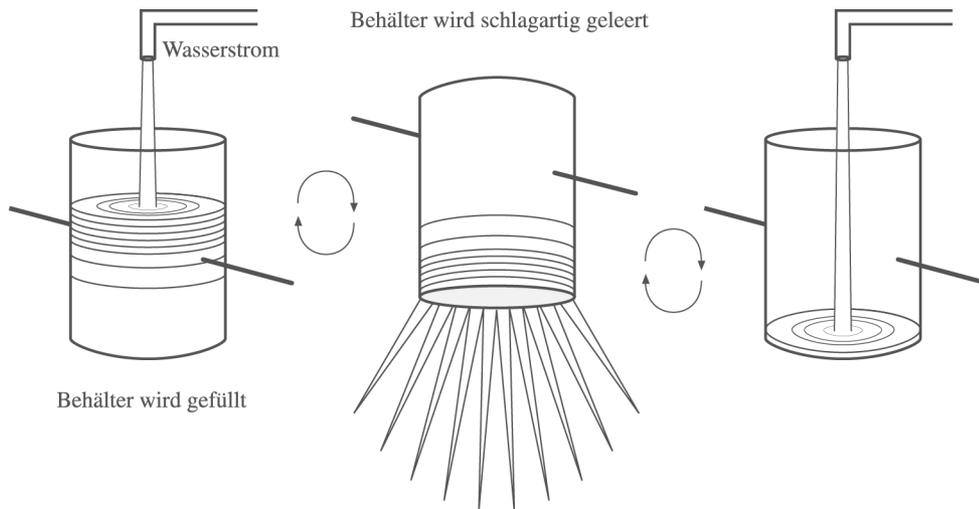


Abb. 4.27 Kippschwingung eines Behälters, der kontinuierlich mit Wasser gefüllt wird. Dieser entleert sich schlagartig, wenn der Wasserstand einen bestimmten Pegel überschritten hat.

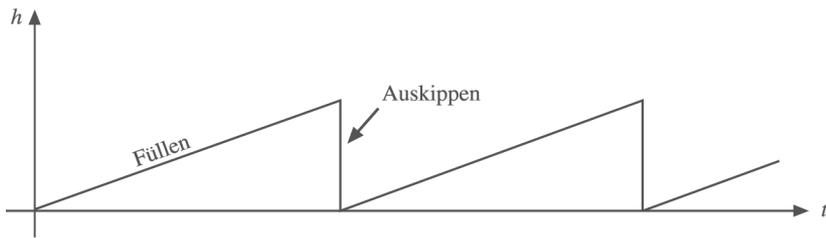


Abb. 4.28 Sägezahnprofil des zeitlichen Verlaufes der Auslenkung einer Kippschwingung.

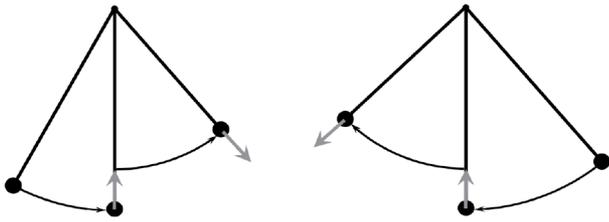


Abb. 4.29 Mathematisches Pendel, bei dem in der Gleichgewichtslage die Fadenlänge verkürzt wird. In den Umkehrpunkten wird diese Verkürzung wieder rückgängig gemacht.

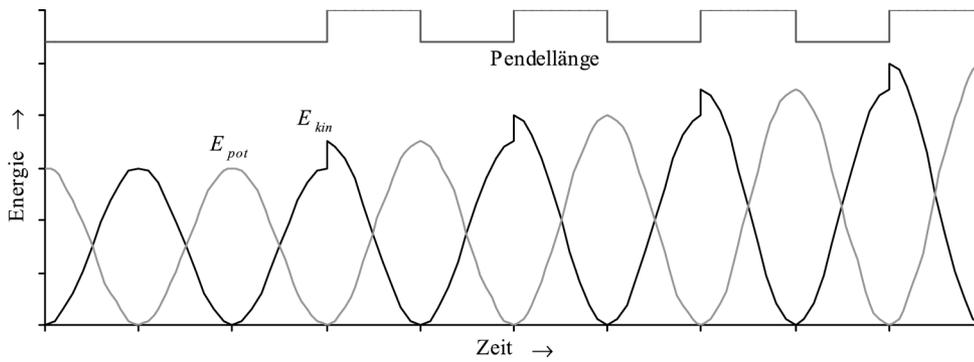


Abb. 4.30 Verlauf der potentiellen und kinetischen Energie eines mathematischen Pendels, dem wie in **Abb. 4.29** in der Gleichgewichtslage Energie zugeführt wird.

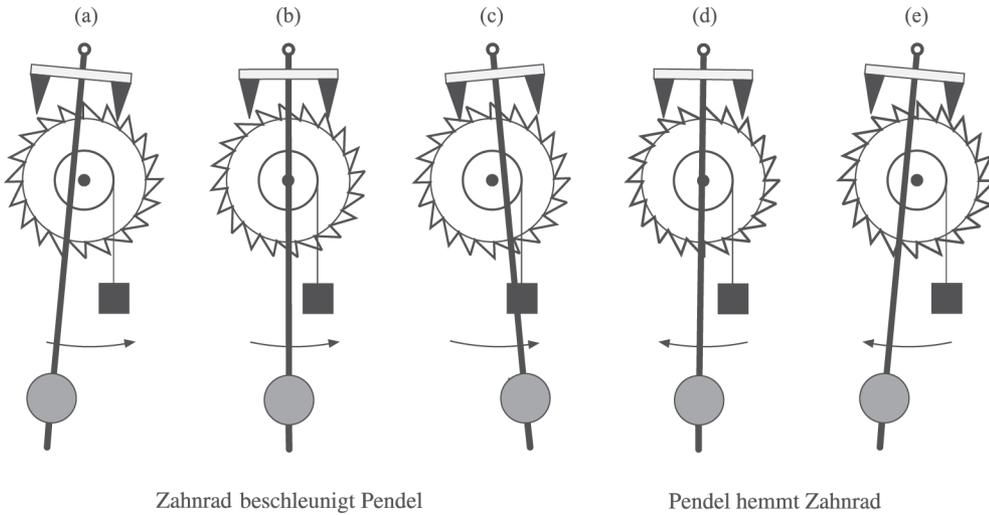


Abb. 4.31 Selbsterregte Schwingung einer Pendeluhr. (a) ... (c): Das von dem Gewicht angetriebene Zahnrad drückt gegen den Anker und beschleunigt das Pendel. (d), (e): Beim Zurückschwingen hemmt der Anker das Zahnrad an der Weiterbewegung.

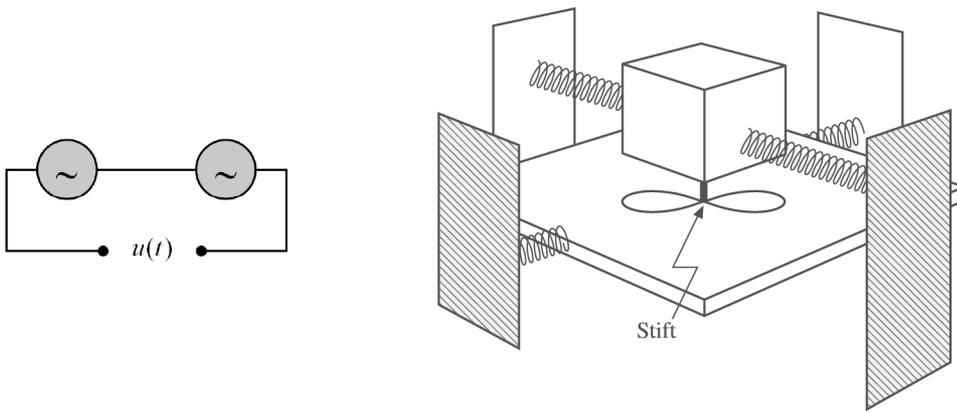
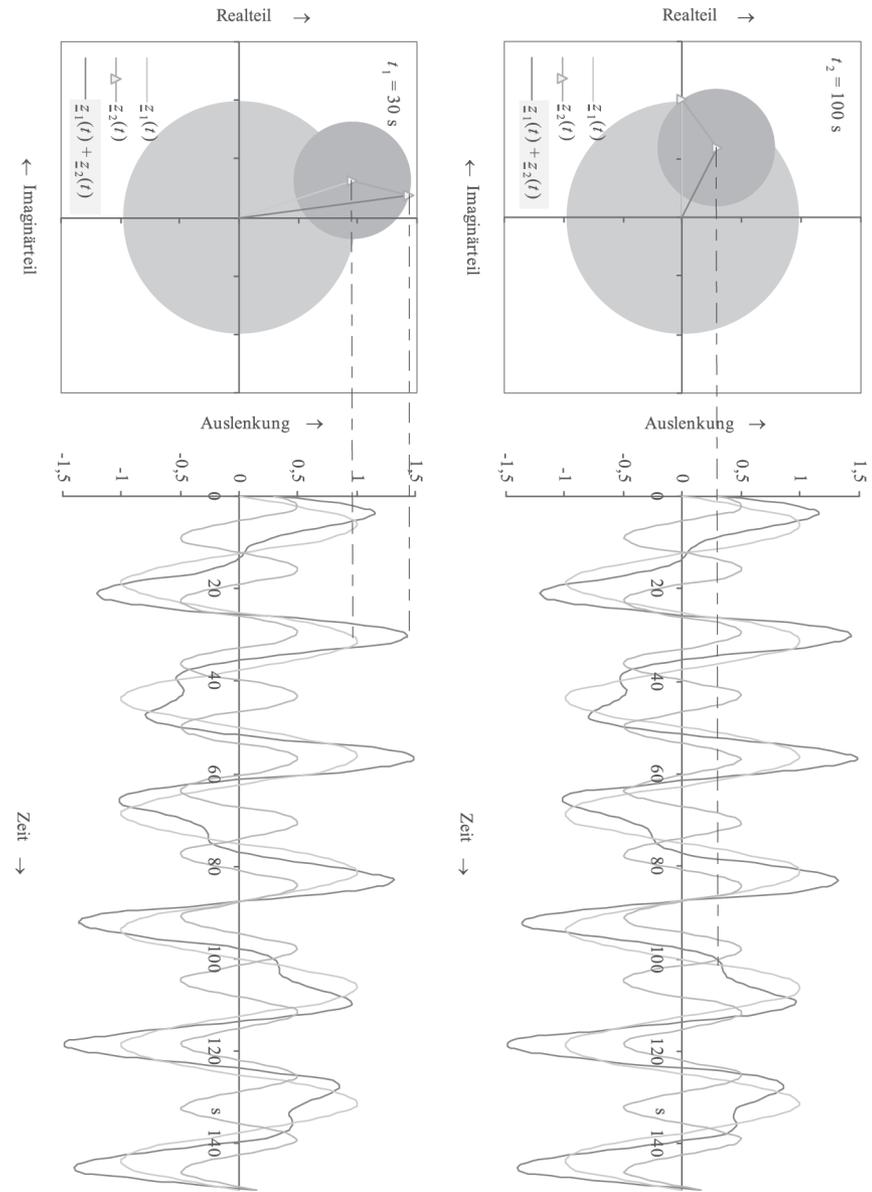


Abb. 4.32 Beispiele eindimensionaler und zweidimensionaler Überlagerung von Schwingungen.

Abb. 4.33 Überlagerung zweier harmonischer Schwingungen mit unterschiedlichen Amplituden und unterschiedlichen Frequenzen. Stellung der Zeiger von den Einzelschwingungen und deren Summe zu zwei verschiedenen Zeitpunkten sowie zeitlicher Verlauf der Auslenkungen.



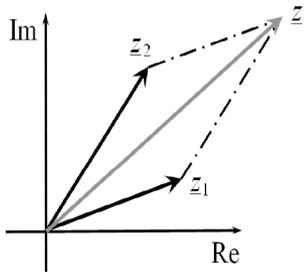


Abb. 4.34 Überlagerung von zwei harmonischen Schwingungen gleicher Frequenz: Die Zeiger der Einzelschwingungen schließen in der komplexen Ebene einen festen Winkel ein. Die Winkelgeschwindigkeiten von Einzelschwingungen und Summe sind gleich.

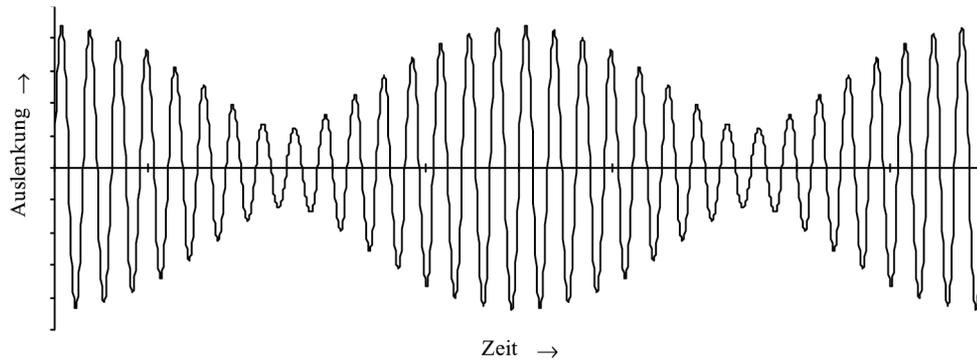


Abb. 4.35 Überlagerung von zwei Schwingungen fast gleicher Frequenz, aber unterschiedlichen Amplituden.

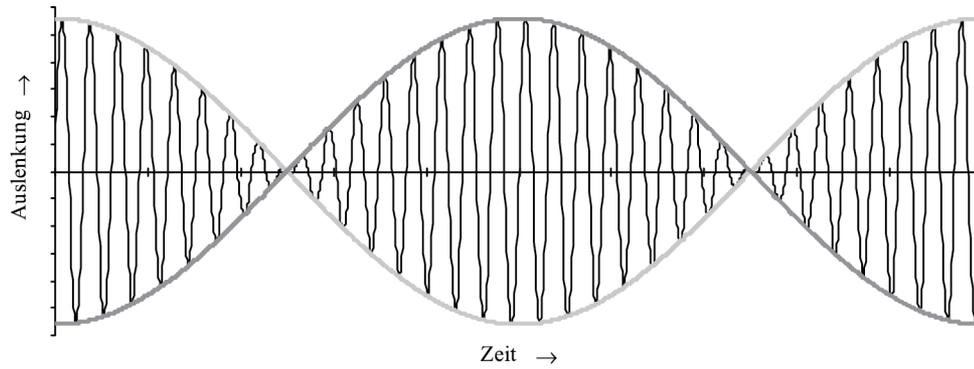


Abb. 4.36 Überlagerung von zwei Schwingungen fast gleicher Frequenzen aber gleicher Amplituden.

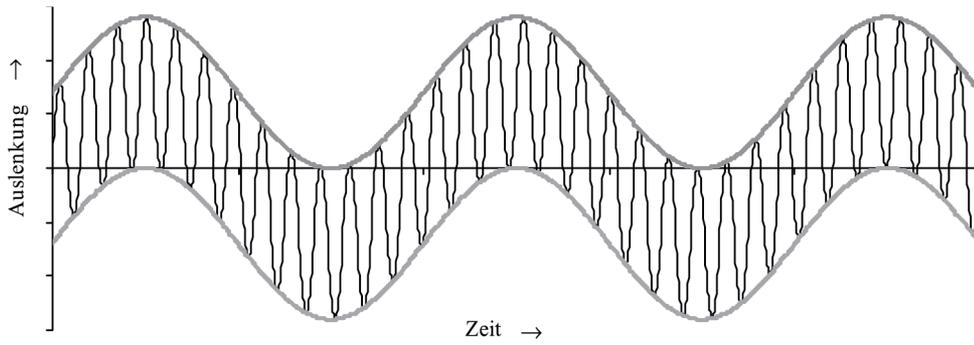


Abb. 4.37 Überlagerung von zwei Schwingungen mit sehr unterschiedlichen Frequenzen.

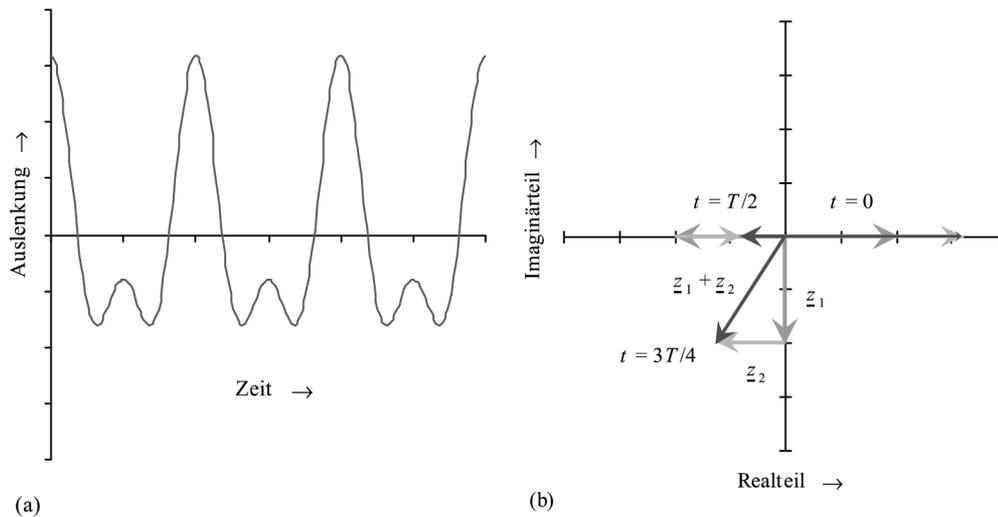


Abb. 4.38 Überlagerung zweier Schwingungen, Frequenzverhältnis 2:1, Amplitudenverhältnis 0,6:1. (a) Die resultierende Auslenkung hat die Periodendauer $T = T_1$ der niederfrequenten Schwingung. (b) Darstellung der Zeiger bei $t = 0, T/2$ und $3T/4$.

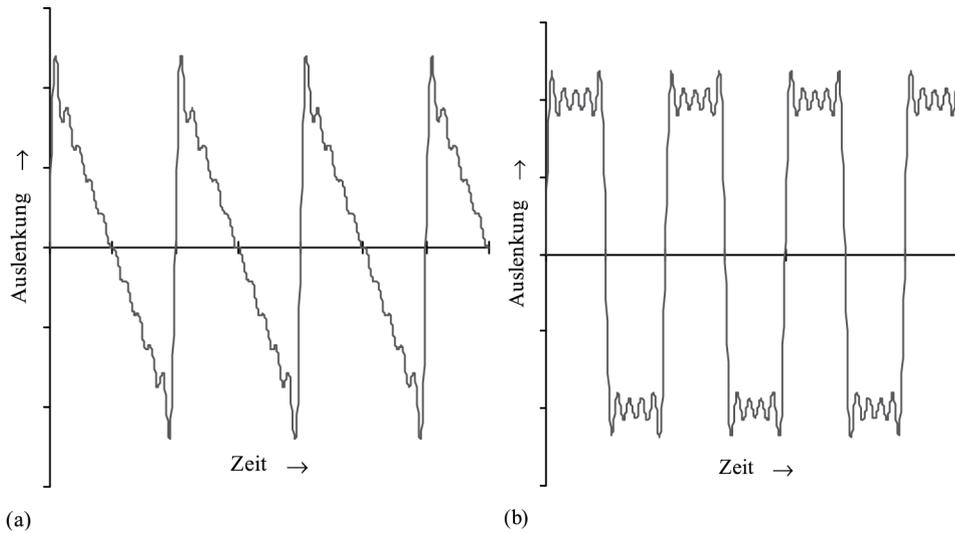


Abb. 4.39 Annäherung einer (a) Sägezahn- und einer (b) Rechteckschwingung durch die Überlagerung von 10 harmonischen Schwingungen.

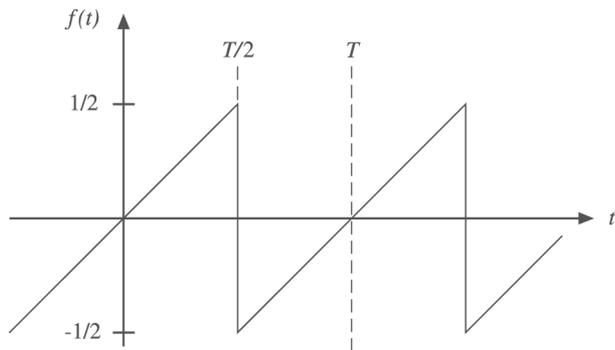


Abb. 4.40 Zeitlicher Verlauf der Sägezahnsschwingung aus (4.155), periodisch über die Intervallgrenzen fortgesetzt.

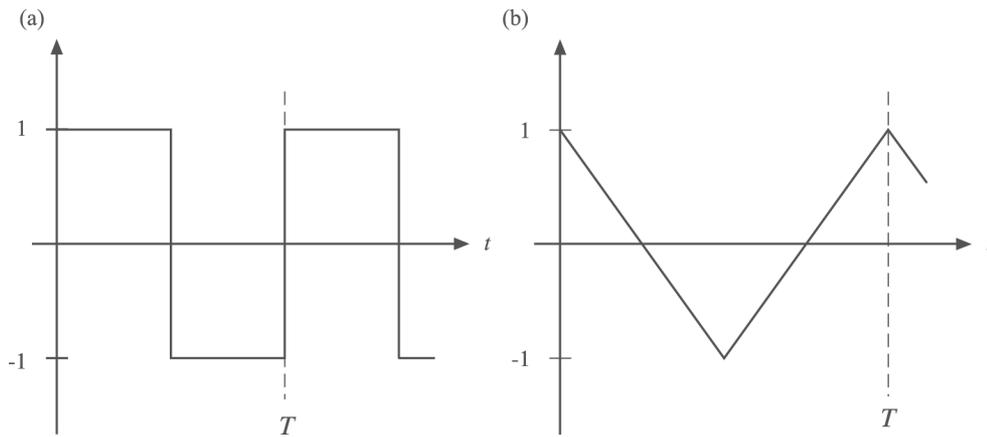


Abb. 4.41 (a) Rechteckschwingung, (b) Dreieckschwingung.

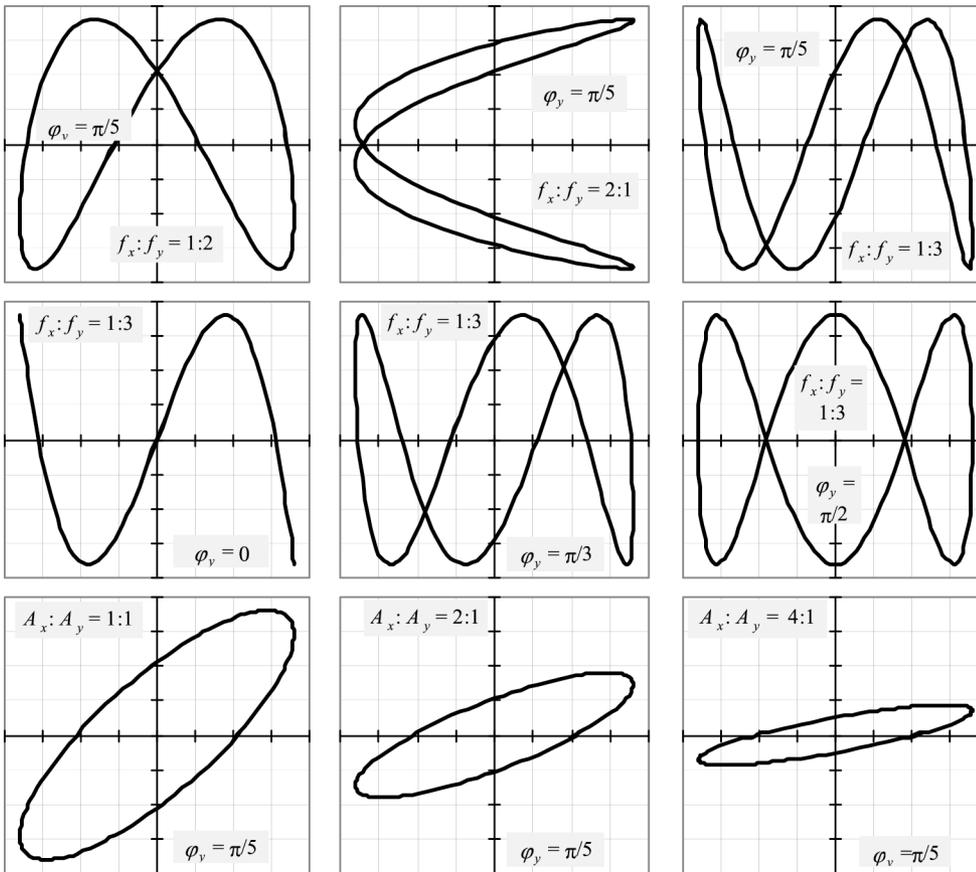


Abb. 4.42 Lissajous-Figuren für verschiedene Amplituden- und Frequenzverhältnisse sowie Differenzen der Nullphasenwinkel: (obere Reihe) gleiche Amplituden, gleiche Phasendifferenzen, unterschiedliche Frequenzen; (mittlere Reihe) gleiche Amplituden, gleiches Frequenzverhältnis, unterschiedliche Phasendifferenzen; (untere Reihe) gleiches Frequenzverhältnis, gleiche Phasendifferenzen, unterschiedliche Amplituden.

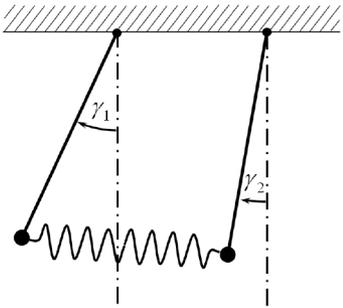


Abb. 4.43 Über eine Feder gekoppelte Pendel, die in einer Ebene schwingen.

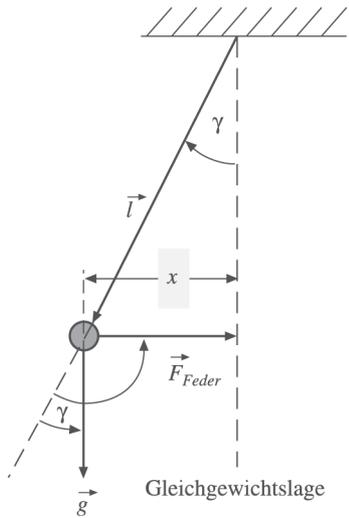


Abb. 4.44 Kräfte, die auf eines der Pendel wirken.

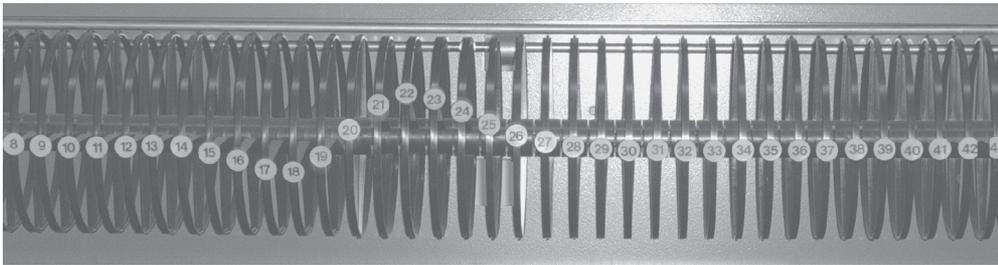


Abb. 4.45 Ausbreitung einer Welle in einem System gekoppelter Oszillatoren.



Abb. 4.46 Transversale und longitudinale Wellen.

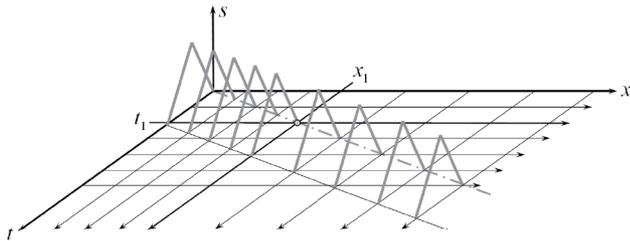


Abb. 4.47 Zeitliche Verschiebung des Verlaufes der Auslenkung im Anregungszentrum der Welle und an verschiedenen Punkten im Medium.

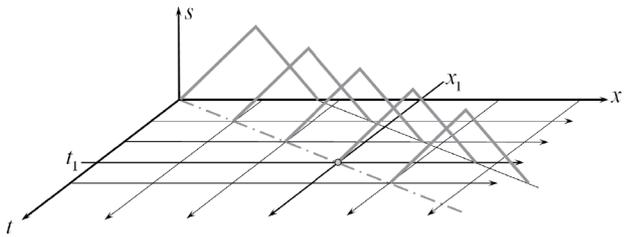


Abb. 4.48 Verschiebung des Wellenprofils bei der Ausbreitung der Welle.

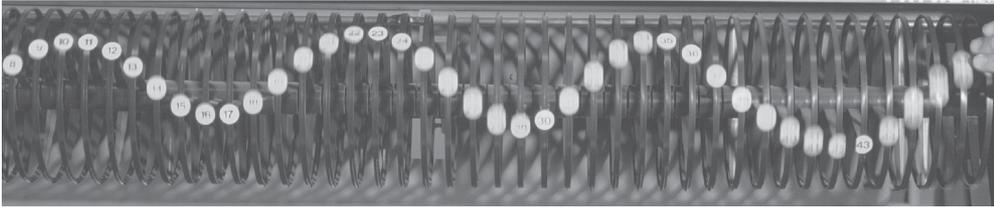


Abb. 4.49 Harmonische Welle.

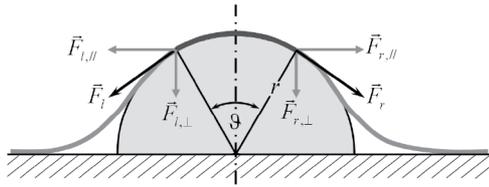


Abb. 4.50 Ein Wellenberg bewegt sich auf einem gespannten Seil. Sein Profil wird durch einen Kreisbogen mit dem Öffnungswinkel ϑ beschrieben.

Welle	Ausbreitungsgeschwindigkeit	Einflussgrößen
Seilwelle (transversal)	$c = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$	ρ : Dichte des Seils σ : Seilspannung (4.210)
Schallwelle in Gasen (longitudinal)	$c = \sqrt{\frac{\kappa P}{\rho}}$	ρ : Dichte des Gases κ : Adiabatenexponent P : mittlerer Druck (4.212)
Schallwelle in Flüssigkeiten (longitudinal)	$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$	K : Kompressionsmodul ρ : Dichte der Flüssigkeit (4.213)
Schallwelle in dünnen Stäben (longitudinal)	$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	E : Elastizitätsmodul ρ : Dichte des Stabes (4.214)
Elektromagnetische Welle im Vakuum (transversal)	$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}}$	μ_0 : absolute Permeabilität ϵ_0 : absolute Dielektrizitätskonstante (4.215)
Elektromagnetische Welle im Nichtleiter (transversal)	$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}}$	μ_r : relative Permeabilität ϵ_r : relative Dielektrizitätskonstante (4.216)
Elektromagnetische Welle im Leiter (Zweidraht)	$c = \sqrt{\frac{1}{(C/l)(L/l)}}$	C/l : Kapazitätsbelag L/l : Induktivitätsbelag (4.217)

Tab. 4.1 Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen in unterschiedlichen Medien.

Welle	Einflussgrößen	c in m/s
Seilwelle, Gitarrensaite, Stahl, 440 Hz	$\rho = 8 \text{ g/cm}^3$ $\sigma = 2,6 \text{ kN/mm}^2$	572
Schallwelle in Luft	$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3 @ 20^\circ\text{C}$ $\kappa = 1,4$ $P = 1013 \text{ hPa}$	343
Schallwelle in Wasser	$K = 2,2 \text{ GPa}$ $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$	1483
Schallwelle im Stahlstab	$E = 200 \text{ GPa}$ $\rho = 8 \text{ g/cm}^3$	5000
Elektromagnetische Welle im Vakuum	$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$ $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$	$2,997 \cdot 10^8$
Elektromagnetische Welle in Glas	$\mu_r = 1$ $\epsilon_r = 1,25$	$2,398 \cdot 10^8$
Elektromagnetische Welle im Zweidraht	$C/l = 4 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$ $L/l = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ Drahtabstand = Drahtdurchmesser	$2,203 \cdot 10^8$

Tab. 4.2 Ausbreitungsgeschwindigkeiten bei „typischen“ Werten der Einflussgrößen in verschiedenen Medien.

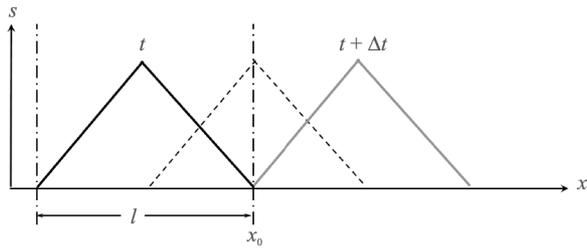


Abb. 4.51 Ausbreitung eines Wellenberges: Die Zone des Mediums mit potentieller Energie bewegt sich.

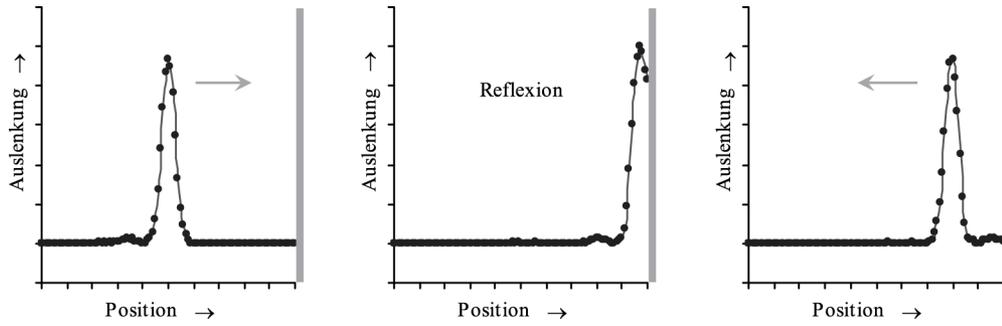


Abb. 4.52 Reflexion am losen Ende.

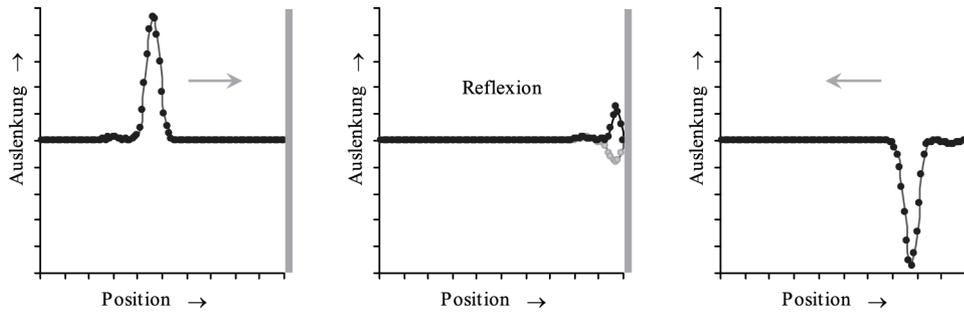


Abb. 4.53 Reflexion am festen Ende.

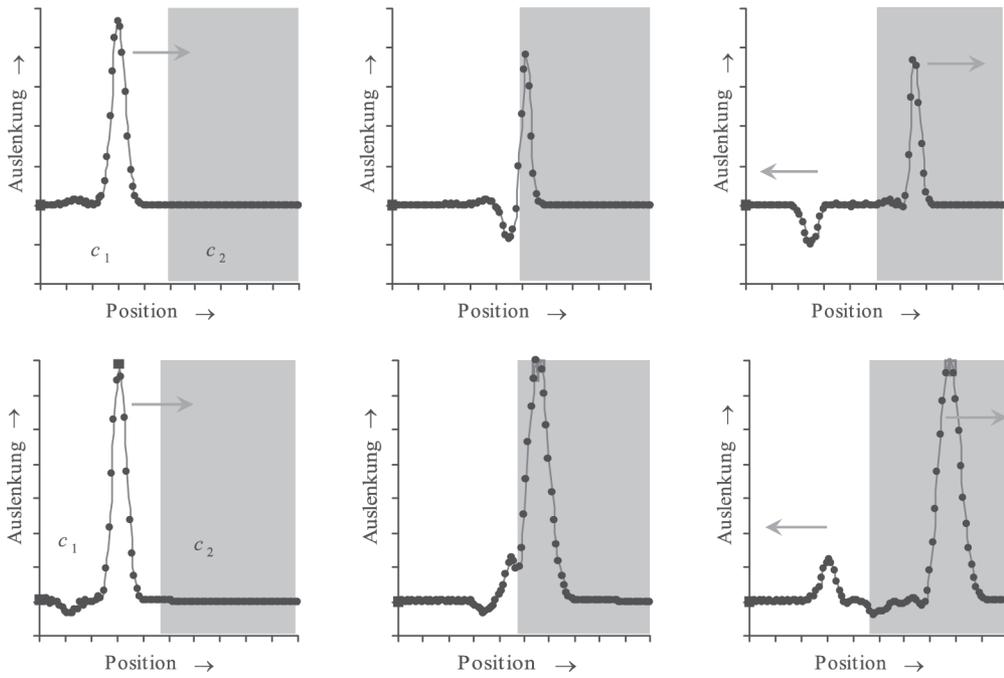


Abb. 4.54 Welle tritt über die Grenze zweier Medien, (oben) $c_1 < c_2$, (unten) $c_1 > c_2$.

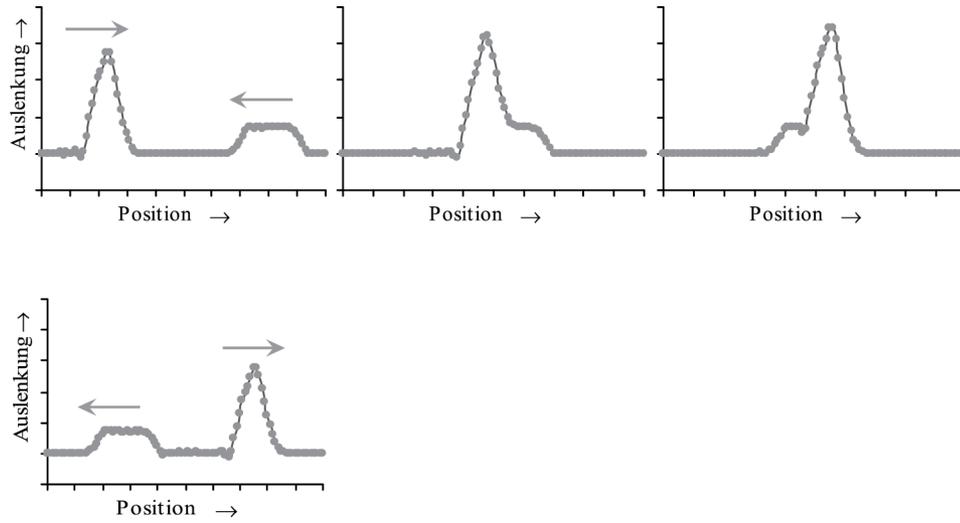


Abb. 4.55 Konstruktive Interferenz.

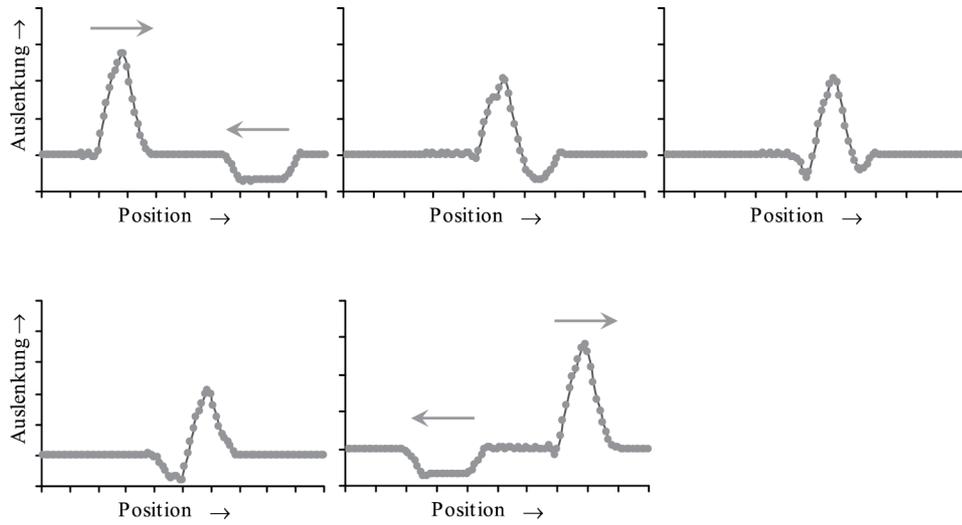


Abb. 4.56 Destruktive Interferenz.

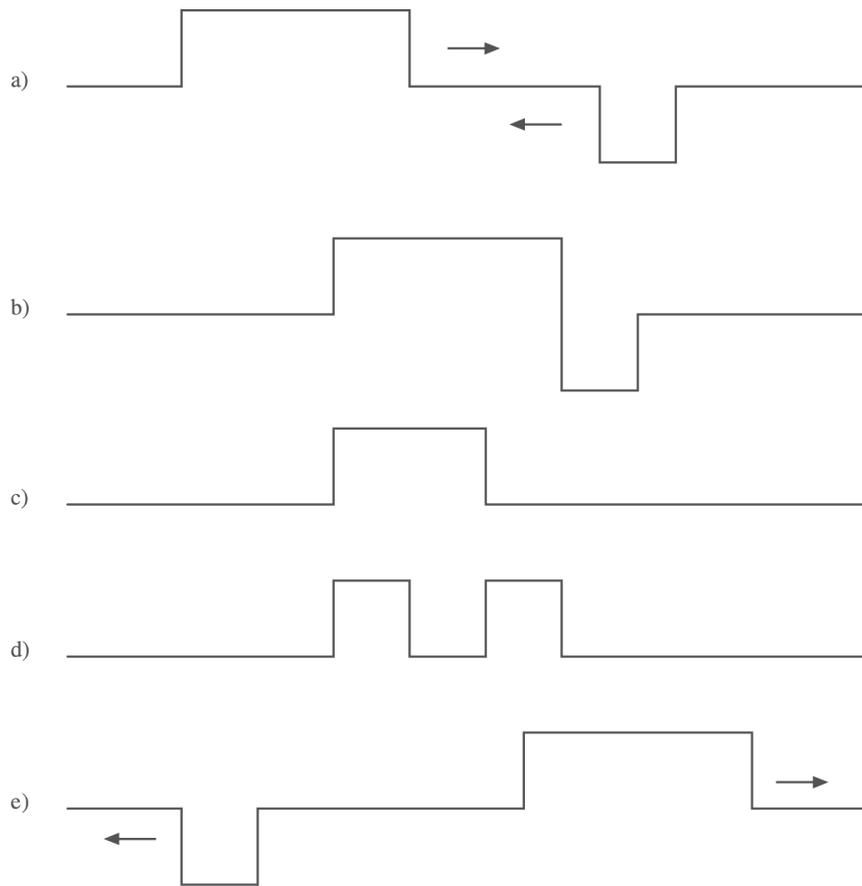


Abb. 4.57 Vollständige Auslöschung bei symmetrischen Wellenbergen und Wellentälern.

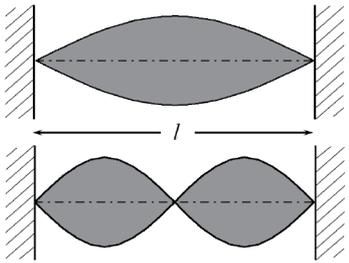


Abb. 4.58 Grund- und Oberschwingungen einer an ihren Enden eingespannten Saite.

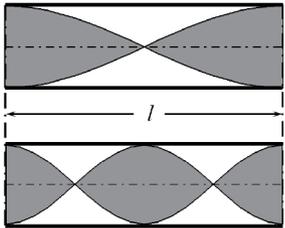


Abb. 4.59 Grund- und Oberschwingung eines Mediums mit zwei losen Enden, von denen eines das Anregungszentrum ist.

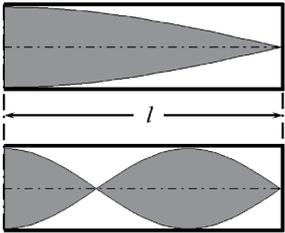


Abb. 4.60 Grund- und Oberschwingungen eines Mediums mit einem festen und einem losen Ende.

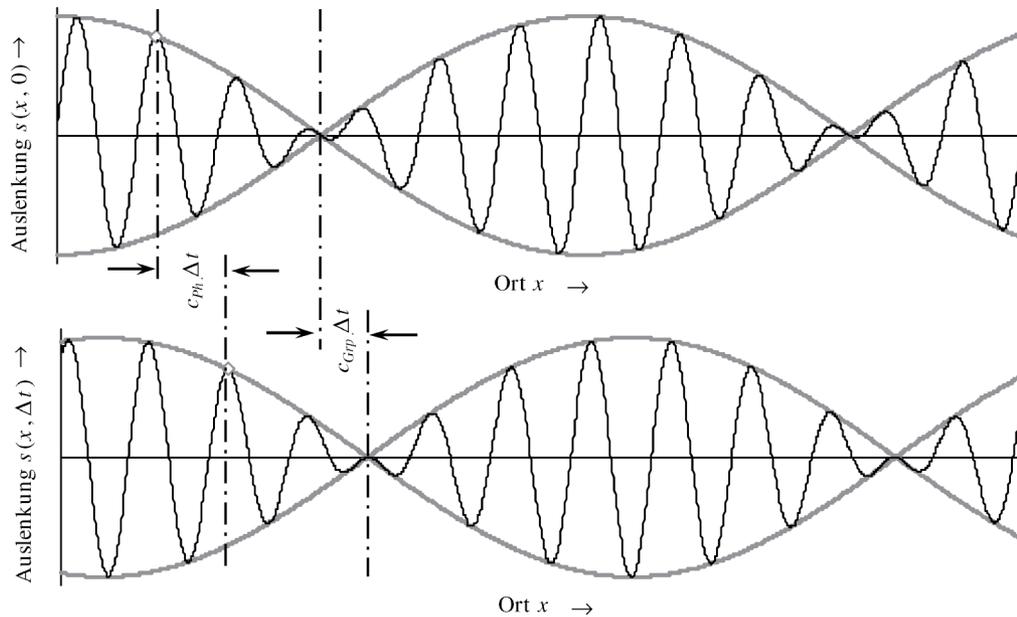


Abb. 4.61 Resultierende Welle aus der Überlagerung zweier harmonischer Wellen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten. Der örtliche Verlauf entspricht dem einer Schwebung. Die Welle breitet sich mit der Phasengeschwindigkeit, die Modulation der Welle mit der Gruppengeschwindigkeit aus. Oben: Welle zum Zeitpunkt $t = 0$, unten zum Zeitpunkt Δt .

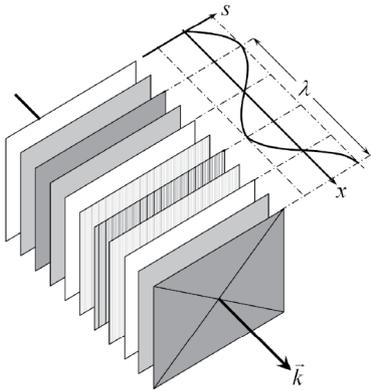


Abb. 4.62 Ebene Welle. Die Wellenfronten sind parallele Ebenen. Hier sind Ebenen mit gleicher Auslenkung mit der gleichen Schattierung gekennzeichnet.

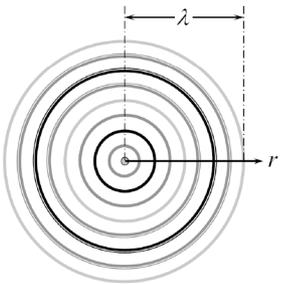


Abb. 4.63 Kugelwelle, emittiert von einem punktförmigen Anregungszentrum. Der Wellenvektor verläuft radial.

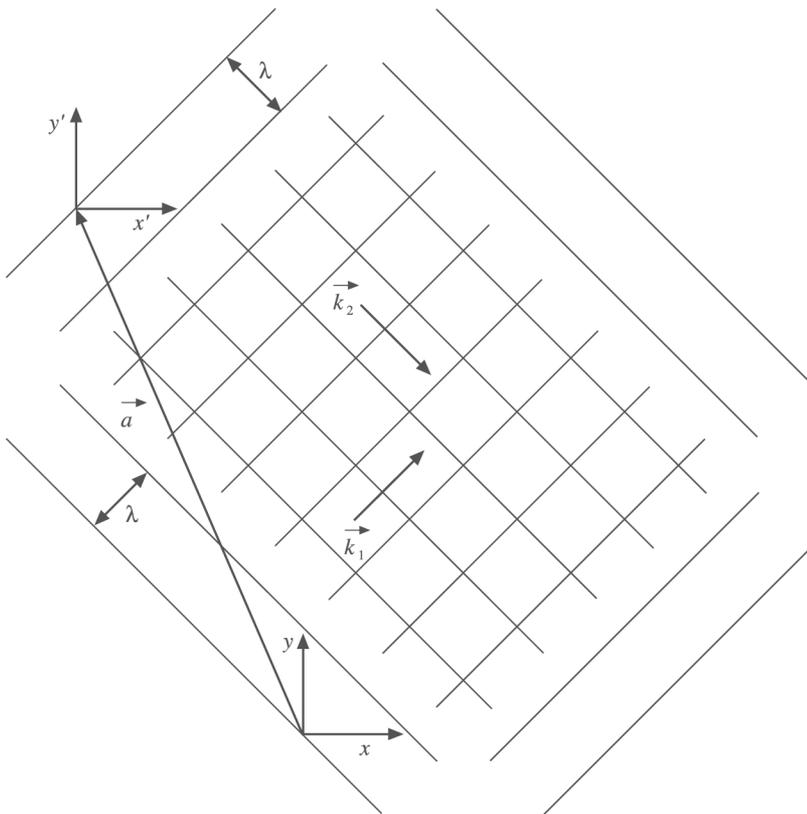


Abb. 4.64 Zwei ebene Wellen interferieren.

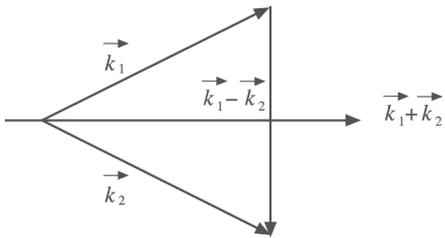


Abb. 4.65 Richtungen der Wellenvektoren zweier sich überlagernder ebener Wellen.

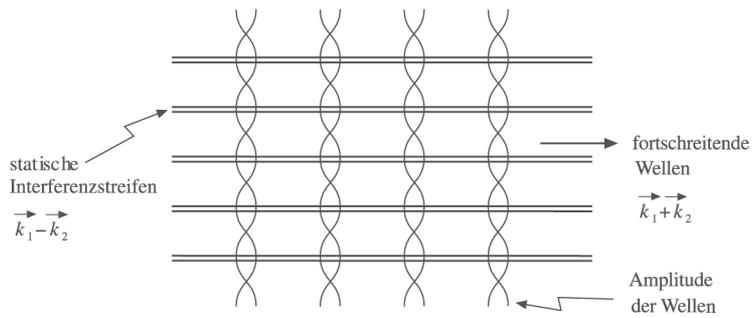


Abb. 4.66 Interferenzstreifen, die sich aus der Überlagerung zweier ebener Wellen ergeben. Verdickungen entsprechen den Auslenkungsmaxima der resultierenden Welle.

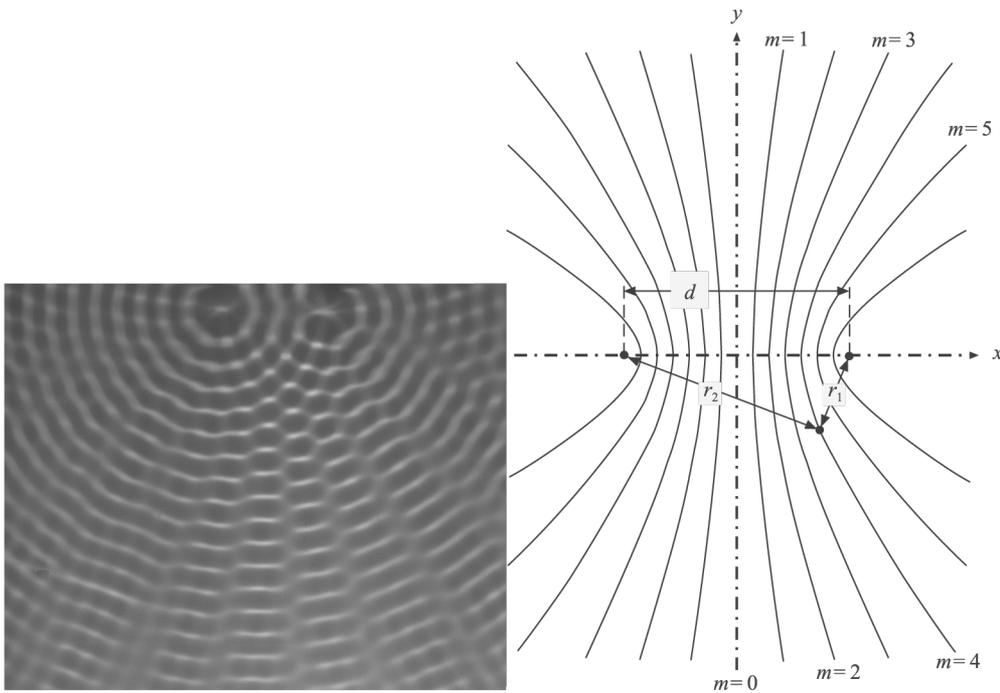


Abb. 4.67 Überlagerung von zwei Kreiswellen bzw. von zwei Kugelwellen.

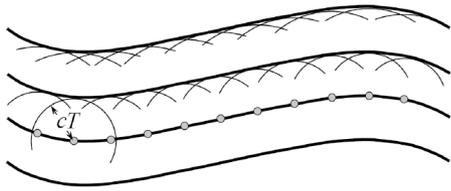


Abb. 4.68 Wellenfront, die sich aus der konstruktiven Interferenz der Elementarwellen der Wellenfront eines früheren Zeitpunktes ergibt.

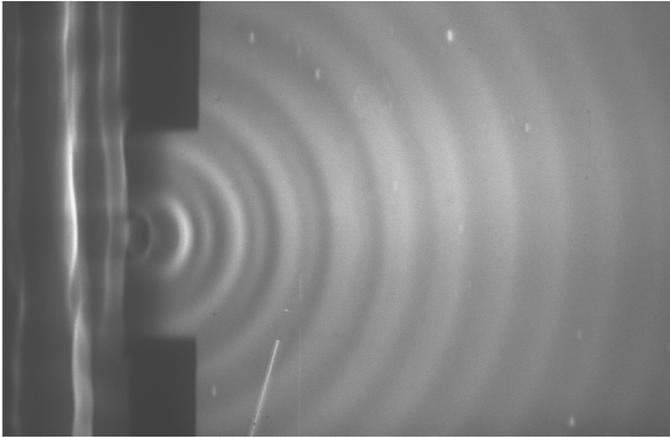


Abb. 4.69 Eine ebene Welle trifft auf eine enge Öffnung in einem Hindernis. Bildung einer Elementarwelle.

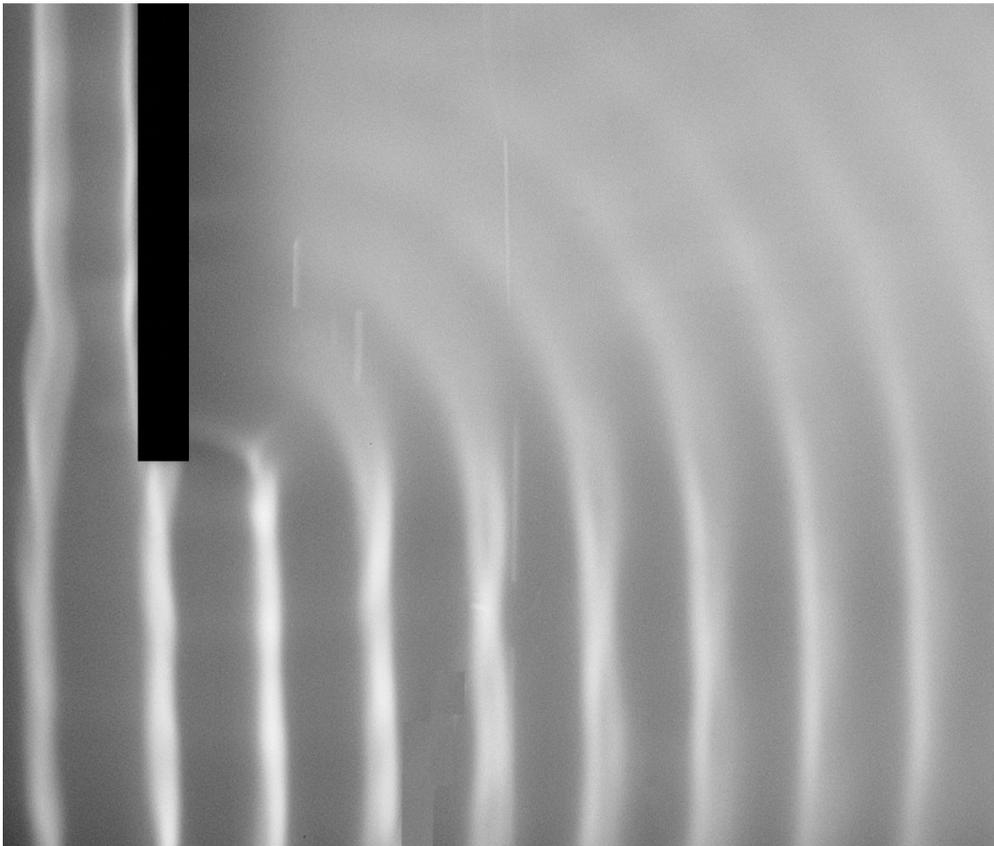
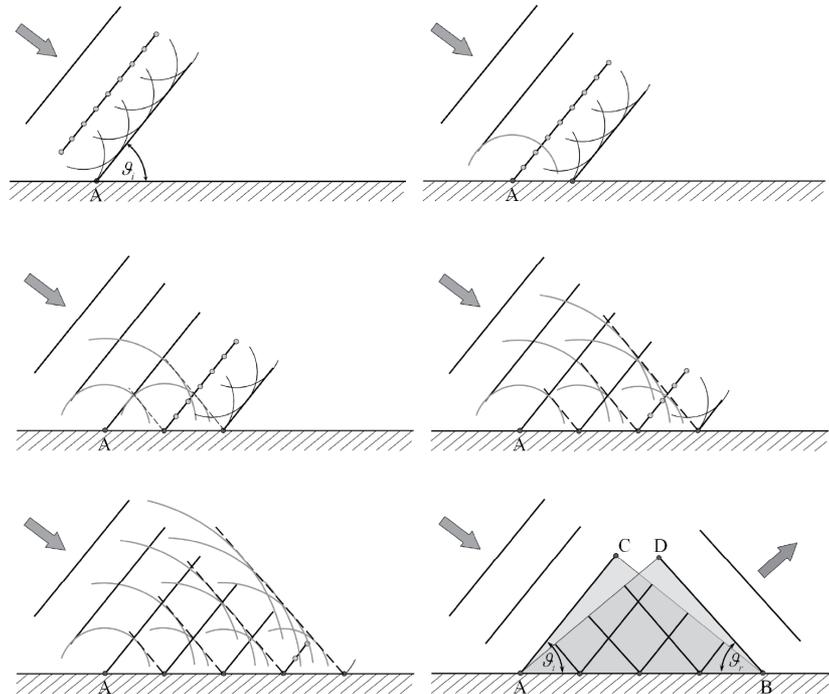
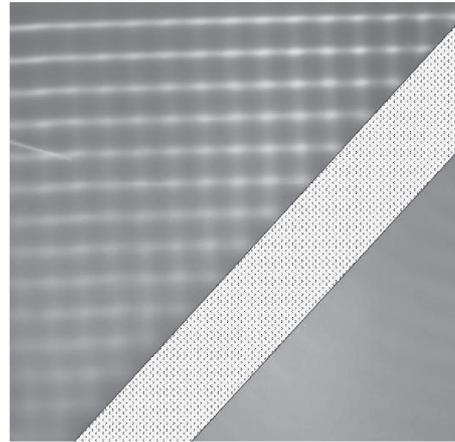


Abb. 4.70 Wellenausbreitung in einem Medium, das halbseitig durch ein Hindernis getrennt wird.

Abb. 4.71 Reflexion einer ebenen Welle an einem ebenen Hindernis.



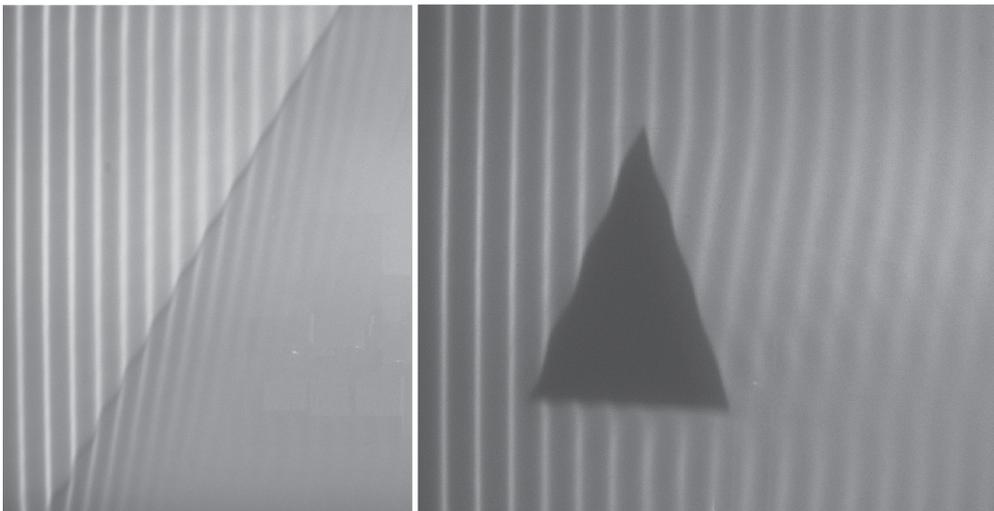
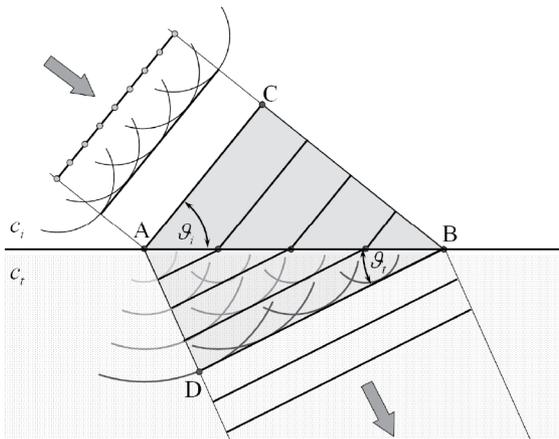
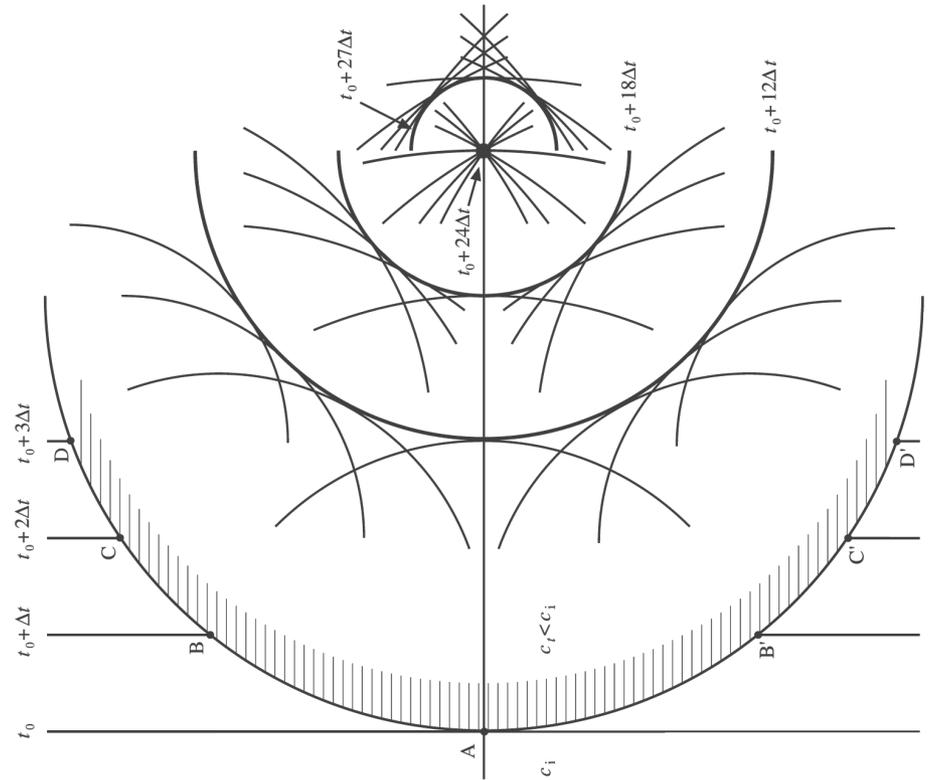
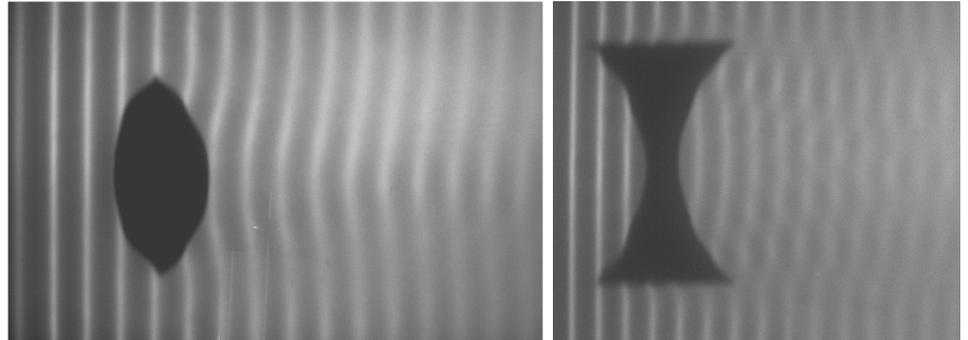


Abb. 4.72 Brechung einer ebenen Welle an einer ebenen Grenzfläche zweier Medien.

Abb. 4.73 Ebene Welle wird an einer sphärischen Grenzfläche gebrochen.



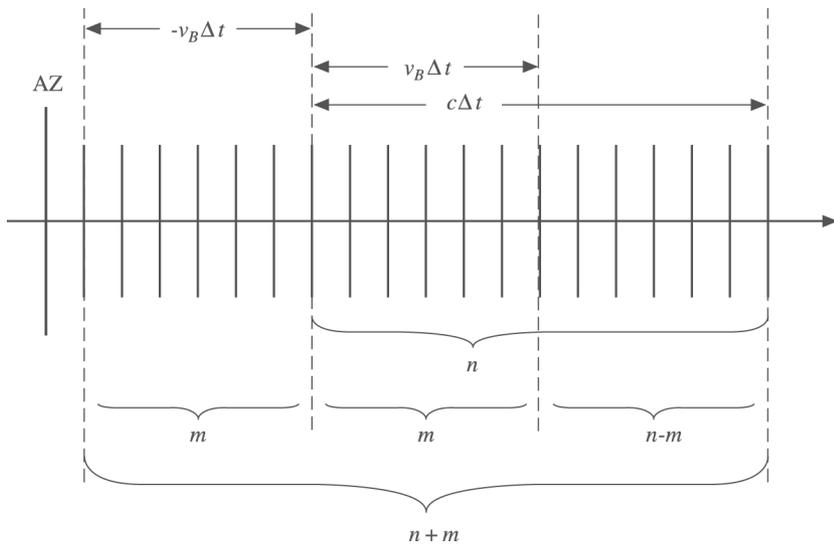


Abb. 4.74 Der Beobachter bewegt sich relativ zum Medium, das Anregungszentrum ruht.

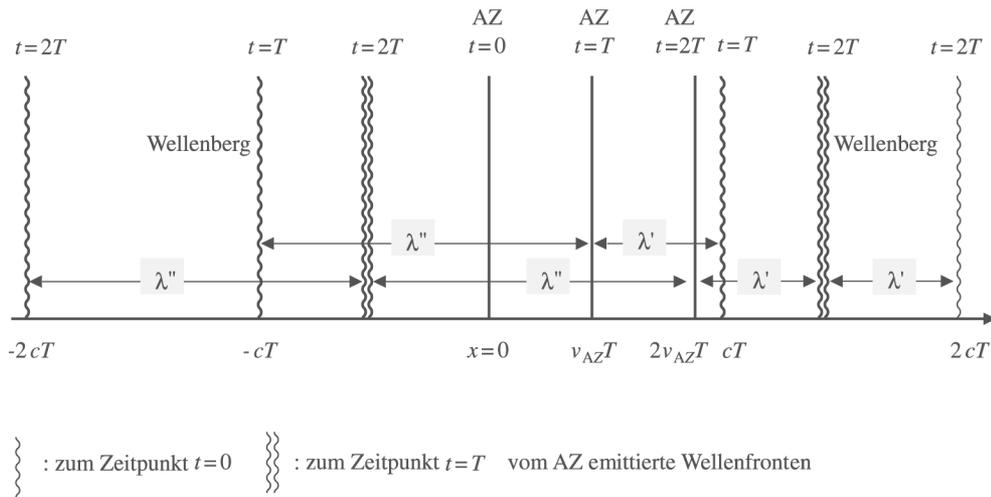


Abb. 4.75 Veränderung der Wellenlänge bei bewegtem Anregungszentrum.

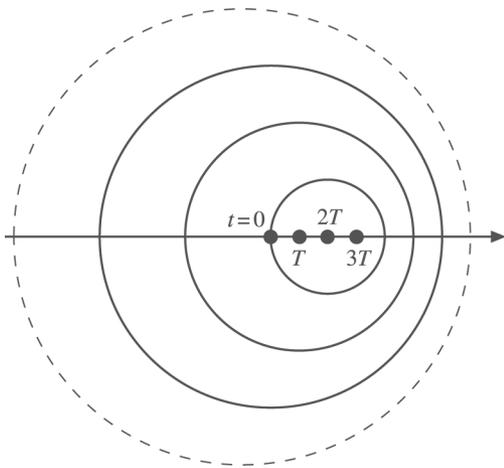


Abb. 4.76 Wellenfeld eines bewegten punktförmigen Anregungszentrums nach fünf Schwingungsperioden, das zum Zeitpunkt $t = 0$ ein Schwingungsmaximum hatte.

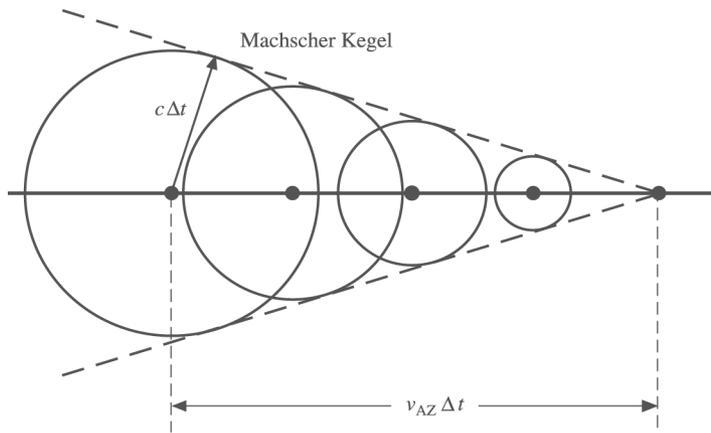


Abb. 4.77 Bewegt sich das Anregungszentrum schneller als die Ausbreitungsgeschwindigkeit, so hat das Wellenfeld die Gestalt des „Machschen Kegels“.