

Formelheft Physik

Daniel Winz

8. Februar 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Bewegungsgeschwindigkeit	7
2	Die momentane Geschwindigkeit	7
3	Die beschleunigte Bewegung	7
3.1	Berechnung des zurückgelegten Weges bei einer beschleunigten Bewegung	9
4	Freier Fall	10
5	Bewegungen mit nichtkonstanter Beschleunigung	10
6	Der Horizontale Wurf	11
6.1	Bestimmung der Wurfweite W	11
7	Der Vektor	11
7.1	Vektoroperationen	12
7.2	Addition zweier Vektoren mit einem gemeinsamen Angriffspunkt	12
7.2.1	Lösungsvorgehen	12
8	Der senkrechte Wurf nach oben	13
9	Der schiefe Wurf	13
9.1	Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors im allgemeinen Fall . .	14
10	Reibung fester Körper	15
10.1	Einflussgrößen auf die Reibkraft	15
11	Kräfte bei der schiefen Ebene	16
12	Newton'sche Prinzipien	16
13	Aktionsprinzip	17
13.1	Erweiterte Einheiten	19
14	Reaktionsprinzip	19
15	Trägheitsprinzip	19
15.1	Die Trägheitskraft	20
16	Antriebstechnik	20
16.1	Auto:	20
16.2	Schiff:	21
16.3	Flugzeug:	21
16.3.1	Kernstrahljet:	22
16.3.2	Mantelstromtriebwerk:	23

17 Was ist Energie?	23
17.1 Katalog einiger Elementararbeiten	24
18 Arbeit	25
19 Leistung	25
20 Energieumwandlung in freien Fall	25
21 Die Feder als Energiespeicher	26
21.1 Charakteristik einer Feder	26
21.1.1 Feder-Richtgrösse	26
22 Drehbewegung	27
22.1 gleichförmige Rotation	27
22.2 Winkelgeschwindigkeit	27
22.3 Drehzahl	27
22.4 Frequenz	27
22.5 Umlaufdauer	28
22.6 Zusammenfassung zwischen Winkelgeschwindigkeit und Frequenz	28
22.7 Bahngeschwindigkeit	28
22.8 gleichmässig beschleunigte Drehbewegung	29
22.9 Das Drehmoment	29
22.10 Aktionsprinzip der Drehbewegung	30
22.11 Die erzwungene Drehachse	30
22.12 Energie, Arbeit, Leistung bei Drehbewegung	31
22.13 Die innere Energie eines Drehsystems	32
22.14 Zentralbewegung	33
22.15 Der Drall	34
22.16 Unwucht	34
23 Gravitation	35
24 Der Schweredruck und der Gesamtdruck	35
24.1 Hydrostatisches Paradoxon	36
25 Mechanik der Flüssigkeiten und Gase (Fluidik)	36
25.1 Hydrostatik (Verhalten der ruhenden Flüssigkeit)	36
25.1.1 Gebräuchliche Einheiten	36
25.2 Kompressibilität	37
25.3 Druckfortpflanzung	37
25.4 Verbundene Gefässe	38
25.5 Druckmessenrichtungen	39
25.6 Der Auftrieb (Der Archimedische Auftrieb)	40
25.6.1 Untersuchung des Schweredruckes an einem eingetauchten Körper	40
25.6.2 Satz von Archimedes	41

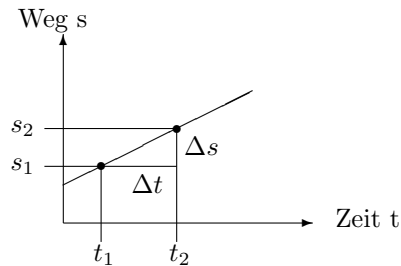
25.7 Die Kapillarität	41
25.8 Osmoseeffekt	42
26 Aerostatik(Verhalten der ruhenden Gase)	42
26.1 Gasdruck	42
26.2 Zustandsänderungen von Gasen	42
26.3 Gasdichte	43
26.3.1 Temperatur, Druck	44
26.4 Der Luftdruck	44
27 Hydro - und Aerodynamik	45
27.1 Verhalten der bewegten Flüssigkeiten und Gase	45
27.1.1 Darstellung einer Strömung	45
27.2 Strömungsarten	45
27.3 Kontinuitätsgleichung	45
27.4 Der Staudruck	46
27.5 Fahrwiderstand	47
27.6 Die Tropfenform	48
27.7 Optimierte Fahrzeuge	48
27.8 Der statische Druck	48
27.8.1 Satz von Bernoulli	49
27.9 Dynamischer Auftrieb	51
27.10 Situation an einem Tragflügel eines Flugzeuges	52
27.11 Statischer- und Staudruck zur Geschwindigkeitsmessung	52
27.11.1 Der Staudruckmesser als Geschwindigkeitsmesser	53
27.12 Kavitation	53
28 Statik	53
28.1 Kräfte im Seil	53
28.2 Das gespannte Seil	54
28.3 Seile und Rollen	54
28.4 Kräfte am Rollenlager	54
28.5 Allgemeiner Flaschenzug	55
28.6 Momentensatz	56
28.7 Kräfte an einem Hebel	57
28.8 Katalog der typischen Momentsatzaufgaben	57
29 Wärmelehre	59
29.1 Einleitung	59
29.2 Temperatur	60
29.2.1 Festlegung der Temperaturskala	60
29.3 Thermische Ausdehnung	61
29.3.1 die lineare Ausdehnung eines Stabes	61
29.3.2 Flächenausdehnung	62
29.3.3 Volumenausdehnung	63
29.4 Dichteveränderung	63

29.5	Anomalie des Wassers	64
29.6	Dichtesprung beim Erstarren von Wasser	64
29.7	1. Hauptsatz der Wärmelehre	64
29.8	Wärmeenergie	65
29.9	Wärmekapazität C	65
29.10	Heizwert	66
29.11	Heizwert	66
29.12	Aggregatzustände	66
29.13	Verdunsten	68
29.14	Relative Feuchte im Wohnzimmer	69
29.15	Folgen des Dampfes in verschiedenen Bereichen	69
29.15.1	Baubereich	69
29.15.2	Wetter	70
29.15.3	Gasbehälter	71
29.15.4	Kältemaschine (Wärmepumpe)	71
29.15.5	Trocknungsprozess	72
29.16	Wärmeausbreitung	72
29.16.1	Wärmeleitung	72
29.16.2	Ohmsches Gesetz der Wärmelehre für Elektroniker	73
29.16.3	Konvektion	74
29.16.4	Wärmestrahlung	75
29.16.5	Strahlungsabsorbtion	76
29.17	Temperaturmessung	76
29.17.1	Flüssigkeitsthermometer	76
29.17.2	Metallausdehnungsthermometer	77
29.17.3	Widerstandsthermometer	77
29.17.4	Diodenthermometer	78
29.17.5	Thermoelement	79
29.17.6	Gasdruck und Dampfdruckthermometer	80
30	Mechanische Schwingungen	80
30.1	Eigenschaften der Schwinger	80
30.2	Die innere Energie der vier Grundschringer	81
30.3	Daten der Schwinger	82
30.4	Erzwungene Schwingung	82
30.5	Einschwingzeit	83
31	Wellen	83
31.1	Schwingermodell reduziert auf eine Dimension	83
31.2	Überlagerung von Schwingungen (Superposition)	84
31.3	Dopplereffekt	85
31.4	Fresnel-Huygensches Prinzip	87
31.5	Refraktion	88
31.6	Streuung	88
31.7	Reflektion	89
31.8	Der plane Spiegel	89

31.9 Der Spiegelraum	90
31.10 Die gekrümmte Spiegelfläche	90
31.11 Reflektionsarten	90

1 Bewegungsgeschwindigkeit

Die Steigung im Weg-Zeit-Diagramm ist die Geschwindigkeit. Sie besagt, wieviel Weg der Körper in einer bestimmten Zeit zurückgelegt hat.



$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$$\rightarrow v = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$$

Einheiten

$$v = \frac{s}{t} \left[\frac{m}{s} \right] SI$$

Gebräuchliche Einheiten

$$1 \frac{km}{h} = \frac{1000m}{3600s} = \frac{1}{3.6} \frac{m}{s} = 0.277 \frac{m}{s}$$

$$1kn = \frac{1sm}{1h} = \frac{1852}{3600} \frac{m}{s} = 0.514 \frac{m}{s}$$

$$1mach \cong 330 \frac{m}{s}$$

2 Die momentane Geschwindigkeit

Aus dem Weg-Zeit-Diagramm lässt sich durch die Ermittlung der Steigung in einer Bewegungsphase die momentane Geschwindigkeit finden.

$$v_{mo} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

3 Die beschleunigte Bewegung

In obigem Versuch startet das Auto aus dem Stillstand und wird dann auf die maximale Geschwindigkeit gebracht.

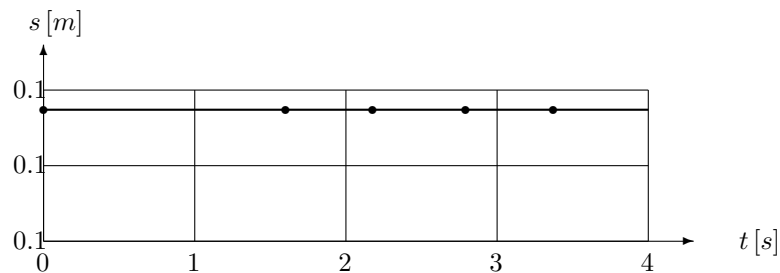
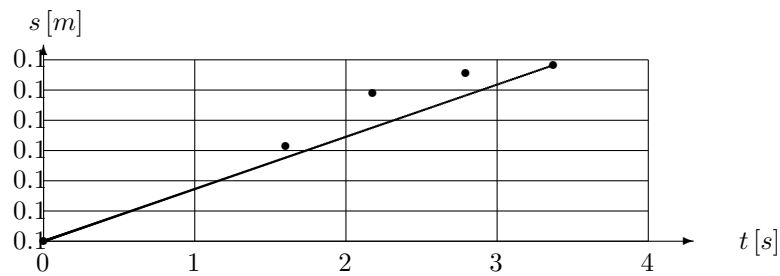
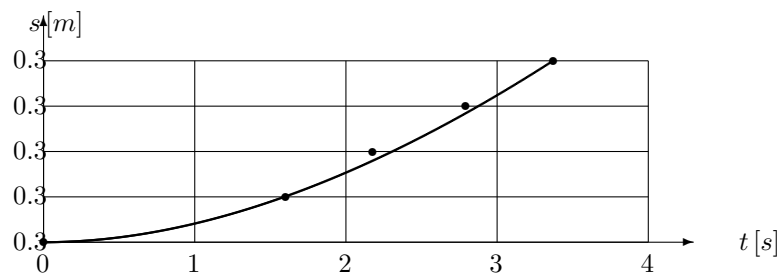
→ Die Geschwindigkeit verändert sich. Diesem Vorgang sagt man Beschleunigung.

Definition:

die Beschleunigung gibt an, wieviel sich die Geschwindigkeit verändert im Betrachtungsintervall.

$$\frac{\text{Geschwindigkeitsveränderung}}{\text{Zeitintervall}} = \text{Beschleunigung}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \left[\frac{m}{s} \cdot \frac{1}{s} = \frac{m}{s^2} \right]$$



Feststellung:

Das Weg-Zeit-Diagramm ist eine quadratische Funktion.

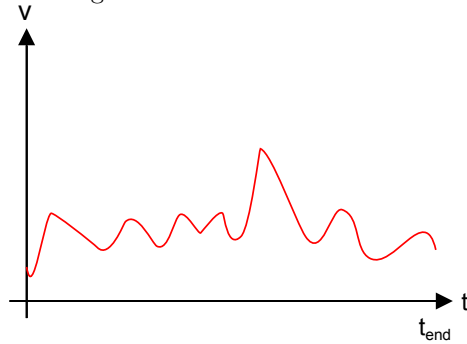
→ Parabolische Funktion

Das Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm ist eine lineare Funktion.

Das Beschleunigungs-Zeit-Diagramm ist eine konstante Funktion mit Sprungstelle.

3.1 Berechnung des zurückgelegten Weges bei einer beschleunigten Bewegung

Der zurückgelegte Weeg in einer Bewegung ist immer gleich gross, wie die Fläche im v-t-Diagramm.



$$s = A$$

$$A = \int_0^{t_{end}} (v \cdot dt)$$

Wenn die Beschleunigung gleichbleibend ist und die Geschwindigkeit beim Startzeitpunkt 0 ist, ist die Fläche ein Dreieck.

$$s = \frac{v_{end} \cdot t_{end}}{2}$$

Der Index $_{end}$ wird üblicherweise weggelassen.

$$\rightarrow s = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{v^2}{2a}$$

$$s = \frac{v \cdot t}{2} \cdot \frac{t}{t} = \frac{a \cdot t^2}{2}$$

Aus obigen Zusammenhängen ergibt sich eine Formelmatrix.

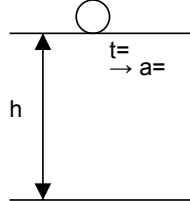
$$\begin{aligned}
s &= \frac{v \cdot t}{2} = \frac{v^2}{2 \cdot a} = \frac{a \cdot t^2}{2} \\
v &= \frac{2 \cdot s}{t} = \sqrt{2 \cdot a \cdot s} = a \cdot t \\
a &= \frac{v}{t} = \frac{v^2}{2 \cdot s} = \frac{2 \cdot s}{t^2} \\
t &= \frac{v}{a} = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} = \frac{2 \cdot s}{v}
\end{aligned}$$

Diese Formeln gelten nur für eine konstante Beschleunigung mit $v_{start} = 0$

4 Freier Fall

Eine sehr häufige Bewegung mit konstanter Beschleunigung ist der freie Fall. Die beschleunigende Kraft ist die Gewichtskraft. Die Gewichtskraft ist eine Folge der Gravitation (Naturerscheinung).

Die Gewichtskraft ist abhängig von der geografischen Lage, wo ich mich bewege. Die Fallbeschleunigung, welche sich aus der Gewichtskraft ergibt, demnach auch. Wird ein Körper frei fallen gelassen, lässt sich die Beschleunigung sehr einfach rechnen.



Wird dieser Versuch in Zug durchgeführt, so ergäbe sich eine Beschleunigung von $9.80638... \frac{m}{s^2}$.

Für den relativ ungenauen Alltag wird diese Beschleunigung auf $9.81 \frac{m}{s^2}$ gerundet.

Formelzeichen für diese Beschleunigung: g

5 Bewegungen mit nichtkonstanter Beschleunigung

Allgemeine Bewegungen mit unkonstanten Beschleunigungen sind für uns rechnerisch nicht zugänglich.

Eine spezielle Bewegung dieser Art ist die translativ Bewegung, welche aus einer Kreisbewegung hervorgeht.

Feststellung:

Die Momentangeschwindigkeit als Funktion der Zeit lässt sich aus der ersten

Ableitung $s = f(t)$ finden.

$$v = f(t) = \dot{s}$$

Die momentane Beschleunigung als Funktion der Zeit ergibt sich aus der Ableitung $a = f(t)$.

$$a = f(t) = \dot{v} = \ddot{s}$$

Merke: Wird eine Sinusfunktion abgeleitet, ergibt sich eine Cosinusfunktion. Wird eine Cosinusfunktion abgeleitet, ergibt sich eine Minussinusfunktion.

6 Der Horizontale Wurf

Wird ein Körper mit einer Geschwindigkeit v_0 horizontal in den Raum geschleudert, so geht er nach einer bestimmten Zeit zu Boden. Seine Bewegung ist eine Überlagerung von zwei Bewegungen.

- Einer waagerechten, nichtbeschleunigten Bewegung
- Und einer senkrechten Freifallbewegung

6.1 Bestimmung der Wurfweite W

Der Körper fliegt so lange waagrecht, wie seine Fallzeit ist.

$$W = v_0 \cdot t_{(Fall)}$$

$$t_{(Fall)} = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$\rightarrow W = v_o \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

7 Der Vektor

Hat eine physikalische Grösse folgende Eigenschaften:

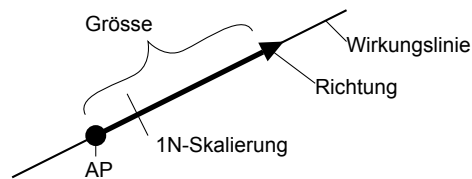
- einen Angriffspunkt AP,
- eine Wirkungslinie,
- eine Richtung,
- eine Grösse,

so hat diese physikalische Grösse Vektoreigenschaften.

→ Sie ist ein Vektor

Beispiele:

- Beschleunigung
- Geschwindigkeit
- Kraft
- Weg
- ... u.s.w.



7.1 Vektoroperationen

Grundsätzlich darf man Vektoren auf der Wirkungslinie verschieben;

Die Wirkungslinie selbst nicht.

Zwei Vektoren können mittels Parallelogramm addiert werden.

Ein gegebener Vektor kann in Komponenten zerlegt werden; die Richtung der Komponenten, die Wirkungslinie, kann frei gewählt werden.

7.2 Addition zweier Vektoren mit einem gemeinsamen Angriffspunkt

Die Vektoren werden auf der Wirkungslinie so verschoben bis die Angriffspunkte zusammenfallen.

Beachte: Bei einer Konstruktion wäre dieser gemeinsame Angriffspunkt gleichzeitig der Befestigungspunkt.

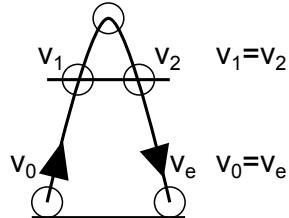
Für Entwürfe werden Vektoradditionen oftmals zeichnerisch gemacht. Für die mathematisch exakte Bearbeitung verwenden wir die kartesischen Koordinaten.

7.2.1 Lösungsvorgehen

- Die polaren Eingangsvektoren werden überführt ins kartesische Koordinatensystem.
- Jeder Vektor wird nun in seine Komponenten x und y zerlegt.
- diese kartesischen Komponenten werden addiert.
- Der Gesamtvektor wird wieder ins polare System zurückgeführt.

8 Der senkrechte Wurf nach oben

Wird ein Körper senkrecht nach oben geworfen, ist die Steigbewegung das Spiegelbild der Fallbewegung.



Es ist:

- Auf jeder Höhe ist die Steiggeschwindigkeit genau gleich gross wie die Fallgeschwindigkeit.
- Die Steigzeit ist genau gleich gross wie die Fallzeit.
- $t_{(Flug)} = 2 \cdot t_{(Fall)}$

$$t_{(Fall)} = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$\rightarrow t_{(Flug)} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

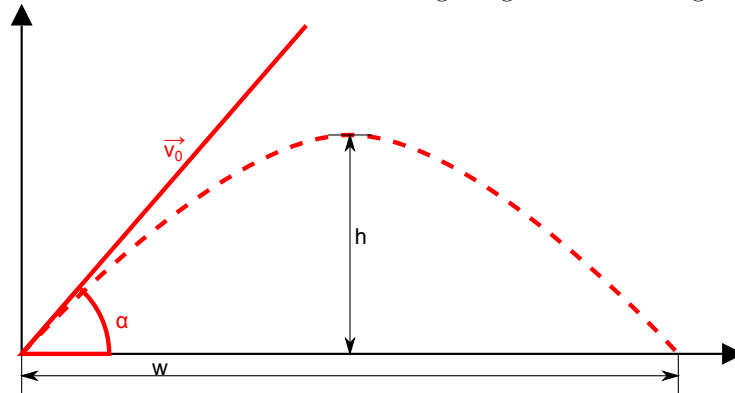
Beachte:

Der Geschwindigkeitsvektor zeigt in der ersten Hälfte der Flugzeit nach oben, in der zweiten Hälfte nach unten.

Nach Ablauf der Gesamtflugzeit wird er 0.

9 Der schiefe Wurf

Auch der schiefe Wurf ist die Überlagerung von zwei Bewegungen.



Die Abschussgeschwindigkeit v_0 ist ein Vektor, die x-Komponente dieses Vektors ist für die waagerechte gleichförmige Bewegung verantwortlich, die y-

Komponente dieses Vektors ist verantwortlich für die senkrechte Bewegung. Diese unterliegt der Fallbeschleunigung.

$$\vec{v}_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha$$

$$\vec{v}_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha$$

Die Flugzeit ist abhängig von \vec{v}_{0y}

$$t_{Flug} = 2 \cdot t_{Fall} = \frac{2 \cdot |\vec{v}_{0y}|}{g}$$

$$|\vec{v}_{0y}| = v_0 \cdot \sin \alpha$$

$$\rightarrow t_{Flug} = \frac{2 \cdot v_0 \cdot \sin \alpha}{g}$$

Die Wurfweite ergibt sich aus

$$W = t_{Flug} |\vec{v}_{0x}|$$

$$\rightarrow W = \frac{2 \cdot v_0 \sin \alpha}{g} \cdot v_0 \cdot \cos \alpha$$

$$W = \frac{v_0^2}{g} \cdot \sin 2\alpha$$

$2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin 2\alpha$ Goniometrische Umformung

Die Wurfhöhe entspricht dann der Freifallhöhe nach der Fallzeit $\frac{t_{Flug}}{2}$

$$H = g \cdot t_{Fall}^2 \cdot \frac{1}{2}$$

$$t_{Fall} = \frac{|\vec{v}_{0y}|}{g}$$

$$|\vec{v}_{0y}| = |\vec{v}_0| \cdot \sin \alpha$$

$$\rightarrow H = g \left(\frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} = \frac{g}{g^2} \cdot (v_0 \cdot \sin \alpha)^2 \cdot \frac{1}{2}$$

$$H = (v_0 \cdot \sin \alpha)^2 \cdot \frac{1}{2g}$$

Beachte:

Bei einer sportlichen Wurfdisziplin wird die grösste Wurfweite dann erreicht, wenn der Abschusswinkel 45° ist.

Das Produkt $\sin 2\alpha$ ist dann 1 und somit am grössten.

9.1 Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors im allgemeinen Fall

$$|v_{t_x}| = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{y_{t_x}}^2}$$

$$\tan \varphi = \frac{v_{ytx}}{v_{0x}}$$

Es ist:

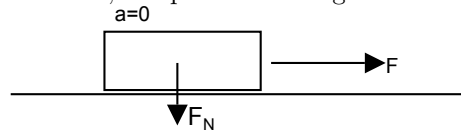
- Im Zeitintervall $t = 0$ bis $t = \frac{t_{Flug}}{2}$ zeigt der Vektor nach oben.
- Im Zeitintervall $t = \frac{t_{Flug}}{2}$ bis $t = t_{Flug}$ oder grösser zeigt der Vektor nach unten.

10 Reibung fester Körper

Ohne Reibung wäre ein Gehen und sicheres Stehen unmöglich. Beim Bremsen und Treiben (Traktion) wird Reibung ausgenutzt. In Maschinen ist die Reibung oft verantwortlich für einen reduzierten Wirkungsgrad.

Reibkraft ist eine Folge der Molekularen Adhäsionskraft, sowie von der Oberflächenrauheit der sich berührenden Körper.

Wird ein Körper über eine ebene Fläche bewegt mit einer Beschleunigung, welche 0 ist, entspricht die Aufgewendete Kraft direkt der Reibkraft.



$$F = F_{Ri}$$

10.1 Einflussgrößen auf die Reibkraft

Versuch:

1. Die Belastung (Auflagegewicht) wird verändert.
Feststellung:
Die Reibkraft steigt proportional zur Belastung an.
2. Die Auflagefläche wird verändert.
Feststellung:
Die Reibkraft bleibt konstant; Sie ist unabhängig von der Auflagefläche.
3. Die Geschwindigkeit wird verändert.
Feststellung:
Die Reibkraft ist unabhängig von der Geschwindigkeit. (Die Geschwindigkeit muss aber genügend hoch sein)
4. Die Unterlage wird verändert.
Feststellung:
Wirkt zwischen den berührenden Flächen eine starke Adhäsion, so steigt die Reibkraft an.
Dieser Sachverhalt wird durch den Reibungskoeffizienten μ berücksichtigt.

Es gilt:

$$F_{Ri} = F_N \cdot \mu$$

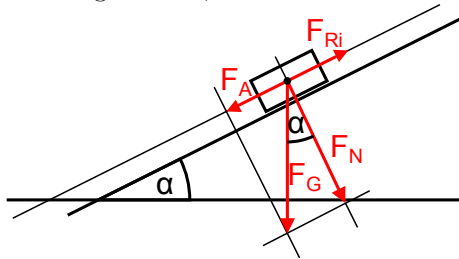
$$\rightarrow \mu = \frac{F_{Ri}}{F_N}$$

Beachte: Bei einem konkreten Fall muss μ üblicherweise messtechnisch ermittelt werden.

Die aufgelisteten Werte siehe Kuchling s. 617 - 618 dienen nur als Orientierungshilfe.

11 Kräfte bei der schiefen Ebene

Befindet sich ein Körper auf einer schiefen Ebene, entsteht eine "hangabtreibende Kraft". Die Normalkraft; Jene Kraft, mit welcher der Körper auf die Unterlage drückt; wird reduziert.



$$F_A = F_G \cdot \sin \alpha$$

$$F_N = F_G \cdot \cos \alpha$$

Die aktuelle Reibkraft ist der Abtriebskraft F_A entgegengesetzt.

$$F_{Ri} = F_N \cdot \mu$$

$$\rightarrow F_{Ri} = F_G \cdot \cos \alpha \cdot \mu$$

Wird der Anstellwinkel α vergrößert, wird F_A gleich gross wie F_{Ri} .

\rightarrow Der Körper kann rutschen.

12 Newton'sche Prinzipien

1687 veröffentlichte Isaac Newton (1642 - 1727) drei Prinzipien, die das Fundament der klassischen Mechanik bilden.

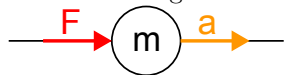
- Trägheitsprinzip
Jeder Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der geradlinigen

gleichförmigen Bewegung, solange er nicht durch äussere Kräfte erzwungen wird, seinen Bewegungszustand zu ändern.

- Aktionsprinzip
Jede auf einen Körper wirkende Kraft erzeugt an diesem eine Beschleunigung, die der Kraft proportional und gleichgerichtet ist.
- Reaktionsprinzip
Wirkt ein Körper mit seiner Kraft \vec{F}_1 (Aktion) auf einen zweiten, so wirkt dieser zweite Körper mit der Kraft \vec{F}_2 auf den ersten zurück.
 \vec{F}_1 und \vec{F}_2 haben denselben Betrag, dieselbe Wirkungslinie, entgegengesetzte Richtung.

13 Aktionsprinzip

Nach dem obigen Satz ist



$$F = m \cdot a \quad \left[kg \cdot \frac{m}{s^2} \rightarrow Newton[N] \right]$$

Lässt man einen Körper fallen, so zwingt er die Fallbeschleunigung g . Diese Beschleunigung ist eine Folge der Erdanziehungskraft; Gewichtskraft.

Die Gewichtskraft F_G lässt sich mit dem Aktionsprinzip berechnen.

$$F_G = m \cdot a$$

$$a = g$$

$$\rightarrow F_G = m \cdot g \quad \left[kg \cdot \frac{m}{s^2} = N \right]$$

Mit dem Aktionsprinzip lässt sich ein Einheitensystem aufbauen. Die Naturwissenschaft und die Physik verwenden zum Teil nicht dieselben Basiseinheiten. Daraus ergeben sich verschiedene Einheitensysteme.

1968 hat der Bundesrat beschlossen, dass gesamtschweizerisch nur noch die Basiseinheiten Meter $[m]$, Sekunde $[s]$, Kilogramm $[kg]$ zugelassen sind. Dies sind die Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems.

→ SI

Ältere Systeme verwenden cm, s, g → CGS-System.

In der Technik verwendete man m, s, TME → technisches System

SI: $F = m \cdot a \quad \left[kg \cdot \frac{m}{s^2} \right]$

CGS: $F = m \cdot a$

$$F = 1[g] \cdot 1 \left[\frac{cm}{s^2} \right] = 1[dyne]$$

$$\rightarrow 1N = 10^5 dyne$$

Technisches System: $F = m \cdot a$

$$F = 1 \cdot 1 = 1[kp]$$

Die Basis des technischen Systems ist die Krafteinheit.

1 Kilopond entspricht der Gravitationskraft.

Gewichtskraft von 1 kg Masse.

$$\rightarrow 1[kp] = 9.81[N]$$

$$\rightarrow m = \frac{F}{a} = \frac{9.81[N]}{1\left[\frac{m}{s^2}\right]} = 9.81[kg] = 1[TME]$$

13.1 Erweiterte Einheiten

Arbeit, Energie: $W = F \cdot s$

SI: $W = F \cdot s \quad \left[N \cdot m = \frac{kgm}{s^2} = \frac{kgm^2}{s^2} = Ws, J \right]$

CGS: $W = F \cdot s [dyn \cdot cm = erg]$

$$1Ws = 10^7 erg$$

Technisches System: $W = F \cdot s [kpm]$

Leistung: $P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t}$

SI: $P = \frac{W}{t} \left[\frac{Nm}{s} = \frac{J}{s} = \frac{Ws}{s} = W \right]$

CGS: $P = \frac{W}{t} \left[\frac{erg}{s} \right]$

Technisches System: $P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} \quad \left[\frac{kpm}{s} \right]$

$$75 \left[\frac{kpm}{s} \right] = [PS]$$

$$\rightarrow 1[PS] = 735.5[W] \cong 736[W]$$

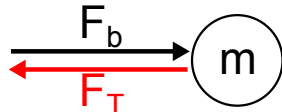
14 Reaktionsprinzip

Wirkt eine Kraft auf einen Körper, so wirkt dieser Körper mit derselben Kraft zurück. (Aktion = Reaktion) Die beiden Kräfte sind gleich gross, liegen auf derselben Wirkungslinie, haben aber entgegengesetzte Richtungen.

15 Trägheitsprinzip

Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, ausser er wird durch äussere Kräfte dazu gezwungen, diesen Zustand zu verändern.

15.1 Die Trägheitskraft



Wirkt auf eine Masse eine beschleunigende Kraft F_b , so wirkt als Reaktion eine Trägheitskraft von gleicher Grösse zurück.

Es ist:

- Die beiden Kräfte sind gleich gross. $|F_b| = |F_T|$
- F_b hat die selbe Richtung, wie der Beschleunigungsvektor.
- F_T ist der Beschleunigung entgegenwirkend.

16 Antriebstechnik

16.1 Auto:

Wenn sich ein Auto beschleunigt, benötigt es eine beschleunigende Kraft F_b . Diese hat dieselbe Richtung wie der Beschleunigungsvektor.



Bilder/Antriebstechnik_Auto.pdf

Die Reaktion auf die beschleunigende Kraft F_b ist die Reibkraft F_{Ri} .

Grenzsituation:

Die beschleunigende Kraft F_b kann höchstens so gross sein, wie die Reibkraft F_{Ri} . Dies gilt bei ebener Strasse.

$$\rightarrow F_b = F_{Ri}$$


$$F_b = a \cdot m$$

$$F_{Ri} = \mu \cdot m \cdot g$$

$$a \cdot m = \mu \cdot m \cdot g$$

$$a_{max} = \mu \cdot g$$

Bei der Bergfahrt:



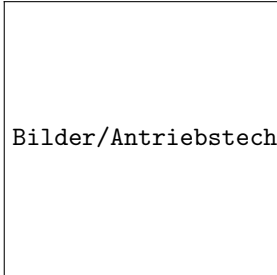
Bilder/Antriebstechnik_Auto_Bergfahrt.pdf

$$\vec{F}_b = \vec{F}_A + \vec{F}_{Ri}$$

$$F_{Ri} = F_b - F_A$$

Feststellung: Die maximale Beschleunigung wird kleiner. Bei einer Talfahrt kann F_A auch für die Beschleunigung verwendet werden.

16.2 Schiff:

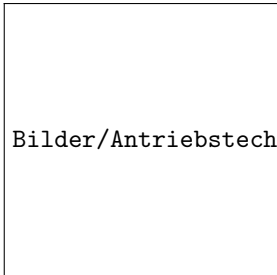


Bilder/Antriebstechnik_Schiff.pdf

Funktion: Die Schiffsschraube beschleunigt Wasser in der umgekehrten Richtung zur Fahrrichtung. Dazu benötigt man die beschleunigende Kraft F_b .

Die Reaktionskraft F_R wirkt auf die Schraube. Diese Kraft ist verantwortlich für den Vortrieb. (Abgesehen von hydrodynamischen Kräften.)

16.3 Flugzeug:



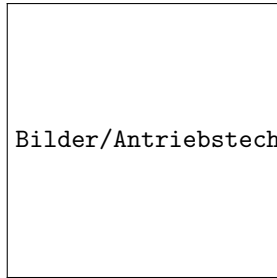
Bilder/Antriebstechnik_Flugzeug.pdf

Funktion: Der Propeller beschleunigt Luftmasse nach hinten. Dies benötigt die beschleunigende Kraft F_b . Die Reaktion F_R ergibt die vortreibende Antriebs-

kraft. (Abgesehen von Aerodynamischen Kräften.)

Bei einem Segelflugzeug wird die vortreibende Kraft durch die Hangabtriebskraft erzeugt. Bei ruhender Luft entspricht der Anstellwinkel dem Gleitwinkel. Moderne Sportflugzeuge haben Gleitwinkel von bis zu 1:60.

16.3.1 Kernstrahljet:



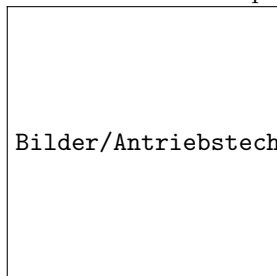
Bilder/Antriebstechnik_Rakete.pdf

Dieses Triebwerk wird mit flüssigem Treibstoff gespeist. Mit den Treibstoffpumpen wird der Schub gesteuert.

Variante: Der Sauerstoff und der Brennstoff wird in einem Feststoff zusammen gemischt

→ Feststoffrakete (nicht steuerbar)

Kernstrahl für atmosphärischen Gebrauch

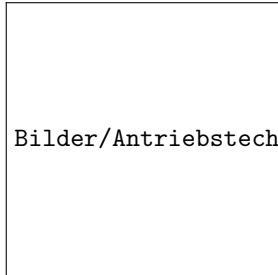


Bilder/Antriebstechnik_Kernstrahljet.pdf

Kernstrahltriebwerke werden nur noch eingesetzt für hohe Fluggeschwindigkeiten.

Grosser Nachteil: Schlechter Wirkungsgrad
hoher Schallpegel

16.3.2 Mantelstromtriebwerk:



Bilder/Antriebstechnik_Mantelstromtriebwerk.pdf

Der Mantelstrom umfasst nach dem Triebwerk den Turbulenten Kernstrahl.

Vorteil: Der Wirkungsgrad ist wesentlich grösser
Die Lärmerzeugung wurde stark reduziert.

17 Was ist Energie?

Energie ist eine Fähigkeit.

Energie kann nicht verloren gehen.

Sie kann von der einen Form in eine Andere überführt werden.

Es gibt verschiedene Arten von Energien

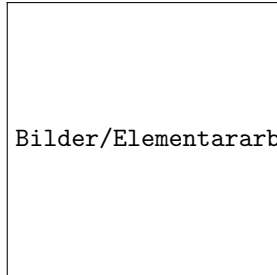
- Potenzielle Energie
- Kinetische Energie
- Elektrische Energie
- Magnetische Energie
- Chemische Energie
- Fusionsenergie
- Spaltungsenergie

Wird eine Energie von der einen Form in eine Andere überführt, nennt sich dieser Prozess Arbeiten.

Wird die überführte Energie pro Zeit betrachtet, so ist dies die Leistung.

17.1 Katalog einiger Elementararbeiten

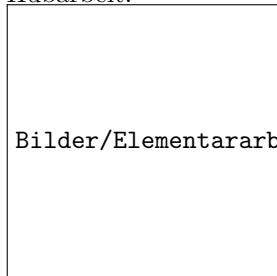
Reibarbeit:



Bilder/Elementararbeit_Reibarbeit.pdf

$$W_{Ri} = F_R \cdot s \quad [N \cdot m = Ws = J]$$

Hubarbeit:



Bilder/Elementararbeit_Reibarbeit.pdf

$$W_{Hub} = F_G \cdot h$$

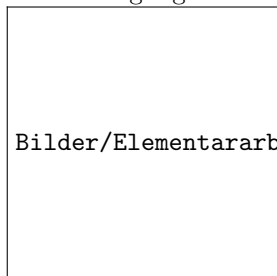
$$F_G = m \cdot g \cdot h$$

$$\rightarrow W_{Hub} = m \cdot g \cdot h$$

Wurde diese Hubarbeit verrichtet, so befindet sich in der hochgehobenen Masse die potenzielle Energie von dieser Grösse.

$$W_{pot} = W_{Hub} = m \cdot g \cdot h$$

Beschleunigungsarbeit:



Bilder/Elementararbeit_Reibarbeit.pdf

$$W_{\text{beschl}} = F_b \cdot s$$

$$F_b = m \cdot a$$

$$W_{\text{beschl}} = m \cdot a \cdot s$$

$$a \cdot s = \frac{v^2}{2}$$

$$\rightarrow W_{\text{beschl}} = m \cdot a \cdot s = m \cdot \frac{v^2}{2}$$

$$W_{\text{kin}} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

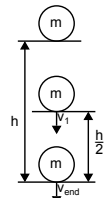
18 Arbeit

Wird die Energie von der einen Form in eine Andere überführt, so nennt man diesen Prozess Arbeit.

19 Leistung

Wird die überführte Energie zeitlich betrachtet, so ist dies die Leistung

20 Energieumwandlung in freien Fall



W_{pot}	W_{kin}	$W_{\text{tot}} = W_{\text{pot}} + W_{\text{kin}}$
$m \cdot g \cdot h$	0	$m \cdot g \cdot h$
$m \cdot g \cdot \frac{h}{2}$	$\frac{m \cdot v_1^2}{2} = \frac{m \cdot g^2 \cdot h}{h}$	$m \cdot g \cdot h$
0	$\frac{m \cdot v_{\text{end}}^2}{2} = \frac{m \cdot 2 \cdot g \cdot h}{2}$	$m \cdot g \cdot h$

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{h}{2}} = \sqrt{g \cdot h}$$

$$v_{\text{end}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

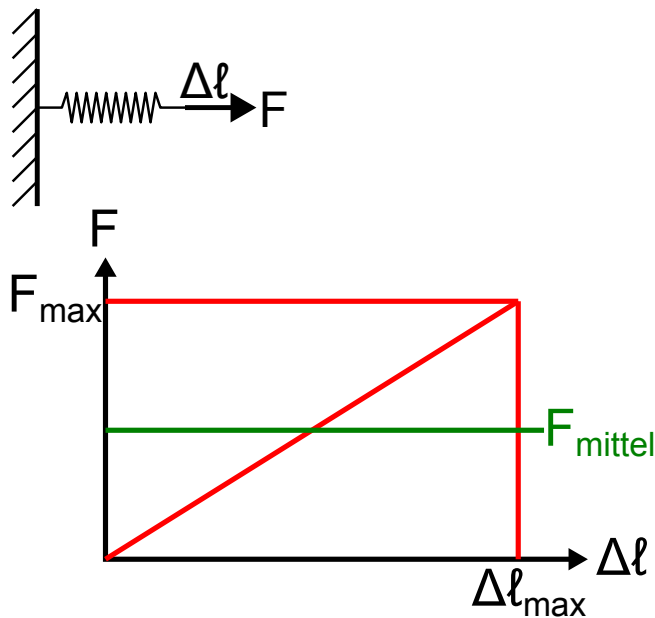
Feststellung: Die Summe der relevanten Energien (W_{pot} , W_{kin}) ist immer konstant.

Dies gilt für ein System, bei welchem kein Energieaustausch nach aussen stattfindet.

21 Die Feder als Energiespeicher

Mit einer Feder lässt sich statische Energie speichern. Die Grösse dieser Energie lässt sich über den Aufwand ermitteln, der für das Spannen der Feder aufgebracht werden muss.

21.1 Charakteristik einer Feder



$$W = F_{\text{mittel}} \cdot \Delta \ell = \frac{F_{\max}}{2} \cdot \Delta \ell$$

Die Federeigenschaft einer Feder wird über die Steigung der Federcharakteristik beschrieben. Diese Steigung nennt man Federrichtgrösse, Federkonstante, Federsteife.

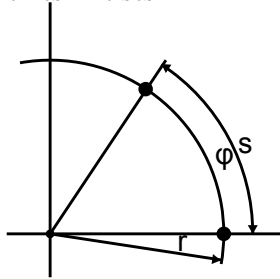
21.1.1 Feder-Richtgrösse

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta \ell} \quad \left[\frac{N}{m} \right]$$

22 Drehbewegung

22.1 gleichförmige Rotation

Drehen wir ein Rad um eine feste Achse, so hat sich jeder Massepunkt um denselben Winkel gedreht. Der Bewegungsweg eines Massepunktes ist ein Teil eines Kreises.



Drehwinkel:

$$\varphi = \frac{s}{r} \quad \left[\frac{m}{m} = rad = 1 \right]$$

rad ist eine Leereinheit

$$\rightarrow s = r \cdot \varphi \quad \text{Kreisweg}$$

Hat sich ein Drehkörper k mal gedreht, so ist der Drehwinkel $k \cdot 2\pi$.

22.2 Winkelgeschwindigkeit

Dreht sich ein Drehkörper in der Zeit t um den Winkel φ , so er hat die Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = \frac{\varphi}{t} \quad \left[\frac{-}{s} = -1 \right]$$

22.3 Drehzahl

In der Mechanik gibt man oftmals die Anzahl Umdrehungen pro Minute an. Man nennt dies Drehzahl n .

$$n = \frac{k}{t} \quad \left[\frac{-}{min} = min^{-1} \right]$$

22.4 Frequenz

In der allgemeinen Physik gibt man die Anzahl Umdrehungen pro Sekunde an. Man nennt dies Frequenz.

$$f = \frac{k}{t} \quad \left[\frac{-}{s} = -^1 = Hz \right]$$

22.5 Umlaufdauer

Dies ist jene Zeit, die der Drehkörper für eine volle Umdrehung benötigt.

$$T = \frac{t}{k} = \frac{1}{f} [s]$$

22.6 Zusammenfassung zwischen Winkelgeschwindigkeit und Frequenz

$$\omega = \frac{\varphi}{t}$$

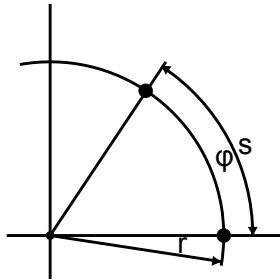
$$\varphi = k \cdot 2\pi$$

$$\rightarrow \omega = \frac{k \cdot 2\pi}{t}$$

$$\omega = 2\pi f$$

22.7 Bahngeschwindigkeit

Ein Punkt auf einem Drehkörper wird pro Zeit um eine bestimmte Bahnstrecke verschoben. Er erfährt eine Bahngeschwindigkeit.



$$v_b = \frac{s}{t}$$

$$s = \varphi \cdot r$$

$$\rightarrow v_b = \frac{\varphi \cdot r}{t}$$

$$\rightarrow v_b = r \cdot \omega$$

Bewegt sich ein Fahrzeug mit der Geschwindigkeit v , so ist die Winkelgeschwindigkeit des Rades

$$\omega = \frac{v}{r}$$

Bei Werkzeugmaschinen entspricht die Bahngeschwindigkeit oftmals der Schnittgeschwindigkeit.

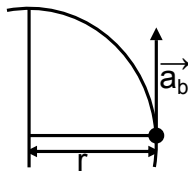
22.8 gleichmässig beschleunigte Drehbewegung

Eine beschleunigte Drehbewegung liegt dann vor, wenn sich die Winkelgeschwindigkeit pro Zeit um denselben Betrag ändert.

$$\text{Winkelbeschleunigung} = \frac{\text{Veränderung der Winkelgeschwindigkeit}}{\text{Zeit}}$$

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \left[\frac{s^{-1}}{s} = s^{-2} \right]$$

Befindet sich ein Punkt mit dem Radius r auf dem Drehkörper, erfährt dieser Punkt eine Bahnbeschleunigung.



$$|a_b| = \frac{\Delta v_b}{\Delta t}$$

$$\Delta v = r \cdot \Delta\omega$$

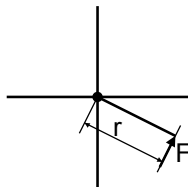
$$\rightarrow a_b = \frac{r \cdot \Delta\omega}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \alpha$$

$$a_b = r \cdot \alpha \quad [m \cdot s^{-2}]$$

22.9 Das Drehmoment

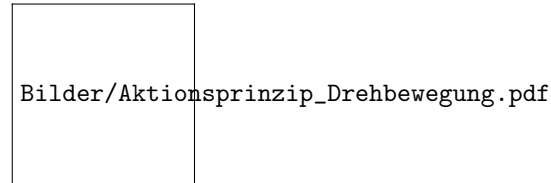
Soll ein ruhender Drehkörper in eine Drehung versetzt werden, so muss dazu ein Drehmoment aufgewendet werden.



$$M = F \cdot r \quad [N \cdot m]$$

Die Kraft wirkt senkrecht zum Radius. Sie greift tangential zur Drehbewegung.

22.10 Aktionsprinzip der Drehbewegung



$$F_b = m \cdot a_b$$

$$a_b = r \cdot \alpha$$

$$\rightarrow F_b = m \cdot r \cdot \alpha \quad | \cdot r$$

$$F_b \cdot r = m \cdot r^2 \cdot \alpha$$

$$F_b \cdot r = M_A$$

$$m \cdot r^2 \cdot \alpha = J$$

- M_A : Aktionsdrehmoment, welches die beschleunigte Drehbewegung bewirkt
- α : sich zeigende Winkelbeschleunigung
- J : Massenträgheitsmoment des Massepunktes M

Hat ein Drehkörper eine bestimmte Form, so muss für jeden einzelnen Massepunkt das Masseträgheitsmoment bestimmt werden. Das Gesamtmassenträgheitsmoment ergibt sich dann aus der Summe der einzelnen Massenträgheitsmoments.

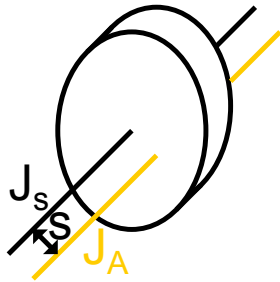
$$J_{tot} = J_1 + J_2 + J_3 + \dots \quad (\text{siehe Kuchling s. 131/132})$$

22.11 Die erzwungene Drehachse

Kann sich ein Körper frei um eine Drehachse drehen, so sind dies freie Bewegungsrichtungen \rightarrow Freiheitsgrade.

Eine Drehachse geht dann üblicherweise durch den Masseschwerpunkt.

Wird eine Drehachse erzwungen (die Drehachse ist nicht mehr Schwerpunktsachse, so gilt der Satz von Steiner.)

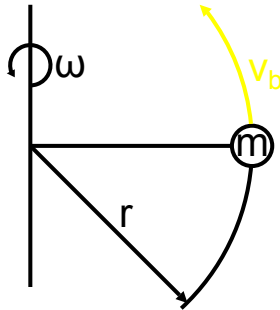


$$J_A = J_s + m \cdot s^2$$

J_A : Massenträgheitsmoment bei der aktuellen Achse
 J_s : Massenträgheitsmoment bei Schwerpunktsachse
 m : Masse des Drehkörpers
 s : Achsenversatz

siehe Kuchling s. 133

22.12 Energie, Arbeit, Leistung bei Drehbewegung



$$W_{Rot} = W_{kin} = \frac{m \cdot v_b^2}{2}$$

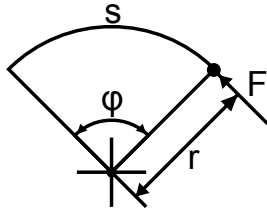
$$v_b = \omega \cdot r$$

$$\rightarrow W_{Rot} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r^2}{2}$$

$$m \cdot r^2 = J \quad (\text{Massenträgheit})$$

$$W_{Rot} = \frac{J \cdot \omega^2}{2} \quad \left[\frac{kg \cdot m^2}{s^2} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot m = N \cdot m = J \right]$$

Eine Dreharbeit ergibt sich aus dem Produkt Kraft mal Weg



$$W = F \cdot s$$

$$\rightarrow W = F \cdot r \cdot \varphi$$

$$F \cdot r = M$$

$$W = M \cdot \varphi$$

Leistung

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P = \frac{F \cdot r \cdot \varphi}{t}$$

$$F \cdot r = M$$

$$\frac{\varphi}{t} = \omega$$

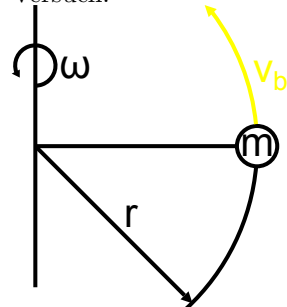
$$P = M \cdot \omega \quad \left[Nm \cdot s^{-1} = \frac{ws}{s} = W \right]$$

22.13 Die innere Energie eines Drehsystems

Definition System:

Dies ist eine Einrichtung mit einer Systemgrenze. Über diese Grenze findet kein Energieaustausch statt.

Versuch:



Wenn dieses System dreht, besitzt es eine innere Energie.

$$W_{Rot} = \frac{J}{2} \cdot \omega^2$$

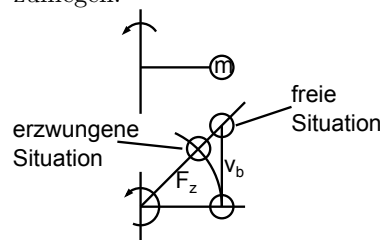
$$J = m \cdot r^2 \quad (\text{Massepunkt})$$

$$\rightarrow W_{Rot} = m \cdot r^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \omega^2$$

Wird am Radius eine Veränderung vorgenommen, wird sich in Folge der Energieerhaltung ($W_{Rot} = \text{konstant}$) die Winkelgeschwindigkeit verändern. Diese Situation treffen wir an beim Saltospringen, Schlittschuhläufer bei der Pirouette, bei Massenverschiebungen auf Drehkörpern (Corioliskraft). Die Corioliskraft (es ist eine Scheinkraft) ist eine treibende Kraft für die grossen Wetterphänomene. Auf der Nördlichen Halbkugel dreht sich eine aufsteigende Luftsäule (Tiefdruckgebiet) im Gegenuhrzeigersinn, eine absteigende Luftsäule (Hochdruckgebiet) im Uhrzeigersinn.

22.14 Zentralbewegung

Jede Masse, die um eine Achse gedreht wird hat das bestreben, tangential wegzufiegen.



Damit der Körper diese Bewegung ausführt, muss er zum Drehpunkt hin beschleunigt werden.

→ Zentripetalbeschleunigung

$$a_z = \frac{v_b^2}{r}$$

$$v_b = r \cdot \omega$$

$$\rightarrow a_z = \omega^2 \cdot r$$

Die dazu notwendige Kraft ist die Zentripetalkraft. Die Reaktionskraft auf diese Zentralkraft nennen wir Fliehkraft.

$$F_z = a_z \cdot m$$

$$F_z = \omega^2 \cdot r \cdot m \quad \left[\frac{1}{s^2} \cdot kg = \frac{m \cdot kg}{s^2} \right]$$

Diese Fliehkraft begegnet uns bei:

- Zentrifuge
- Kurvenfahrt von Fahrzeugen
- Zentrifugalkraft
- Flugbahnen bei Raumfahrzeugen und freien Himmelskörper

22.15 Der Drall

Hat ein Drehsystem eine innere Rotationsenergie, so kann es nur noch einen translativen Freiheitsgrad dazugewinnen. Diese Eigenschaft ist umso stärker, vorhanden, je grösser die innere Rotationsenergie ist. Die Physik sagt dann, das System hat einen Drall. Dies ist eine physikalische Grösse.

Drall:

$$L = J \cdot \omega$$

Wird in einem System dieser Drall verändert, benötigt dies ein Drehmoment.

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t} \left[\frac{kg \cdot m^2}{s \cdot s} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot m = NM \right]$$

Drall hat eine weitere Eigenschaft. Dank obiger Aussage wirkt er stabilisierend. Anwendungen:

- Kreiselkompass
- Künstlicher Horizont
- Trimmkreisel
- Drall in ballistischen Geschossen
- Stabilisierung beim Speerwerfen und Diskus
- Velo (Der Regelmechanismus des vorderen Rades)

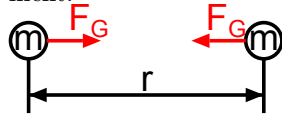
22.16 Unwucht

Beim rotierenden System wird oftmals eine Vibration festgestellt. Die Frequenz dieser Bewegung ist identisch mit der Drehfrequenz. Diese Eigenschaft ist eine Folge der Unwucht. Die Unwucht ist eine Kraft. Sie entspricht der Summe aller Fliehkräfte; Ist die vektorielle Summe 0, ist die Unwucht 0.

$$\overrightarrow{F_{Unw}} = \sum \overrightarrow{F_F}$$

23 Gravitation

Masse zeigt Trägheit und Gravitation. Beide Eigenschaften sind sehr einfach zu beobachten und zu messen. Weshalb aber Gravitation vorhanden ist, wissen wir nicht.



(Gravitation ist eine zwischen zwei Massen wirkende Kraft. Sie gehorcht dem Strahlungsgesetz)

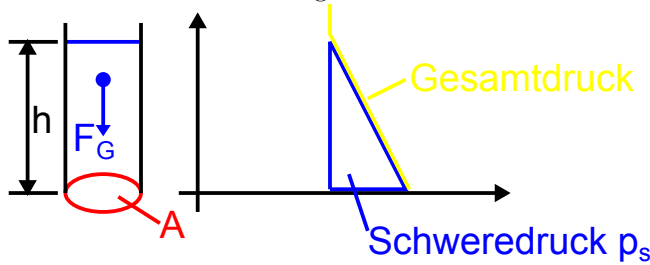
$$F_G = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot f$$

f : Gravitationskonstante

$$f = 6.6732... \cdot 10^{-11} \quad [m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}]$$

24 Der Schweredruck und der Gesamtdruck

Steigt man im Hallenbad in die Tiefe, spürt man einen Druck im Ohr und in der Stirn. Dies ist eine Folge des Schweredrucks.



Die Gewichtskraft der Flüssigkeitssäule wirkt auf den Säulenboden und erzeugt diesen Schweredruck.

$$\rightarrow P_{schwere} = \frac{F_G}{A}$$

$$F_G = m \cdot g$$

$$m = V \cdot \rho$$

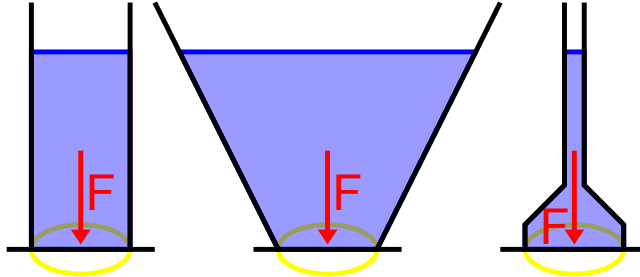
$$V = h \cdot A$$

$$\rightarrow P_{schwere} = \frac{h \cdot A \cdot \rho \cdot g}{A} = h \cdot \rho \cdot g \quad \left[m \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2} \cdot \frac{m}{m} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot \frac{1}{m^2} = \frac{N}{m^2} = Pa \right]$$

Der Gesamtdruck ist dann die Summe aus Luftdruck und Schweredruck.

$$p = p_o + p_s$$

24.1 Hydrostatisches Paradoxon



$$F = p_s \cdot A$$

Feststellung: Bei gleicher Einflöhe und gleicher Bodenfläche ergibt sich eine gleiche Kraft.

25 Mechanik der Flüssigkeiten und Gase (Fluidik)

Feste Stoffe besitzen ein bestimmtes Volumen und eine bestimmte Gestalt. Unter der Einwirkung von äusseren Kräften sind diese Eigenschaften veränderlich. Wenn die Kräfte nicht zu gross sind, sind die Veränderungen reversibel.

→ Feste Körper besitzen Formelastizität.

Bei einer Flüssigkeit fehlen Gitterkräfte oder molekulare Kräfte. Die gegenseitige Verschiebbarkeit der Moleküle, Atome ist gross.

→ Eine Flüssigkeit hat keine Gestalt mehr. Nur noch ein Volumen mit Volumenelastizität.

→ Bei Gasen ist die kinetische Energie so gross, dass sie sich atomar oder molekular frei im Raum bewegen. Die Geschwindigkeit liegt im Bereich von bis zu $2000 \frac{m}{s}$.

25.1 Hydrostatik (Verhalten der ruhenden Flüssigkeit)

Druck: wirkt eine Kraft flächenhaft, so wirkt der Quotient

$$\frac{F}{A} = p \quad (\text{Druck}) \quad \left[\frac{N}{m^2} = Pa \right] \text{ Pascal}$$

25.1.1 Gebräuchliche Einheiten

Der Druck von einem Pascal ist ein sehr kleiner Druck. In der Umgangssprache verwendet man Druckeinheiten, welche aus älteren Einheitensystemen stammen.

$$\left. \begin{array}{l} F = 1kp \\ A = 1cm^2 \end{array} \right\} p = \frac{F}{A} \quad \left[\frac{kp}{cm^2} = at \right]$$

$$\rightarrow 1at = \frac{1kp}{1cm^2} = \frac{9.81N}{1 \cdot 10^{-4}m^2} = 9.81 \cdot 10^4 Pa \approx 10^5 Pa$$

$$\rightarrow 10^5 Pa = 1bar$$

$$1bar = 1000mbar$$

$$1bar = 1000hpa$$

25.2 Kompressibilität

Die Kompressibilität gibt Auskunft über die Zusammendrückbarkeit einer Flüssigkeit.

Die Volumenänderung ist umso grösser,

- je grösser das entspannte Volumen v_0 ist,
 - je grösser der Druck, welcher für die Kompression aufgewendet wird Δp ist,
 - je grösser die Kompressibilität der Flüssigkeit ist.
- Dies ist ein empirisch gefundener Wert. Werte siehe Kuchling s. 619

$$\kappa = \frac{1}{K}$$

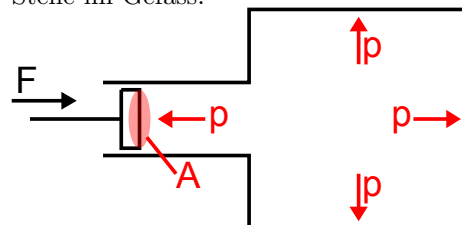
z.B. Wasser

$$\kappa_{H_2O} = 0.47 \cdot \frac{1}{GPa} = 0.47 \cdot \frac{1}{10^9} \cdot 1Pa = 0.47 \cdot 10^{-9} \cdot Pa^{-1}$$

$$\Delta v = v_0 \cdot \Delta p \cdot \kappa$$

25.3 Druckfortpflanzung

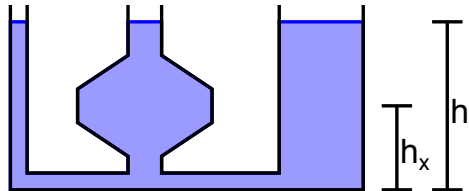
Wird in einem Gefäss ein Druck erzeugt, so zeigt sich dieser Druck an jeder Stelle im Gefäss.



Die Druckfortpflanzung erfolgt mit Schallgeschwindigkeit;

Im Wasser mit $1400 \frac{m}{s}$. Diese Eigenschaft begegnet uns bei Pumpen, bei Hydrauliksystemen, bei "Schuss auf den Kanister".

25.4 Verbundene Gefäße



Feststellung:

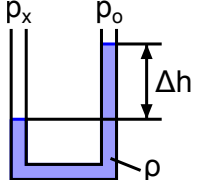
- Bei verbundenen Gefäßen stellt sich immer die gleiche Einfüllhöhe ein.
- Wird auf einer beliebigen Höhe (h_x) eine Druckmessung vorgenommen, ist diese in allen Gefäßen gleich.

Anwendungen:

- Wasserwaage



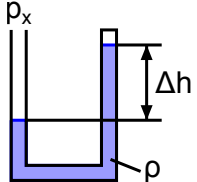
- Manometer



$$p_x = p_0 + \Delta h \cdot \rho \cdot g$$

(Δh ist positiv, wenn $p_x > p_0$)

- Barometer

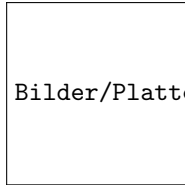


$$p_x = \Delta h \cdot \rho \cdot g$$

Mit dieser Einrichtung kann man Absolutdrücke messen.

25.5 Druckmesseinrichtungen

- Plattenfedermanometer

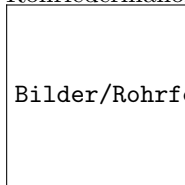


Die Deformation der Plattenmembran ist die Folge des Druckunterschiedes.

$$\Delta p = p_x - p_0$$

→ Dieses Manometer misst relativdrücke.

- Rohrfedermanometer



$$\text{Deformation} \sim F_2 - F_1$$

$$F_1 = p_x \cdot A_1$$

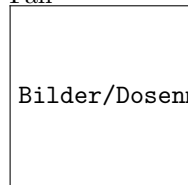
$$F_2 = p_x \cdot A_2$$

$$\rightarrow \Delta F = p_x (A_2 - A_1)$$

→ Mit diesem Manometer können Absolutdrücke gemessen werden.
Das Rohrfeder manometer ist jenes, welches für Prozessüberwachung eingesetzt wird.

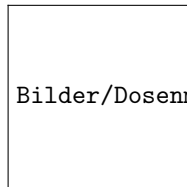
- Dosenmanometer

1. Fall



Misst Relativdruck.

2. Fall



Bilder/Dosenmanometer_absolut.pdf

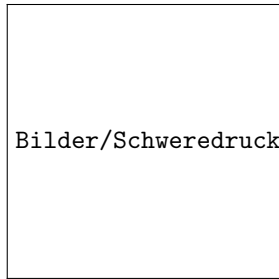
Misst Absolutdruck.

Die Messeinrichtung für die Luftdruckmessung ist das Dosenbarometer.

25.6 Der Auftrieb (Der Archimedische Auftrieb)

Taucht man einen Körper in eine Flüssigkeit, so verringert sich scheinbar sein Gewicht. Dies ist die Folge des statischen Auftriebs.

25.6.1 Untersuchung des Schweredruckes an einem eingetauchten Körper



Bilder/Schweredruck_Koerper_eingetaucht.pdf

Die Einzelkräfte F sind die Folge des Schweredruckes. Die seitlich wirkenden Kräfte F_2 wirken gegeneinander. Sie kompensieren sich.

$$\sum \vec{F}_2 = 0$$

$$F_1 = A \cdot p_{Sch_o}$$

$$F_3 = A \cdot p_{Sch_u}$$

$$p_{Sch_o} = \rho_{Fl} \cdot g \cdot s_1$$

$$p_{Sch_u} = \rho_{Fl} \cdot g \cdot s_2$$

$$F_A = \sum \vec{F}_1 + \vec{F}_3$$

$$\rightarrow |F_A| = F_3 - F_1$$

$$\rightarrow |F_A| = A \cdot \rho_{Fl} \cdot g \cdot s_2 - A \cdot \rho_{Fl} \cdot g \cdot s_1 = A \cdot \rho_{Fl} \cdot g \cdot (s_2 - s_1) = A \cdot \rho_{Fl} \cdot g \cdot h$$

$$F_A = V \cdot g \cdot \rho_{Fl}$$

25.6.2 Satz von Archimedes

Der Auftrieb eines eingetauchten Körpers ist so gross, wie das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit. Ist ein Körper ganz eingetaucht, so ergeben sich die drei Möglichkeiten:

$$F_A = F_g \rightarrow \text{Der Körper schwebt.}$$

$$F_A < F_g \rightarrow \text{Der Körper sinkt.}$$

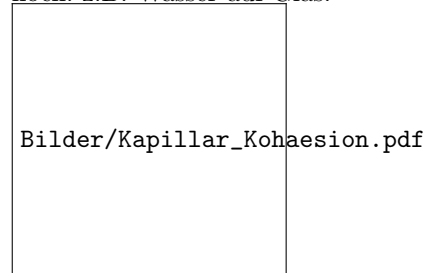
$$F_A > F_g \rightarrow \text{Der Körper schwimmt.}$$

(Er steigt so lange auf, bis der Auftrieb gleich gross wird, wie das Gewicht des Körpers.)

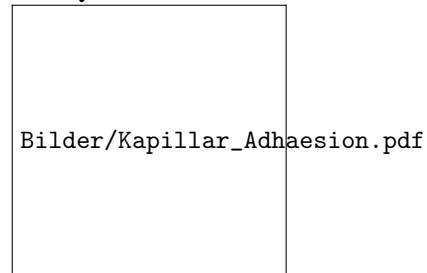
25.7 Die Kapillarität

Das Hochziehen beziehungsweise Herabdrücken einer Flüssigkeit an einer Behälterwand ist eine Folge der Kräfte zwischen den Flüssigkeitsmolekülen und Behältermolekülen (Adhäsion).

Ist die Adhäsion grösser als die Kohäsion, steigt die Flüssigkeit an der Wand hoch. z.B. Wasser auf Glas.



Ist die Kohäsion grösser als die Adhäsion, zeigt sich eine Kapillardepression. z.B. Quecksilber auf Glas.



Die Kapillarerscheinung ist neben dem Osmoseeffekt verantwortlich für das Hochsteigen von Nährsäften in Pflanzen.

25.8 Osmoseeffekt

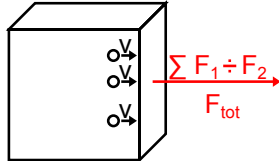
Ist ein Salz in Lösung, ist seine Energie kleiner, als wenn es in kristalliner Form ist. Gibt man ihm die Möglichkeit, in Lösung zu gehen, kann es eine relativ hohe Druckbarriere (osmotischer Druck) überwinden.

26 Aerostatik(Verhalten der ruhenden Gase)

26.1 Gasdruck

In einem Gas sind die Moleküle, Atome in einer intensiven thermischen Bewegung (Brownsche Molekularbewegung). Diese Bewegungen sind also umso heftiger, umso wärmer das Gas ist. → Wärme ist Bewegungsenergie.

Befindet sich das Gas in einem Behälter, schlagen die einzelnen Moleküle auf die Behälterwand auf und erzeugen einen Kraftstoß.



$$\rightarrow \frac{F}{A} = \text{Gasdruck}$$

$$\underline{\underline{p = \frac{F}{A} \quad [Pa]}}$$

Der Druck wird gesteuert durch

- Geschwindigkeit der Moleküle
- Dichte der Moleküle
- Masse der Moleküle

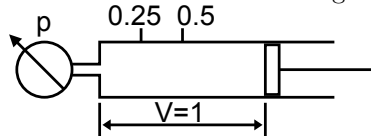
26.2 Zustandsänderungen von Gasen

1. Fall

Wir lassen das Volumen eines Gases abnehmen und untersuchen den resultierenden Gasdruck.

Die Systemtemperatur lassen wir konstant.

Isotherme Zustandsänderung



V	1	0.5	0.25	
$p[\text{bar}]$	1	2	4	
$p \cdot V$	1	1	1	

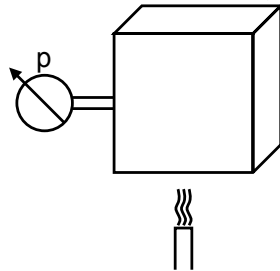
Feststellung: Das Produkt $p \cdot V$ bleibt konstant.

→ Wenn das Gas in Zustand 1 ist, ist das Produkt $p \cdot V$ gleich gross, wie wenn es im Zustand 2 ist.

$$\rightarrow p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

2. Fall

Wir lassen das Volumen eines Gasbehälters konstant und untersuchen den resultierenden Druck, wenn das Volumen erwärmt wird.



Das Volumen lassen wir konstant. Isochore Zustandsänderung.

$T[K]$	0	100	200	
$p[bar]$	0	1	2	

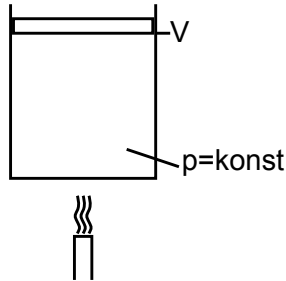
Der Druck verhält sich proportional zur Temperatur.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

3. Fall

Wir lassen den Druck in einem Behälter konstant und untersuchen das Volumen bei Erwärmung.

konstanter Druck → isobare Zustandsänderung.



$T[K]$	0	100	200	
V	0	1	2	

Das Volumen verhält sich proportional zur Temperatur.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

26.3 Gasdichte

Gase sind den Zustandsänderungen unterworfen. Will man eine Gasdichte tabellarisch erfassen, so ist das nur bei genormten Zuständen möglich. Wir nennen

diesen Normalzustand.

Für diesen gilt:

Volumen $1m^3$

Druck $p_0 = 1013...mbar$

Temperatur $T_0 = 0\text{ }^{\circ}C = 273.16K$

Werte für Dichte siehe Kuchling s. 616

z.B: Luft: $1.2923 \frac{kg}{m^3}$

z.B. Wasserstoff: $0.08989 \frac{kg}{m^3}$

Änderung der Gasdichte durch die Versuchsbedingungen. Wird bei einem Versuch Gas verwendet, muss seine Dichte immer den Bedingungen angepasst werden.

26.3.1 Temperatur, Druck

Da die Gasgesetze linear sind, ergibt sich ein einfacher Zusammenhang.

1. Druck

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1}{p_2} \quad \text{isotherm}$$

2. Temperatur

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{isobar}$$

3. Druck und Temperatur

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

26.4 Der Luftdruck

Der Luftdruck ist ein Schweredruck. Die Dichte der Gassäule ist aber nicht konstant. Der Dichteverlauf in Funktion der Höhe ist abhängig von diversen Einflussgrößen. Aus diesem Grund gelingt es nicht, eine genaue Funktion $p = f(h)$ zu definieren. Für genaue Untersuchung wird ein Höhenprofil vermessen (mit Ballon).

Für relativ ungenaue Berechnungen, jedoch mit grossem Höhenbereich verwendet man die barometrische Höhenformel.

$$p_n = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{p_0}}$$

Für Höhen bis 11'000 Meter (obere Grenze der Troposphäre) verwendet man die internationale Höhenformel.

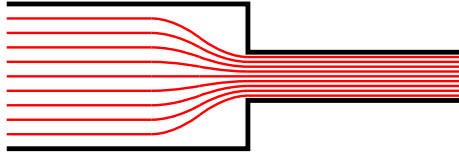
$$p_n = 1013hPa \cdot \left(1 - \frac{6.5 \cdot h}{288'000m}\right)^{5.255}$$

27 Hydro - und Aerodynamik

27.1 Verhalten der bewegten Flüssigkeiten und Gase

27.1.1 Darstellung einer Strömung

Will man die innern Mechanismen einer Strömung sichtbar machen, verwendet man Strömungslinien, welche im Wasser durch Farbstoff, in Gasen durch Rauchähnliche Stoffe gemacht werden.



Aussagekraft der Strömungslinien

- Sie zeigen den Weg der Flüssigkeits - oder Gasteilchen an.
- Die Tangente an die Strömungslinie gibt die Richtung der Momentangeschwindigkeit an.
- Je dichter die Strömungslinien verlaufen, desto grösser ist die Strömungsgeschwindigkeit.
- Strömungslinien können sich nicht kreuzen.
- "Verwischte" Strömungslinien zeigen eine Turbulenz an.

27.2 Strömungsarten

Wenn die relative Geschwindigkeit zwischen benachbarten Strömungslinien klein ist (fast kein Reibverluste), so ist dies eine laminare Strömung.

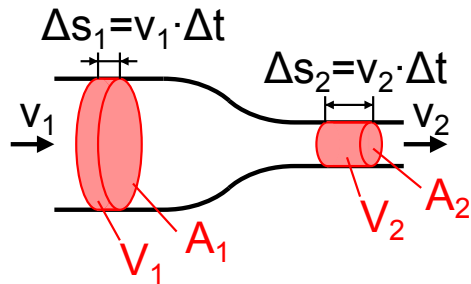
→ Die kinetische Energie der Strömung bleibt konstant.

Ist die relative Geschwindigkeit zwischen benachbarten Strömungsteilchen erheblich (es entstehen Reibverluste), so ist dies eine turbulente Strömung.

27.3 Kontinuitätsgleichung

Fliesst eine Strömung durch eine Verengung, so stellen wir ein Ansteigen der Strömungsgeschwindigkeit fest.

Für die folgende Berechnung müssen wir annehmen, das strömende Medium sei inkompressibel.



Es ist:

$$V_1 = V_2$$

$$V_1 = \Delta s_1 \cdot A_1 = v_1 \cdot \Delta t \cdot A_1$$

$$V_2 = \Delta s_2 \cdot A_2 = v_2 \cdot \Delta t \cdot A_2$$

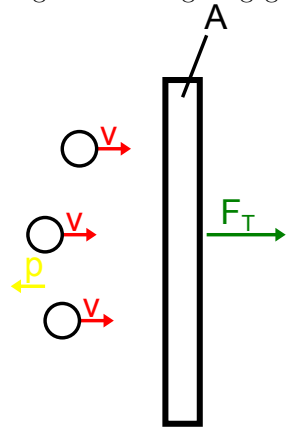
$$v_1 \cdot \Delta t \cdot A_1 = v_2 \cdot \Delta t \cdot A_2$$

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

27.4 Der Staudruck

Trifft ein fließendes Medium auf eine stillstehende Wand, so werden die strömenden Teile "abgebremst". Sie erfahren eine Beschleunigung, welche der Geschwindigkeitsrichtung entgegenwirkt. Auf das Hindernis wirkt eine Trägheitskraft.



Diese Trägheitskraft ist umso grösser, je grösser die Geschwindigkeit und je grösser die Masse ist.

→ Der Quotient $\frac{F_T}{A} = \text{Staudruck, } p_{st}$

$$p_{st} = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m^2}{s^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2} = \frac{kg \cdot m}{s^2 \cdot m^2} = \frac{N}{m^2} = Pa \right]$$

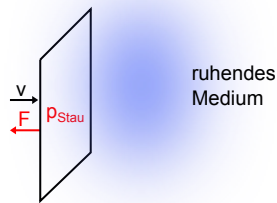
Aus diesen Angaben bestimmt die Flugzeugelektronik die Fluggeschwindigkeit gegenüber der umliegenden Luft. Mit dieser Geschwindigkeit überprüft er die Triebwerksleistung.

$$\rightarrow v = \sqrt{\frac{p_{stau} \cdot 2}{\rho}}$$

Der Staudruck und die folgenden physikalischen Phänomene zeigen sich, wenn ein strömendes Medium auf ein Hindernis trifft. Sie zeigen sich in gleicher Weise, wenn sich ein Hindernis mit einer Geschwindigkeit durch ein stehendes Medium bewegt.

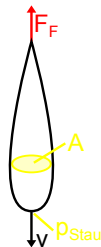
27.5 Fahrwiderstand

Bewegt sich ein Fahrzeug (Hindernis) in einem Medium, so wird sich ein Staudruck aufbauen. Dieser bewirkt eine Kraft, welche der Bewegungsrichtung entgegenwirkt.



Obige Ansatz gilt nur, wenn die Fläche unendlich gross ist. üblicherweise wird das Hindernis Umströmt. Bei dieser Umströmung können Turbulenzen auftreten, welche der Strömung Energie entziehen. Dies führt dazu, dass diese Widerstandskraft ansteigt. Von der Natur her kennen wir die Idealförm. Sie erzeugt praktisch keine Turbulenzen.

27.6 Die Tropfenform



Fahrwiderstand

$$F_F = p_{stau} \cdot A \cdot c_w = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_w}{2}$$

c_w : Umströmbarkeit, Widerstandsbeiwert

Empirisch gefundene Grösse

Werte siehe Kuchling s. 622

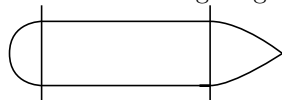
Stromlinienkörper: 0.05 (ist der kleinstmögliche Wert.)

27.7 Optimierte Fahrzeuge

Soll ein Fahrzeug einen kleinstmöglichen Fahrwiderstand aufweisen, so hat es die Tropfenform.



Graf Zeppelin untersuchte für seine Luftschiffe diese Zusammenhänge und fand heraus, dass am grössten Querschnitt ein Schnitt gemacht werden kann, in welchem ein beliebig langer Zylinder eingelegt werden kann.



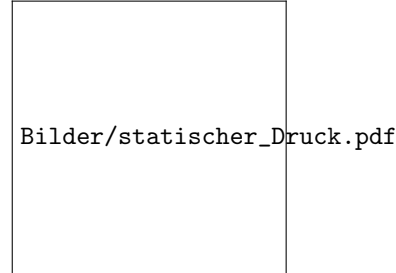
27.8 Der statische Druck

Befinden wir uns in einem Gasraum, in welchem die Strömungsgeschwindigkeit 0 ist, so registrieren wir einen statischen Druck als Folge der thermischen Molekularbewegung. In einem Luftraum entspricht dieser Druck dem Luftdruck ($\approx 10^5 Pa$)

Wird diese Gasmasse bewegt - es entsteht eine Strömungsgeschwindigkeit. Die innere Energie des Gases bleibt dabei konstant. Registrieren wir ein absinken des statischen Druckes. Die Staudruckkomponente auf einem möglichen Hindernis steigt an.

27.8.1 Satz von Bernoulli

in einer Strömung mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit reduziert sich der statische Druck. Der Staudruck steigt an. Ist die Strömung waagrecht und reibungsfrei, besagt Bernoulli, dass das Absinken des statischen Drucks genau gleich gross ist, wie das Ansteigen des Staudrucks. Der Gültigkeitsbereich endet, wenn der statische Druck 0 wird.



Merke: p_{stau} ist ein Druck mit Vektorcharakter. Die Wirkungslinie hat dieselbe Richtung wie der Geschwindigkeitsvektor.

Der statische Druck ist ein allseitig wirkender Druck.

Nach Bernoulli

$$\Delta p_{stau} = -\Delta p_{stat}$$

→ Wenn $v = 0$

$$p_{stat_1} = p_0$$

$$p_{stau_1} = 0$$

$$p_{stat_2} = p_0$$

$$p_{stau_2} = 0$$

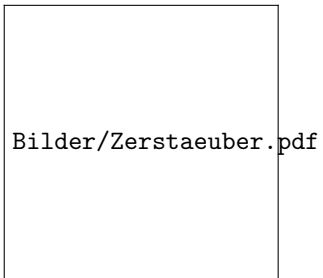
$$v = v_{aktuell}$$

$$p_{stat_1} = p_0 - p_{stau_1}$$

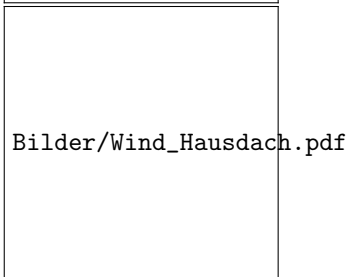
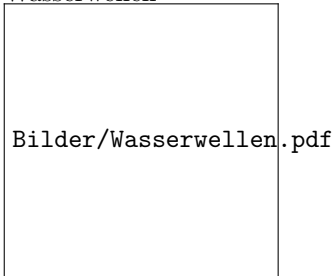
$$p_{stat_2} = p_0 - p_{stau_2}$$

Beachte: Das Gesetz von Bernoulli gibt auch Auskunft über eine schräge reibungsfreie Strömung. Das fließende Medium kann gasförmig oder flüssig sein. Der Ruhesystemdruck kann beliebig sein.

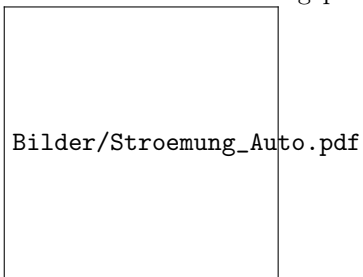
Anwendungen Zerstäuber



Wasserwellen



Feststellung: Die Druckdifferenz $p_0 - p_{stat}$ bewirkt eine Kraft, welche "das Dach abhebt" (Dynamische Auftrieb). Diese Kraft kann reduziert werden, wenn im Hausinnern der Druck angepasst wird, wenn das Dach nicht luftdicht ist.

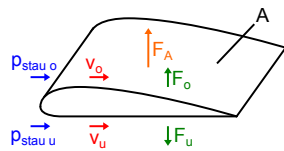


Feststellung: Unter dem Fahrzeug und auf dem Dach des Fahrzeugs reduziert sich der statische Druck.

Flügelprofil

Bilder/Stroemung_Fluegelprofil.pdf

27.9 Dynamischer Auftrieb



Auftrieb

$$F_A = \vec{F}_o + \vec{F}_u$$

$$\rightarrow |F_A| = -F_o + F_u$$

$$F_o = p_{stat_o} \cdot A$$

$$F_u = p_{stat_u} \cdot A$$

$$p_{stat_o} = p_0 - p_{stau_o}$$

$$p_{stat_u} = p_0 - p_{stau_u}$$

$$p_{stau_o} = \frac{v_o^2 \cdot \rho}{2}$$

$$p_{stau_u} = \frac{v_u^2 \cdot \rho}{2}$$

$$\rightarrow F_A = -A \cdot \left(p_0 - \frac{v_o^2 \cdot \rho}{2} \right) + A \cdot \left(p_0 - \frac{v_u^2 \cdot \rho}{2} \right)$$

$$F_A = -A \cdot p_0 - A \cdot \frac{v_o^2 \cdot \rho}{2} + A \cdot p_0 + A \cdot \frac{v_u^2 \cdot \rho}{2}$$

$$F_A = A \cdot \left(-p_0 - \frac{v_o^2 \cdot \rho}{2} + p_0 + \frac{v_u^2 \cdot \rho}{2} \right)$$

$$F_A = \frac{A \cdot \rho}{2} \cdot (-v_u^2 + v_o^2) = A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (v_o^2 - v_u^2)$$

Feststellung: Je höher die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Ober- und Unter-

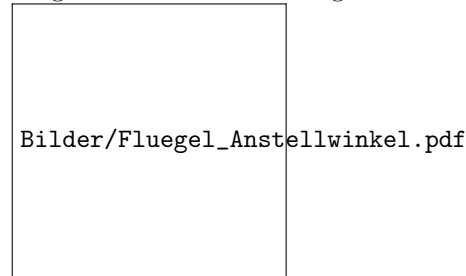
seite ist, umso grösser ist der Auftrieb.

$$v_u = v_{reise}$$

$$v_o = v_{reise} \cdot \frac{\ell_o}{\ell_u}$$

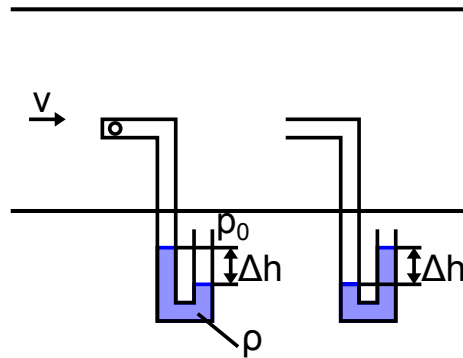
27.10 Situation an einem Tragflügel eines Flugzeuges

Im Idealfall (kleinster c-Wert) ist an der Flügelbasis (Unterseite des Flügels) eine Strömungsgeschwindigkeit vorhanden, die identisch Reisesgeschwindigkeit ist. An der Oberseite ist sie entsprechend grösser. Der Flügelanstellwinkel ist nun Null Grad. Beim Start und bei der Landung wird dieser Winkel vergrössert. Dadurch entstehen bedeutend grössere Geschwindigkeitsunterschiede. Auf der Flügelunterseite entsteht sogar eine Staudruckkomponente.



27.11 Statischer- und Staudruck zur Geschwindigkeitsmessung

In einem offenen Strömungskanal interessiert der statische und der Staudruck. Offener Kanal: Bei Strömungsgeschwindigkeit 0 entspricht der statische Druck dem Luftdruck.



statischer Druck: Dies ist ein allseitig wirkender Druck.

Staudruck: Der Staudruck ist ein Vektor. Das heisst, es ist ein gerichteter Druck.

$$p_{stau} = \Delta h \cdot \rho \cdot g$$

27.11.1 Der Staudruckmesser als Geschwindigkeitsmesser

Bei Flug- und Wasserfahrzeugen wird die Geschwindigkeit gegenüber dem umliegenden Medium mit einem Staudruckmesser erfasst.

$$p_{stau} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

$$\rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{stau}}{\rho}}$$

27.12 Kavitation

In einer Strömung kann der statische Druck höchstens auf 0 absinken. Bei Gasen ist dies dann eine relativ hohe Geschwindigkeit.

Ist das strömende Medium eine Flüssigkeit, entspricht der tiefste erreichbare Druck dem Dampfdruck.

Feststellung: Bei einer Geschwindigkeit von 14.75 m/s, bei Wasser, entspricht der statische Druck dem Dampfdruck.

→ Es entstehen Dampfblasen.

Diese Dampfblasen werden nach dem Abgang implodieren.

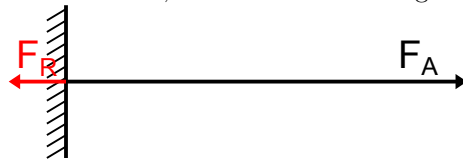
Die Stosswellen, welche dabei entstehen, können auch hochqualitatives Material zerstören.

Kavitationsschäden an Antriebsschrauben, Pumpenrädern, Turbinenrädern

28 Statik

28.1 Kräfte im Seil

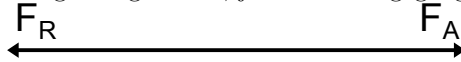
Im Gegensatz zu einem Träger, welcher Druck-, Zug- und Torsionskräfte aufnehmen kann, kann ein Seil nur Zugkräfte aufnehmen.



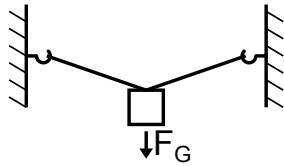
Es ist:

- Die Wirkungslinie des Kraftvektors liegt im Seil.
- Die innere Seilkraft ist gleich gross, wie die angreifende Kraft F_A .

- Die innere Seilkraft ist an jeder Stelle des Seils gleich gross.
- Am Seilende wirkt vom Haltepunkt eine Reaktionskraft auf das Seil, welche gleich gross ist, jedoch in entgegengesetzte Richtung wirkt.

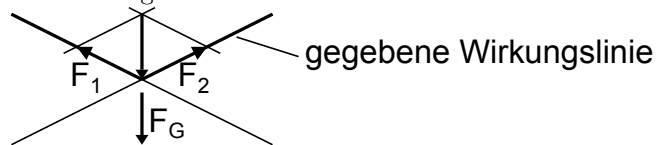


28.2 Das eingespannte Seil



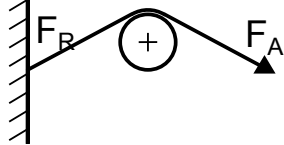
ges. Kräfte im Seil

Lösung: Von den gesuchten Kraftkomponenten ist die Wirkungsline bekannt, denn sie liegt in den Seilen.



28.3 Seile und Rollen

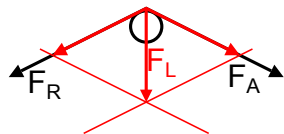
Bedingung: Die verwendeten Rollen haben keine Lagerreibung und einen genügend grossen Rollendurchmesser.



Es ist:

- Die innere Seilkraft ist an jeder Stelle des Seils gleich gross.
- Die Richtung der Seilkraft ist identisch mit der Seilrichtung.
- Am Endpunkt des Seiles greift die Reaktionskraft F_R an.
- Eine reibfreie Rolle kann die innere Seilkraft nicht verändern.

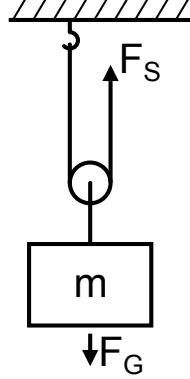
28.4 Kräfte am Rollenlager



Beispiel: Seilbahntragseil

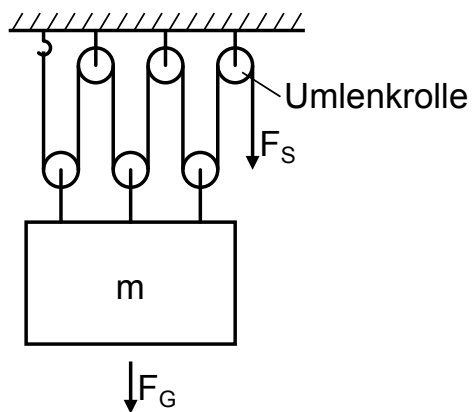
Bilder/Seilbahntragseil.pdf

F_S : innere Seilkraft
Spezialfall: Flaschenzug



$$F_S = \frac{F_G}{2}$$

28.5 Allgemeiner Flaschenzug



Die Gewichtskraft F_G wird auf sechs tragende Seile übertragen. Die innere Seil-

kraft $F_S = \frac{F_G}{6}$.

$$F_S = \frac{F_G}{n}$$

n : Anzahl tragende Seile

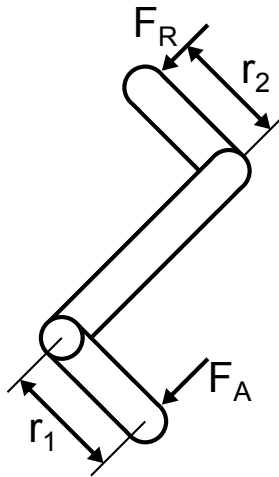
Achtung: Umlenkrollen beeinflussen die Kraftübertragung nicht.

28.6 Momentensatz

In der Dynamik bewirkt ein Drehmoment eine beschleunigte Drehbewegung. In der Statik, wo sich nichts drehen darf, suchen wir das Reaktionsmoment, welches genau gleich gross sein muss, wie das Aktionsmoment.

Aktion = Reaktion

$$M_A = M_R$$



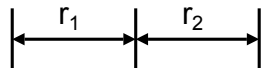
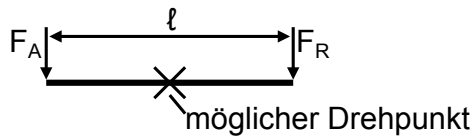
Es ist: für Stillstand

$$F_A \cdot r_1 = F_R \cdot r_2$$

$$M_A = M_R$$

Momentensatz: In der Statik sind die Summe aller Momente immer Null.

28.7 Kräfte an einem Hebel



Momentsatz:

$$\vec{F}_A \cdot r_1 + \vec{F}_R \cdot r_2 = 0$$

Damit die Kräfte nicht als Vektoren eingesetzt werden müssen, kann mit folgender Vereinfachung gerechnet werden:

Wir definieren:

- Kräfte im Uhrzeigersinn wirkend sind positive Kräfte.

$$\rightarrow +F$$

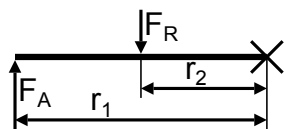
- Kräfte im Gegenuhreigersinn wirkend sind negative Kräfte.

$$\rightarrow -F$$

$$((-F_A) \cdot r_1) + ((+F_R) \cdot r_2) = 0$$

28.8 Katalog der typischen Momentsatzaufgaben

Der einfache Hebel

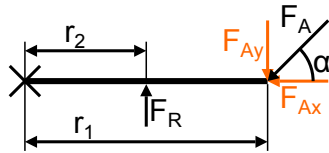


Momentsatz:

$$((+F_A) \cdot r_1) + ((-F_R) \cdot r_2) = 0$$

$$F_R = \frac{F_A \cdot r_1}{r_2}$$

Die Aktionskraft F_A wirkt nicht tangential zum Radius



F_{Ax} ergibt kein Drehmoment, nur eine Lagerbelastung.

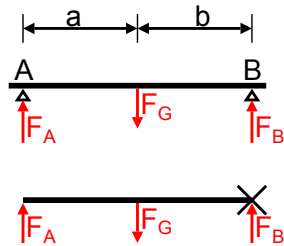
$$F_{Ay} = |F_A| \cdot \sin \alpha$$

$$F_{Ax} = |F_A| \cdot \cos \alpha$$

Momentensatz:

$$((+F_{Ay}) \cdot r_1) + ((-F_R) \cdot r_2) = 0$$

Kräfte auf Lager



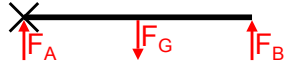
Vorgehen: Der mögliche Drehpunkt wird in ein Lager (z.B. B) verlegt. das Lager A wird durch die Kraft F_1 ersetzt.

Momentensatz

$$((+F_A) \cdot (a + b)) + ((-F_G) \cdot b) = 0$$

$$F_A = \frac{F_G \cdot b}{a + b}$$

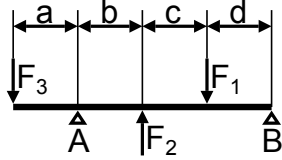
Für Lager B gilt dann



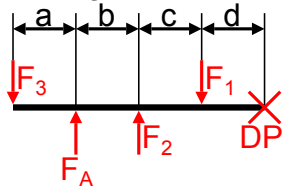
$$((-F_B) \cdot (a + b)) + ((+F_G) \cdot a) = 0$$

$$F_B = \frac{F_G \cdot a}{a + b}$$

Allgemeiner Fall



Für Lager A:



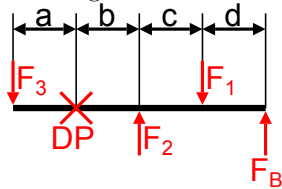
Momentensatz:

$$(+F_A) \cdot (b + c + d) + (-F_3) \cdot (a + b + c + d) + (+F_2) \cdot (c + d) + (-F_1) \cdot (d) = 0$$

$$\rightarrow F_A = \frac{F_3 \cdot (a + b + c + d) - F_2 \cdot (c + d) + F_1 \cdot (d)}{b + c + d}$$

Beachte: Die Kraft F_A wurde in einer willkürlichen Richtung eingesetzt. liefert die numerische Rechnung einen negativen Ausdruck für F_A , müsste die Drehrichtung geändert werden.

Für Lager B:



Momentensatz:

$$F_B = \frac{F_1 \cdot (b + c) - F_2 \cdot (b) + F_3 \cdot (a)}{b + c + d}$$

29 Wärmelehre

29.1 Einleitung

Ähnlich wie in der Mechanik, in welcher wir Grundprinzipien für die Erklärung verwendet haben (Energiesatz, Newtonsche Axiome, ...) verwendet man in der Wärmelehre Hauptsätze.

1. Hauptsatz

Wärme ist Energie, für welche im mikroskopischen Bereich der Energiesatz gilt.

2. Hauptsatz

Wärmevorgänge haben eine bestimmte Richtung. Dadurch können sie irreversibel werden. Wärme fließt von Stellen höherer Temperatur nach Stellen tieferer Temperatur.

3. Hauptsatz

Die Natur kennt Grenzwerte (Postulat Kelvin). Dieser Temperaturnullpunkt hat Grenzwertcharakter.

29.2 Temperatur

Die Temperatur ist die wichtigste physikalische Grösse in der Wärmelehre. Unsere Haut besitzt die Eigenschaft, nebst Schmerz und Druck auch Temperatur wahrzunehmen.

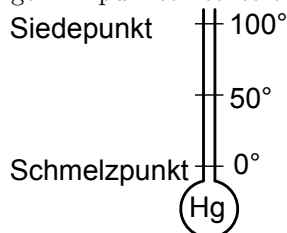
29.2.1 Festlegung der Temperaturskala

1. Celsius-Skala

Die Festlegung der Celsius-Skala erfolgt mit den Aggregatswechseln von Wasser.

- Schmelzpunkt von Wasser ($p_0 = 1013[mbar]$)
→ $0^\circ C$
- Siedepunkt von Wasser ($p_0 = 1013[mbar]$)
→ $100^\circ C$

Als Anzeigergerät verwendete er eine Kapillare, in welcher er die Ausdehnung von Quecksilber messen konnte. Die Kapillarlänge zwischen den obigen Fixpunkten teilte er in 100 Grade ein.



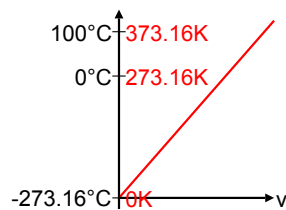
Beachte: Diese Linearität gilt nur für Quecksilber. Bei einem anderen Ausdehnungsmedium (Alkohol, Toluol, Pentan) (für tiefe Temperaturen) gilt dies nicht mehr.

Die Celsiusskala ist in Mitteleuropa die Gebräuchlichste. Wir verwenden sie in der Umgangssprache.

2. Kelvin-Skala Kelvin wollte eine Stoffunabhängige Skala. Er verwendete als Ausdehnungsmedium ein ideales Gas. Er mass das Gasvolumen in einer

isobaren Zustandsänderung. Dort gilt das Gasgesetz.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (p = \text{konst})$$



Postulat Kelvin

Bei der Temperatur von -273.16°C sei das Gasvolumen Null, weil die thermische Bewegung 0 ist.

→ Dieser Punkt sei die tiefstmögliche Temperatur. Kelvin verwendete ihn als 0K -Punkt.

Beachte: Die Temperaturdifferenz von 1 Grad Celsius ist identisch mit der Differenz von 1 Kelvin.

Die Kelvin-Temperaturskala und die Celsius-Skala sind unabhängige Skalen. Die Naturwissenschaft verwendet üblicherweise die Kelvinskala.

3. Temperaturangaben in Amerika
Sie verwenden die Skala nach Fahrenheit.

$$\vartheta_F = 1.8 \cdot \vartheta_{0^\circ\text{C}} + 32$$

29.3 Thermische Ausdehnung

Die erhöhte Bewegung der Atome im Warmzustand bewirkt, dass sich ein Stoff im Normalfall ausdehnt.

29.3.1 die lineare Ausdehnung eines Stabes

$$\ell_{\vartheta} = \ell_0 \cdot \Delta\ell$$

$$\Delta\ell = \ell_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta$$

Definition α :

Linearer Längenausdehnungskoeffizient (empirisch gewonnen)

Er gibt an, um wie viel sich ein Stab von 1 m Länge bei einem Grad Kelvin

verlängert.

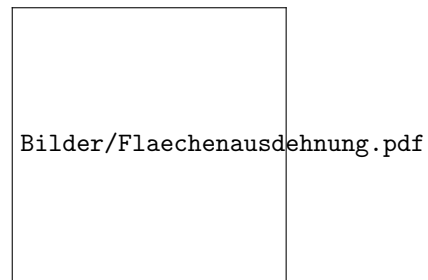
Werte siehe Kuchling s. 625 Tabelle 10

$$\rightarrow \ell_{\vartheta} = \ell_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

Feststellung: Die thermische Ausdehnung von Stoffen hat für die Konstruktion grosse Konsequenzen.

- Brücken sind mindestens einseitig auf Rollen gelagert
- Fahrdrähte werden gespannt
- Im Baubereich benötigt man Dilatationsfugen
- ...

29.3.2 Flächenausdehnung



$$A_{\vartheta} = \ell_{\vartheta} \cdot b_{\vartheta}$$

$$\ell_{\vartheta} = \ell_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

$$b_{\vartheta} = b_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

$$\ell_0 \cdot b_0 = A_0$$

$$A_{\vartheta} = A_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)^2$$

$$A_{\vartheta} = A_0 \cdot (1 + 2\alpha \Delta\vartheta + \alpha^2 \Delta\vartheta^2)$$

$\alpha^2 \Delta\vartheta^2$ ist vernachlässigbar klein

$$\rightarrow A_{\vartheta} = A_0 \cdot (1 + 2\alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

$2\alpha = \beta = \text{Flächenausdehnungskoeffizient}$

29.3.3 Volumenausdehnung

$$A_{\vartheta} = \ell_{\vartheta} \cdot b_{\vartheta} \cdot h_{\vartheta}$$

$$\ell_{\vartheta} = \ell_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

$$b_{\vartheta} = b_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

$$h_{\vartheta} = h_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

$$A_0 = \ell_0 \cdot b_0 \cdot h_0$$

$$A_{\vartheta} = A_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)^3$$

$$A_{\vartheta} = A_0 \cdot (1 + 3\alpha \cdot \Delta\vartheta + 3\alpha^2 \cdot \Delta\vartheta^2 + \alpha^3 \cdot \Delta\vartheta^3)$$

$$3\alpha^2 \cdot \Delta\vartheta^2 + \alpha^3 \cdot \Delta\vartheta^3 \text{ ist vernachlässigbar klein}$$

$$A_{\vartheta} = A_0 \cdot (1 + 3\alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

$$3\alpha = \gamma = \text{Volumenausdehnungskoeffizient}$$

Werte siehe Kuchling s. 627

Für Flüssigkeiten sind γ -Werte tabelliert, für feste Stoffe α -Werte.

29.4 Dichteveränderung

$$\text{Dichte} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}}$$

Beim Erwärmen verändert sich das Volumen.

$$\text{Dichte}_{\vartheta} = \frac{\text{Masse}}{V_{\vartheta}}$$

Die Dichte aus der Tabelle wurden bei einer Temperatur von 20°C ermittelt. Bei der aktuellen Temperatur ist sie dann

$$\rho_{\vartheta} = \frac{m}{V_{20} \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\vartheta)}$$

$$\rho_{\vartheta} = \rho_{20} \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\vartheta)^{-1}$$

$$\rho_{\vartheta} = \rho_{20} \cdot (1 - \gamma \cdot \Delta\vartheta + \gamma^2 \cdot \Delta\vartheta^2 - \gamma^3 \Delta\vartheta^3)$$

$$\gamma^2 \cdot \Delta\vartheta^2 - \gamma^3 \Delta\vartheta^3 \text{ ist vernachlässigbar}$$

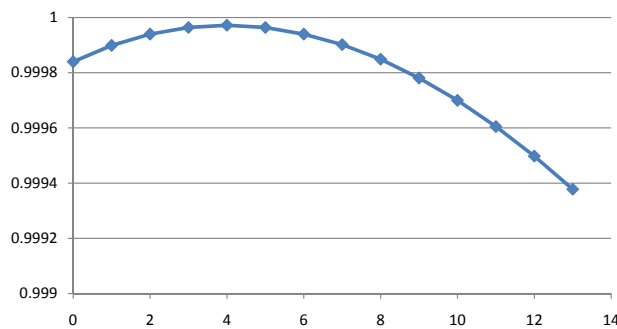
$$\rho_{\vartheta} = \rho_{20} \cdot (1 - \gamma \cdot \Delta\vartheta)$$

Die meisten Stoffe verhalten sich nach dieser Funktion. Für genaue Berechnungen müsste die unlinearität von α beachtet werden. → führt zu integralen Ansätzen.

Wasser verhält sich anormal. → Es zeigt Anomalie.

29.5 Anomalie des Wassers

Dichtverlauf des Wassers im untersten Temperaturbereich



Werte siehe Kuchling s. 629

Feststellung: Die Dichte von Wasser ist bei 4°C am höchsten. Dies hat zur Folge, dass ein genügend tiefer See im unteren Bereich immer 4°C hat. Kühlt sich ein See so stark ab, dass die Oberflächentemperatur tiefer als 4°C ist, so gab es einen Kippunkt, bei welchem der ganze See 4°C hatte.

29.6 Dichtesprung beim Erstarren von Wasser

Ein normaler Stoff wird beim Übergang flüssig-fest eine Metall- oder Kristallstruktur aufbauen. Bei diesem Umbau wird die Dichte markant ansteigen.

Ändert Wasser den Aggregatzustand, fällt die Dichte von fast $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ auf $917 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Feststellung: Das Eis schwimmt auf dem Wasser. Eine komplette Vereisung von Seen und Meeren wird dadurch verhindert.

29.7 1. Hauptsatz der Wärmelehre

Wärme ist kinetische Energie

Für diese Energie gilt der Energiesatz nur im atomaren Bereich. Im Makroskopischen wirken Einschränkungen.

Auswirkungen der Energiemenge in einem Stoff.

$$W_{th} = W_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Je nach Beweglichkeit kann ein Atom oder Molekül auf verschiedenen Freiheitsgraden Energie speichern. Ist das Energieniveau relativ tief, so schwingen die Atome, Moleküle um einen statistischen Ruheort. Zwischen ihnen wirken Bindungskräfte. Der Stoff ist im ersten Aggregatzustand, er ist fest.

Wird die Energie erhöht, werden die Bindungskräfte überwunden. Es herrschen nur noch schwache Kohäsionskräfte. Die gegenseitige Verschiebbarkeit wird sehr gut. → Der Stoff ist flüssig.

Bei nochmaliger Energieerhöhung werden alle Kräfte überwunden. Das Atom, Molekül verlässt den Verband und bewegt sich im freien Raum. Dies ist der dritte Aggregatzustand, der Stoff ist gasförmig.

29.8 Wärmeenergie

Für die Beschreibung der Wärmeenergie wird nicht die innere kinetische Energie verwendet, sondern empirisch gefundene Standardgrößen.

Wird ein Massestück um $\Delta\vartheta$ erwärmt, so benötigt man die Energie

$$Q = m \cdot \Delta\vartheta \cdot c$$

c : spezifische Wärmekapazität; Es ist diejenige Wärmemenge, die benötigt wird um ein kg des entsprechenden Stoffes um 1° zu erwärmen.

Werte siehe Kuchling s. 629 - 631

Ist der Stoff in Gasform, so muss unterschieden werden zwischen einer isobaren Erwärmung, dann gilt c_p , und einer isochoren Erwärmung, dann gilt c_v .

Werte siehe Kuchling s. 632

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Vor Bor verwendete man als Energie-Grundeinheit die spezifische Wärmekapazität von Wasser.

$$1 \text{ Wärmeenergieeinheit} = c_{Wasser} = 4182 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Man sagte ihr Kilokalorie.

29.9 Wärmekapazität C

Die spezifische Wärmekapazität ist definiert über

$$c = \frac{C}{m}$$

C : Wärmekapazität

c. spezifische Wärmekapazität

$$\rightarrow \underline{Q = c \cdot m}$$

29.10 Heizwert

Muss Wärmeenergie erzeugt werden, können verschiedene Umwandlungsprozesse verwendet werden.

- Elektrischer Widerstand

$$P = \frac{U^2}{R} = U \cdot I = I^2 \cdot R$$

$$P = \frac{\text{Überführte elektrische Energie in Wärmeenergie}}{\text{Zeit}} = \frac{U^2}{R}$$

- Reibarbeit

$$Q = F_R \cdot s$$

- Oxidationsprozess
ein typischer Heizstoff wird mit Sauerstoff verbunden. Dieser Prozess ist exotherm. Der abgegebenen Energie sagen wir Heizenergie.
- Fusion (atomare Fusionsenergie)
Wird Wasserstoff zu Helium fusioniert, entsteht Fusionsenergie in Form von Wärme.
- Spaltungsenergie (atomare Spaltungsenergie)
Genügend grosse Atome lassen sich spalten. Die abgegebene Spaltungsenergie ist Wärmeenergie.

29.11 Heizwert

Es ist diejenige Energie, die freigesetzt wird, wenn 1 kg des betreffenden Heizstoffes verbrannt wird.

Werte siehe Kuchling s. 633

$$\text{z.B. Benzin} \quad 42 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \approx 40 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$$

29.12 Aggregatzustände

Ein Stoff kann sich nach seinem Energiezustand in einem der vier Aggregatzustände befinden.

- fester Körper
Zwischen den einzelnen Atomen, Molekülen wirken relativ grosse Bindungskräfte. Der Stoff besitzt eine Form und ein Volumen. Die Form lässt sich unter Krafteinwirkung verändern.

→ Formelastizität

Die Atome, Moleküle bewegen sich um eine statistische Ruhelage.

- Flüssigkeit Zwischen den Atomen, Molekülen herrschen nur noch relativ schwache Kohäsionskräfte. Die verschiebbarkeit ist gross. Die einzelnen Moleküle schwingen um eine Ruhelage. Der Geschwindigkeitsvektor ist nicht mehr null.

→ Diffusionsvektor

- Gase

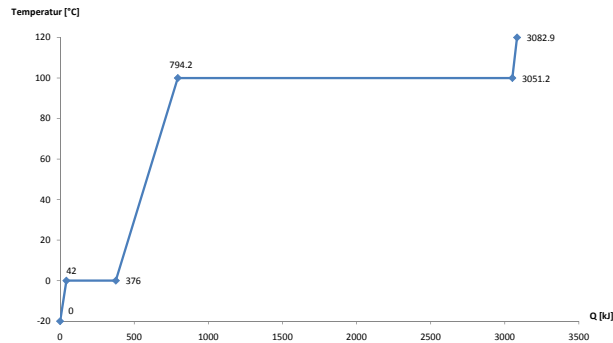
zwischen den Molekülen, Atomen herrscht praktisch keine Kraft. Die innere Energie verteilt sich auf die möglichen Freiheitsgrade.

→ Die translative Geschwindigkeit ist sehr hoch.

- Plasma

Durch den Zusammenprall einzelner Atome werden diese in Atomkerne und Elektronen aufgetrennt.

Wir wollen stellvertretend für andere Stoffe die Aggregatzustände am Beispiel Wasser genauer untersuchen.



1. Eis erwärmt sich von -20 auf 0 °C.

$$Q_1 = m_{Eis} \cdot c_{Eis} \cdot \Delta\vartheta$$

$$m_{Eis} = 1[kg]$$

$$c_{Eis} = 2.1 \cdot 10^3 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] \quad \text{siehe Kuchling s. 630}$$

2. Zufuhr der Schmelzenergie

$$Q_2 = m_{Eis} \cdot q$$

q :spezifische Schmelzwärme

$$q_{Eis} = 334 \cdot 10^3 \left[\frac{J}{kg} \right] \quad \text{siehe Kuchling s. 634}$$

Beachte: Beim Zuführen der Schmelzenergie bleibt die Temperatur konstant.

3. Wasser wird erwärmt

$$Q_3 = m_{Wasser} \cdot c_{Wasser} \cdot \Delta\vartheta$$

$$m_{Wasser} = 1[kg]$$

$$c_{Wasser} = 4182 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

$$\Delta\vartheta = 100[K]$$

4. Zufuhr der Verdampfungsenergie

$$Q_4 = m_{Wasser} \cdot r$$

r :spezifische Verdampfungswärme

$$r_{Dampf} = 2257 \cdot 10^3 \left[\frac{J}{kg} \right] \quad \text{siehe Kuchling s. 639}$$

5. Erwärmen des Wasserdampfes

$$Q_5 = m_{Dampf} \cdot c_{Dampf} \cdot \Delta\vartheta$$

$$m_{Dampf} = 1[kg]$$

$$c_{Dampf} = 1.585 \cdot 10^3 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Feststellung: Beim Aggregatswechsel bleibt die Temperatur konstant. Beim Wechsel Flüssig \rightarrow Gasförmig ist die Energiezufuhr sehr gross.

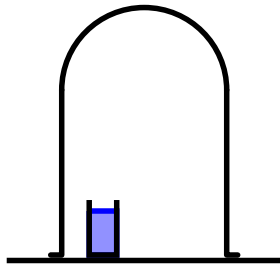
\rightarrow Ein Gas hat sehr viel innere thermische Energie.

Läuft der Prozess in umgekehrter Richtung, so heisst die Verdampfungsenergie Kondensationsenergie und die Schmelzenergie Kristallisationsenergie. Diese Energien müssen dann jeweils abgegeben werden.

29.13 Verdunsten

Versuch: Wir lassen einen Rezipienten vollkommen vakuumieren. In diesem Zustand stellen wir mit Geisterhand ein Glas Wasser in den Vakuumraum.

Feststellung



Die Flüssigkeit beginnt plötzlich zu verdampfen (kochen). Im Rezipient wird ein Druck aufgebaut. Dieser ist stabil, jedoch abhängig von der Wassertemperatur. Beachte: Wenn das Wasser siedet, entstehen Dampfblasen. In diesen Dampfblasen ist der Dampfdruck gleich gross wie der Aussendruck! (Definition von Sieden)

29.14 Relative Feuchte im Wohnzimmer

Ist im Wohnraum die Luft zu trocken, über nimmt sie von allen Feuchtepunkten Wasserdampf. Sie entnimmt auch den Schleimhäuten Feuchtigkeit → Der Abwehrmechanismus ist gestört.

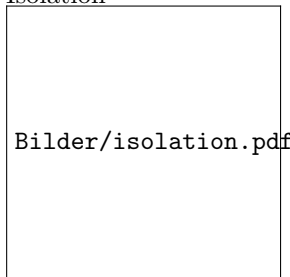
Ist die relative Feuchte zu hoch, funktioniert das körpereigene Temperaturreguliersystem nicht mehr optimal. Das von den Schweißdrüsen ausgestossene Wasser kann nicht mehr verdampfen.

Die optimale Feuchte liegt im Bereich zwischen 40 und 60 %.

29.15 Folgen des Dampfes in verschiedenen Bereichen

29.15.1 Baubereich

- Isolation



Taupunkt:

In diesem Punkt wird der Dampfsättigungswert erreicht

→ Es bildet sich Kondensat.

Dampfsperre:

Wasserdampfundurchlässige Schicht (Dampfdiffusionsfest)

Sie muss auf der Warmseite eingelegt werden.

- Fenster

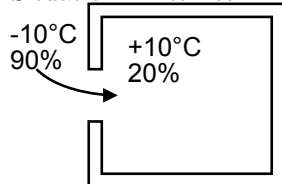
Infolge der Innenzirkulation entsteht an der Scheibe eine Strömung. Am

untersten Punkt wird oftmals der Taupunkt erreicht. Es erscheint ein Kondensatband.

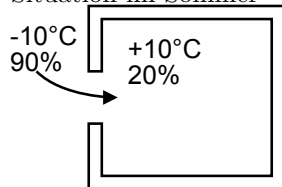
Dieses benetzt die untere Glasleiste.

Ist sie aus Holz, wird sie zu faulen beginnen.

Situation im Winter

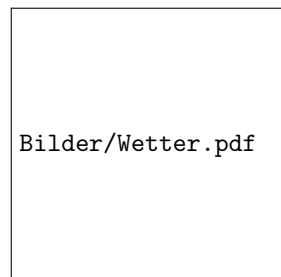


Situation im Sommer



Feststellung: Im Sommer wird vor allem in Gewittersituation warme Feuchtluft beim Lüften in den Keller eingelassen. Diese Luft kühlt auf Kellertemperatur ab. Dabei wird der Taupunkt überschritten. Es bildet sich Kondensat an den Kaltstellen.

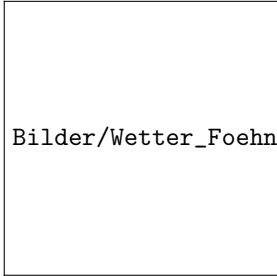
29.15.2 Wetter



Feststellung: Am Berg (Fels) entsteht Warmluft. Daraus entsteht die Thermik. Die aufsteigende Luft erreicht den Taupunkt. Dies ist die Basis der Gewitterwolke.

bei einer Insel bewirkt der aufsteigende Thermikstrom infolge der Corioliskraft eine Zirkularströmung im Gegenuhrzeigersinn.

Fallwind (Föhn)



Bilder/Wetter_Foehn.pdf

Feststellung: Muss eine Luftströmung eine Bergkette überqueren, wird sie beim anheben abgekühlt. Das Kondensat wird "ausgeregnet", evtl. "ausgeschneit". Die abgegebene Wärmeenergie wird von der Luft übernommen. nach der Überquerung erscheint die Luft warm und trocken.

29.15.3 Gasbehälter

Gas ist Dampf. Der Dampfdruck ist abhängig von der Systemtemperatur.

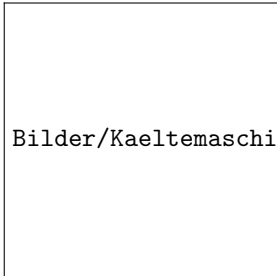
→ Der Dampfdruck in der Gasflasche ist ein Dampfdruck.

Befindet sich eine Gasflasche nahe einem Brandherd, so steigt der Gasdampfdruck infolge der Erwärmung stark an. Er wird den Berstdruck der Flasche erreichen.

→ Explosionsgefahr!

29.15.4 Kältemaschine (Wärmepumpe)

Wärmepumpen sind Einrichtungen, welche für die Erzeugung von Kälte oder Wärme verwendet werden können. Sie haben heute (2010) eine Leistungszahl von üblich 3.



Bilder/Kaeltemaschine.pdf

Diese Einrichtungen werden für Heizanlagen verwendet. Die Primärenergie nimmt man dann aus der Luft (Luft-Wasser-Wärmepumpe), aus Grund- oder Seewasser oder aus dem Erdinnern mit einer Erdsonde.

Das Verhältnis von gewonnener Energie zu aufgebrauchter Energie gleich Leistungszahl, Leistungsziffer ≈ 3

$$\frac{\text{gewonnene Energie}}{\text{aufgebrachte Energie}} \cong 3$$

29.15.5 Trocknungsprozess

Wäschetrocknung ist nur möglich, wenn die relative Feuchte tiefer ist als 100 %.
eine effiziente Lufttrocknung im Trockenraum erreicht man durch einen Kalt-
punkt.

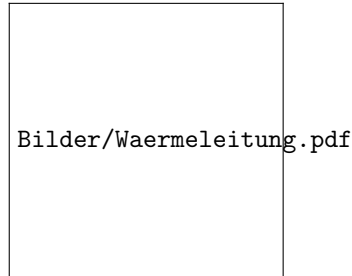
Bei Farbanstrichen ist der Raum gut zu lüften, damit die relative Feuchte
bezüglich dem verwendeten Lösungsmittel tief bleibt.

29.16 Wärmeausbreitung

Wärme lässt sich über 3 verschiedene Grundprinzipien verschieben.

1. Wärmeleitung
Wärmeübertragung durch Materie ohne Materialtransport.
Übertragung von Schwingungsenergie
2. Konvektion
Wärmeübertragung durch Materie mit Materialtransport.
Werden Körper verschoben, werden gleichzeitig ihre Wärmeinhalte ver-
schoben.
3. Wärmestrahlung
Wärmeübertragung durch elektromagnetische Wellen.
Ein warmer Körper strahlt in die kältere Umgebung ab.
Naturerscheinung

29.16.1 Wärmeleitung



Die übertragene Wärmemenge pro Zeit ist umso grösser

- Je grösser der Querschnitt A ist.
- Je kleiner die Länge ℓ ist.
- Je besser das betreffende Material leiten kann.
→ Wärmeleitfähigkeit
- Je grösser die Temperaturdifferenz ist.

$$\frac{Q}{t} = \frac{A}{\ell} \cdot \Delta t \cdot \lambda \quad \left[\frac{Ws}{s} = W \right]$$

λ : Wärmeleitfähigkeit

Werte siehe Kuchling s. 644

$$\text{z.B. } \lambda_{Al} = 220 \left[\frac{W}{m} \cdot K \right]$$

$$\lambda_{Luf} = 0.026 \left[\frac{W}{m} \cdot K \right]$$

Eine gute Leitfähigkeit bezüglich Wärme zeigen die guten elektrischen Leiter. Prozesswärmen von Halbleitern werden über Wärmeleitung abgeführt.

29.16.2 Ohmsches Gesetz der Wärmelehre für Elektroniker

Elektrischer Kreis:

$$I = \frac{U}{R}$$

U : treibende Grösse

R : hemmende Grösse

I : strömende Grösse Thermischer Kreis:

$$I = \frac{\Delta\vartheta}{R_{th}}$$

$\Delta\vartheta$: Temperaturdifferenz treibende Grösse

R_{th} : thermischer Widerstand hemmende Grösse

I : Wärmestrom strömende Grösse

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{\Delta\vartheta}{R_{th}} = \Delta\vartheta \cdot \frac{\kappa \cdot A}{\ell}$$

$$\rightarrow R_{th} = \frac{\ell}{A \cdot \lambda} \quad \left[\frac{m \cdot m \cdot K}{m^2 \cdot W} = \frac{K}{W} \right]$$

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{\Delta\vartheta \cdot \lambda \cdot A}{\ell}$$

Diese thermischen Widerstände lassen sich nun serie, parallel oder gemischt schalten. Die Berechnung des Gesamtwiderstandes erfolgt gleich wie bei elektrischen Widerständen. Beispiel: Einelektronisches Bauelement erzeugt eine Verlustleistung. Diese muss weggeführt werden.

Ersatzschaltung

Bilder/Kuehlung_Elektronik.pdf

Beim Aufbau einer solchen "Kühlschaltung" nimmt der Elektroniker Einfluss auf $R_{th_{CH}}$ bei der Montage (sollte bei Wärmepaste und guter Kontaktgabe der kleinst mögliche R_{th} erreicht werden).

$R_{th_{HA}}$: Dieser Widerstand wird ab Katalog eingekauft.

Für den Normalfall ergibt sich folgende Situation:

geg. $I, \Delta\vartheta$

ges. 1. Stufe:

$R_{th_{JC}}$ (Transistor Typ)

$R_{th_{CH}}$

2. Stufe:

$R_{th_{HA}}$

Lösung: $R_{th_{JC}}, R_{th_{CH}}$

Diese beiden Widerstände ergeben sich durch die Wahl des Transistortyps.

Die Eingangsgrößen für diese Widerstände sind:

maximaler Strom, Spannung, Verlustleistung

$R_{th_{HA}}$

Dieser Widerstand wird über die wärmetechnischen Größen gerechnet.

$$R_{th_{tot}} = \frac{\Delta\vartheta}{I}$$

I = Verlustleistung P

$$R_{th_{tot}} = R_{th_{JC}} + R_{th_{CH}} + R_{th_{HA}}$$

$$R_{th_{HA}} = R_{th_{tot}} - R_{th_{CH}} - R_{th_{JC}}$$

Beachte: Wird dieser Widerstand negativ, so muss vermutlich ein besser geeigneter Transistor ausgewählt werden.

29.16.3 Konvektion

Wird Material verschoben, so wird auch deren Wärmeinhalt verschoben.

Wärmeinhalt in der Masse

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta$$

m : verschobene Masse

c : spezifische Wärmekapazität

$\Delta\vartheta$: Temperaturdifferenz zu Referenzpunkt.

Die Konvektion ist die Verschiebeart von Wärme in Heizungssystemen.

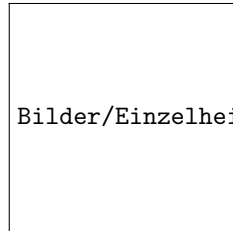
Funktion der einzelnen Heizsysteme

Einzelheizung

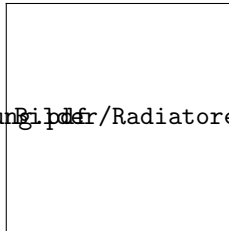
Radiatorheizung

Bodenheizung

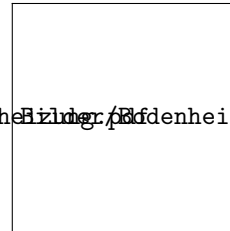
Bodenheizung mit
Zusatzradiator



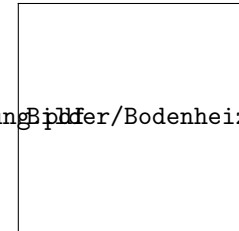
Am Boden ist eine Kaltströmung



Die Wärme wird über Warmwasser zugeführt. Die Temperatur ist relativ gross.



Der Heizkörper ist im Unterlagsboden eingebaut. Beachte: Der Unterboden macht Längenausdehnung. Im Fensterbereich erscheint ein Kaltluftvorhang



Der Zusatzradiator verhindert den Kältevorhang.

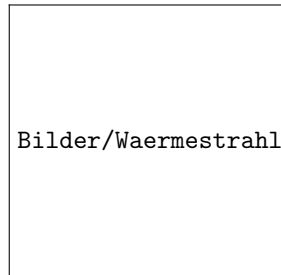
29.16.4 Wärmestrahlung

Ein warmer Körper (Materie) strahlt elektromagnetische Wellen in die Umgebung ab. Umgekehrt übernimmt ein kalter Körper Wärmestrahlung aus der wärmeren Umgebung.

Strahlungsemission

Befindet sich ein warmer Körper in einer 0 K Umgebung, so ist die abgestrahlte Leistung umso grösser,

- je grösser die Oberflächentemperatur,
- je grösser die Oberfläche,
- je grösser das Absorptionsvermögen (Teilstrahlungsvermögen) ist.



Bilder/Waermestrahlung.pdf

$$P = A \cdot \vartheta_K^4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma$$

ϑ_K : Oberflächentemperatur in Kelvin

ε : Teilstrahlungsvermögen, Emissionsgrad, Absorptionsvermögen

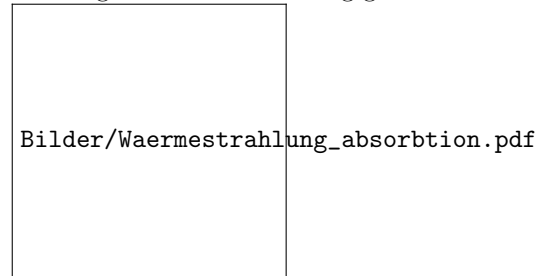
Werte siehe Kuchling s. 648 - 649

$\varepsilon_{schwarz} = 1$

$\varepsilon_{weiss} = 0$

29.16.5 Strahlungsabsorption

Die aufgenommene Strahlung gehorcht denselben Gesetzmässigkeiten.



$$P_{abs} = A \cdot \vartheta_U^4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma$$

Befindet sich ein warmer Körper in einer kälteren Umgebung, so ergibt sich die aufgenommene Strahlungsleistung aus der Differenz

$$P_{auf} = P_{Em} - p_{abs}$$

$$P_{auf} = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma (\vartheta_K^4 - \vartheta_U^4)$$

Achtung: Alle Grössen sind SI. Die Temperatur ist in Kelvin.

29.17 Temperaturmessung

29.17.1 Flüssigkeitsthermometer

Sie beruhen auf der Ausdehnung von Flüssigkeiten, wenn sie erwärmt werden.

Die Messung der Ausdehnung erfolgt in einer Kapillare.

Füllmedien

- Quecksilber
– $-38 \div +630^\circ C$
- Alkohol
– $-110 \div +50^\circ C$
- Toluol
– $-90 \div +100^\circ C$

Vorteil:

- einfach
- gleichbleibend genau

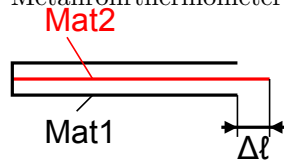
Nachteil

- grosser Temperaturfühler, daher träge
- Fernablesung nicht möglich

29.17.2 Metallausdehnungsthermometer

Sie beruhen auf der thermischen Ausdehnung von zwei ungleichen Metallen.

Metallrohrthermometer



$$\Delta \ell = f(\vartheta)$$

Bimetallthermometer



Vorteil:

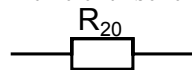
- Längenausdehnung kann direkt für Schaltvorgänge verwendet werden. (Zweipunktregler)
- sehr einfach

Nachteil

- grosser Temperaturfühler

29.17.3 Widerstandsthermometer

Der elektrische Widerstand ist abhängig von der Temperatur.



$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta)$$

Für genaue Messung

$$R_{\vartheta} = r_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta + \beta^2 \cdot \Delta\vartheta^2)$$

$$\beta_{Nickel} = 9 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$$

$$\beta_{Platin} = 0.6 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$$

$$\beta_{Blei} = 2 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$$

Für Platinfühler werden üblicherweise Zahlentabellen verwendet.

$$R_{\vartheta} = f(\vartheta)$$

Vorteil:

- einfach
- sicher
- schnell

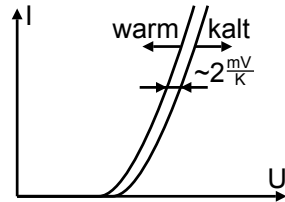
Nachteil

- Für genaue Messung ist der apparative Aufwand relativ gross. Ist als IC erhältlich.

29.17.4 Diodenthermometer

Funktion:

Die Durchlasskennlinie einer Diode verschiebt sich pro Kelvin um ~ 2 mV.



Vorteil:

- Die Basis-Emitterstrecke eines Leistungstransistors kann direkt für die Temperaturmessung herangezogen werden.
- Kleiner Temperaturfühler
- Fernmessung möglich

Nachteil

- Nicht für exakte Messungen verwendbar
- Relativ grosser Aufwand

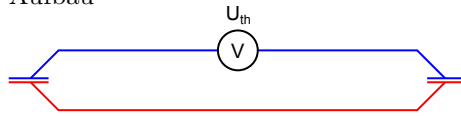
29.17.5 Thermoelement

Werden zwei verschiedene Metalle durch Schweissung kontaktiert, entstehen infolge materialtechnischer Eigenschaften zwei Effekte:

1. Seebeckeffekt
2. Peltiereffekt

Auch Halbleiter zeigen diese Effekte.

Aufbau



$$U_{th} = f(\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (\text{Seebeck})$$

Diese Funktion ist zwar nicht linear, aber sehr exakt. Wird üblicherweise durch eine Zahlentafel beschrieben. Der eine Punkt ist der Messpunkt, der andere befindet sich auf einer Referenztemperatur. Üblich ist ein Eis-Wasser-Referenzpunkt. In elektronischen Geräten wird dieser Eis-Wasser-Punkt mit einem Widerstandnetzwerk realisiert.

Vorteil:

- sehr kleine Messfühler
- Fernmessung möglich
- sehr genau

Nachteil

- Grosser exakter Apparatenaufwand
- Verlängerung nur möglich mit den selben Materialien.
- Eis-Wasser-Punkt muss nachjustiert werden.

Klassische Paarungen:

Kupfer-Konstantan

Eisen-Konstantan

Platin-Rhodium

Gold-Silber

...

Wird ein Thermoelement bestromt, so driften die beiden Kontaktstellen Temperaturmässig auseinander (Peltiereffekt).

29.17.6 Gasdruck und Dampfdruckthermometer

Gasdruckthermometer verwenden die Gasgesetze. Bei idealen Gasen sind diese linear.

Dampfdruckthermometer reagieren auf den temperaturabhängigen Dampfdruck einer Flüssigkeit.

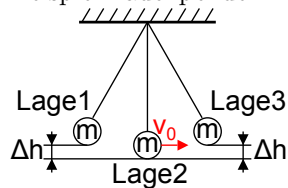
Beide Messverfahren benötigen für die Anzeige ein Manometer. Diese Manometer werden üblicherweise so ausgebildet, dass sie direkt auf einen Schalter wirken. → Zweipunktregler

Diese Regler werden verwendet für die Steuerung von z.B. Haushaltsmaschinen.

30 Mechanische Schwingungen

Eine Schwingung ist ein zeitlich periodischer Vorgang, bei welchem Energie von der einen Form mit einem genügend hohen Wirkungsgrad in eine Andere überführt wird und umgekehrt.

Beispiel Fadenpendel



Lage 1: Die gesamte Systemenergie ist in Form von potentieller Energie vorhanden.

$$W_{tot} = W_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

Lage 2: Die gesamte Systemenergie ist in Form von kinetischer Energie vorhanden.

$$W_{tot} = W_{kin} = \frac{m \cdot v_0^2}{2}$$

Lage 3: Die gesamte Systemenergie ist in Form von potentieller Energie vorhanden.

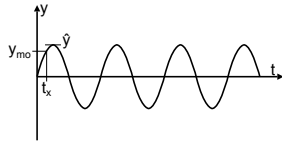
30.1 Eigenschaften der Schwinger

Durch Anstossen wird ein Schwinger in seiner Eigenfrequenz (Resonanzfrequenz) angeregt. Diese Eigenfrequenz ist höchst stabil.

Die Stärke des Anstosses bestimmt nur die Grösse der Amplitude. sie hat keinen Einfluss auf die Eigenfrequenz.

Ist die rücktreibende Kraft proportional zur Auslenkung, so ist die Schwingbewegung harmonisch. (Eine harmonische Schwingbewegung ist sinusförmig.

Weg-Zeit-Diagramm der harmonischen Schwingbewegung



$$y_{m0} = \hat{y} \cdot \sin(\omega t) = y_0 \cdot \sin(\omega t)$$

30.2 Die innere Energie der vier Grundschringer

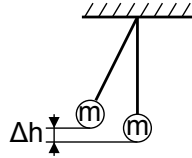
Ein Schwinger zeigt in der Lage 1 diese gesamte Energie in der statischen Energieform.

Pendel

W_{stat}

W_{dyn}

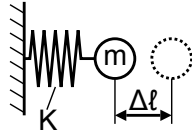
Fadenpendel



$$W_{pot} = m \cdot g \cdot \Delta h$$

$$W_{kin} = \frac{m \cdot v_o^2}{2}$$

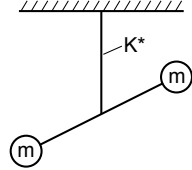
Federpendel



$$W_{Fed} = \frac{\Delta \ell^2 \cdot K}{2}$$

$$W_{kin} = \frac{m \cdot v_o^2}{2}$$

Torsionspendel



$$W_{Fed} = \frac{\varphi^2 \cdot K^*}{2}$$

$$W_{kin} = \frac{J_a \cdot \omega_o^2}{2}$$

$$P \cdot t = M \cdot \omega \cdot b$$

$$W = M \cdot \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{\varphi}{\varphi}$$

$$K^* = \frac{M}{\varphi}$$

elektrischer Schwingkreis



$$W_{el} = \frac{U^2 \cdot C}{2}$$

$$W_{magn} = \frac{I^2 \cdot L}{2}$$

30.3 Daten der Schwinger

Fadenpendel

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad f = \frac{1}{T}$$

ℓ : Pendellänge

Beachte: Mit einem Pendel lässt sich die Gravitationskonstante messen. (Reversionspendel)

Federpendel

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{K}} \quad \left[\sqrt{\frac{kg \cdot m}{N}} = \sqrt{\frac{kg \cdot m \cdot s^2}{kg \cdot m}} = s \right] \quad !$$

Torsionspendel

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{K^*}}$$

Mit einem Torsionspendel lässt sich das polare Massenträgheitsmoment messen.

Elektrischer Schwingkreis

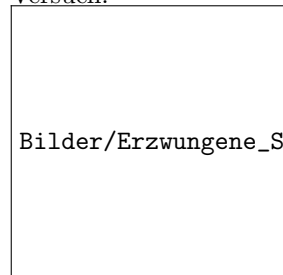
$$T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

Beachte: Die Resonanzfrequenz eines Systems sollte um Faktor 3 oder grösser neben der Betriebsfrequenz liegen.

30.4 Erzwungene Schwingung

Wird ein schwingfähiges System auf einer Frequenz angeregt, so ergibt sich eine Schwingamplitude, welche von diversen Parametern abhängig ist.

Versuch:



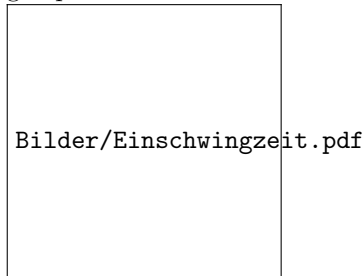
Schwingergüte

$$\frac{y_{max}}{y_E} = Q$$

Diese Güte ist eine Folge der inneren Dämpfung. Mit einem Dämpfelement lässt sich Schwingenergie in Wärme überführen. Der Schwinger wird gedämpft. (Stossdämpfer beim Auto)

30.5 Einschwingzeit

Wird ein Schwinger mit einer konstanten Amplitude erregt, so steigt die Schwingamplitude mit einer e -Funktion an.



Beachte: Die Einschwingzeit t_e ist umso grösser,

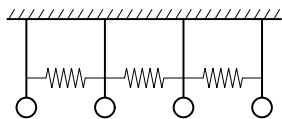
- je grösser die Schwingergrösse Q ist,
- je tiefer die Resonanzfrequenz ist.

31 Wellen

Kennzeichen einer Welle

- Sie kann sich in einem Schwingerraum bewegen.
Sie ist die Folge einer Störung.
- Im Schwingerraum sind elementare Schwinger elastisch miteinander verkuppelt.
- Eine Schwingung ist ein zeitlich und räumlich periodischer Vorgang.
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Störung ist endlich.

31.1 Schwingermodell reduziert auf eine Dimension



Wird dieses System auf dem ersten Schwinger in Längsrichtung angestossen, so bewegt sich eine Welle von longitudinaler Art vom Störungspunkt weg.

Wird das erste Element quer zur Längsrichtung angestossen, so bewegt sich eine Welle von transversaler Art vom Störungspunkt weg.

Beispiel Longitudinalwelle: Schallwelle in Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen

Beispiel Transversalwelle: Seilwelle
Erdbebenwelle
Elektromagnetische Welle

Transversalwellen benötigen Raum senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung. Hat sie diesen Raum nicht, ist die Fortpflanzung nicht möglich.

→ eine Transversalwelle lässt sich polarisieren, eine Longitudinalwelle nicht.
Polarisationsmittel

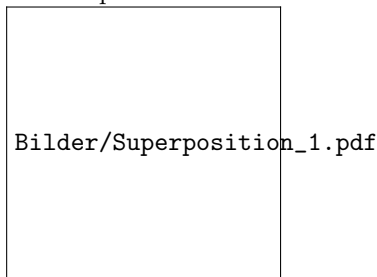
Für Lichtwellen: Polarisationsfilter → Im Glas sind Stäbe eingelassen

Elektromagnetische Wellen: Die Richtung des Dipols ist verantwortlich für die Polarisations-
ebene.

31.2 Überlagerung von Schwingungen (Superposition)

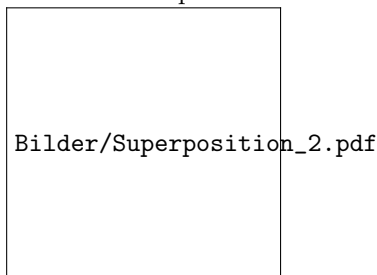
Wenn zwei oder mehr Schwingungen ineinander überlagern, so bildet sich eine neue Schwingung, die aus der Summe der jeweiligen Momentanwerte besteht. (Fourier)

1. Die Frequenz ist markant entfernt von der anderen. Ebenso der Pegel.



Beispiel: Rundsteuerung

2. die beiden Frequenzen sind nahe beieinander. Ebenso die Amplituden.



Die Interferenzfrequenz entspricht der Frequenzdifferenz $f_1 - f_2$ oder $f_2 -$

f_1 .

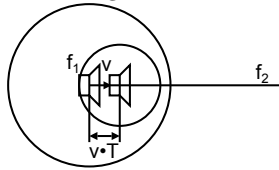
Zum Beispiel: Stimme von Musikinstrumenten

31.3 Dopplereffekt

Bewegt sich eine Schallquelle mit genügend hoher Geschwindigkeit an uns vorbei, so können wir eine Tonveränderung beim Vorbeifahren feststellen. Dies ist der Doppler-Effekt.

1. Bewegte Quelle, ruhender Beobachter

Annahme: Der Beobachter befindet sich auf der Wirkungslinie des Geschwindigkeitsvektors.



$$f_2 = f_1 \cdot \frac{1}{1 \mp \frac{v}{c}}$$

f_2 : Frequenz beim Beobachter

f_1 : Ursprünglich erzeugte Frequenz

v : Bewegungsgeschwindigkeit der Quelle

c : Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle

\mp : +, wenn die Quelle sich von uns weg bewegt, -, wenn die Quelle sich auf uns zu bewegt.

Beachte: Mit diesem Zusammenhang lässt sich auch eine Geschwindigkeit ermitteln.

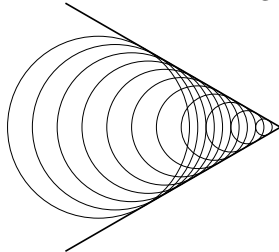
Wird Licht von einem Stern spektral untersucht, weisen die Spektrallinien eine Verschiebung zum Rot hin auf.

→ Die Materie verschiebt sich von der Erde Weg.

→ Die Materie im All dehnt sich aus als Folge des Urknalls.

Spezialfall $v > c$

Untersuche mit einer geometrischen Zeichnung den Fall $v = 2c$



Feststellung: Der Ort mit der höchsten Energiedichte erkennt man an der

”Strichdichte”. Es ist ein Kegel (Machscher Kegel). Er wird vor dem Fahrzeug hergeschoben. Trifft mich dieser Kegel als Beobachter, so nehme ich eine starke Druckschwankung wahr (Überschallknall).

Wenn die Bewegungsgeschwindigkeit gleich groß ist wie die Schallgeschwindigkeit ($v = c$), bauen sich vor dem Fahrzeug noch stärkere Druckschwankungen auf.

Beim Flugzeug sagt man dann Schallmauer, beim Schiff vor dem Bug stehende Bugwelle. → Das Schiff läuft auf der Runpfgeschwindigkeit.

2. Ruhende Quelle, bewegter Beobachter

Wenn sich der Beobachter auf eine ruhende Quelle zu bewegt, wird die Frequenz ansteigen.

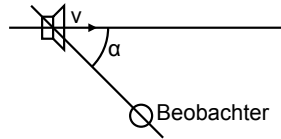
$$f_2 = f_1 \left(1 + \frac{v}{c} \right)$$

Bewegt er sich von der Quelle weg, wird die Frequenz sinken.

$$f_2 = f_1 \left(1 - \frac{v}{c} \right)$$

3. Allgemeiner Fall

Üblicherweise sind die Bewegungen so, dass der Geschwindigkeitsvektor nicht auf einer Wirkungslinie, welche zum Beobachter führt. Diese Funktionen sind dann an Kreisfunktionen gebunden.



(a) Fall: bewegte Quelle

$$f_2 = f_1 \cdot \frac{1}{1 \mp \frac{\vec{v} \cdot \cos \alpha}{c}}$$

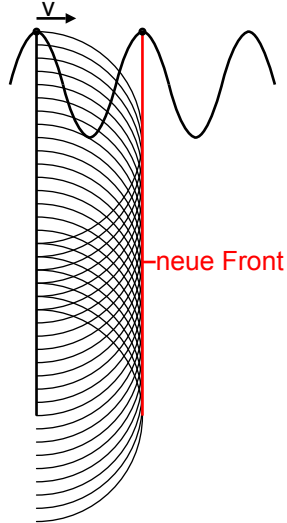
(b) Fall: bewegter Beobachter

$$f_2 = f_1 \cdot \left(1 \pm \frac{\vec{v} \cdot \cos \alpha}{c} \right)$$

Achtung: Der obige Prozess ist dynamisch, der Winkel verändert sich dauernd.

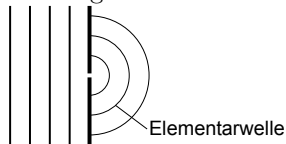
31.4 Fresnel-Huygensches Prinzip

jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer neuen Welle, einer sogenannten Elementarwelle betrachtet werden. Diese bewegt sich im gleichen Medium mit der gleichen Geschwindigkeit; mit der gleichen Wellenlänge.



Auswirkungen der obigen Theorie:

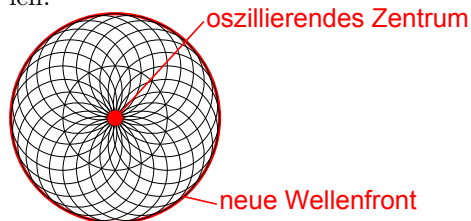
1. Steuerung



Feststellung: Wird mit obigem Hindernis eine Elementarwelle isoliert, bewegt sich hinter dem Hindernis eine neue Welle mit einem Öffnungswinkel von 180° .

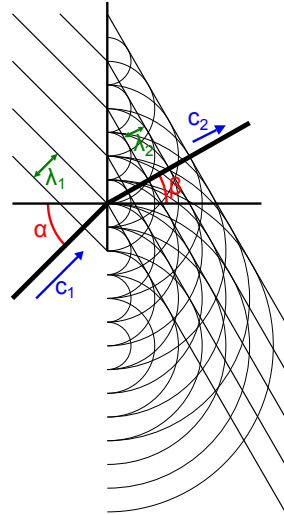
2. Kugelwelle

Lassen wir einen Stein in Wasser fallen, entstehen konzentrische Kreiswellen.



31.5 Refraktion

Trifft eine Wellenfront auf einen Übergang, bei welchem sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ändert, muss sich auch die Wellenlänge ändern, da die Frequenz gleich bleibt.



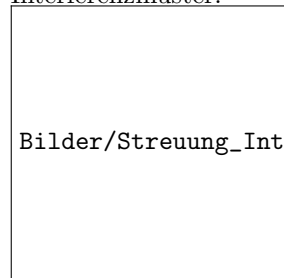
Brechungsgesetz

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{12}$$

In der Optik sind die Lichtgeschwindigkeiten relativ hoch. Man versteckt diese Grösse im Quotienten $\frac{c_0}{c_A}$ und nennt dies Brechungskoeffizient n_A . Diese sind dann im Tabellenbuch aufgeführt.

31.6 Streuung

Läuft die Welle auf ein Hindernis mit mindestens zwei Durchlässen (üblich sind mehrere in gleichbleibenden Abständen), zeigt sich hinter dem Hindernis ein Interferenzmuster.



Bilder/Streuung_Interferenz.pdf

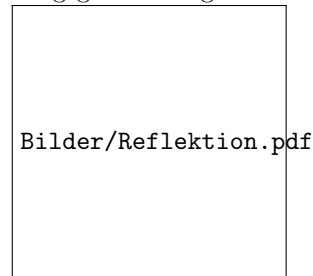
Feststellung: Der Ablenkswinkel α ist abhängig vom Hindernisabstand d (Gitterkonstante) und der Wellenlänge λ .

$$\rightarrow \alpha = f(\lambda)$$

Dieses Messverfahren wird im Gaschromatographen verwendet. Als Hindernis dient ein optisches Gitter.

31.7 Reflektion

Trifft eine Welle auf ein Hindernis, welches der Welle keine Energie entziehen kann, wird eine Welle reflektiert, welche die gleiche Amplitude und Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat.

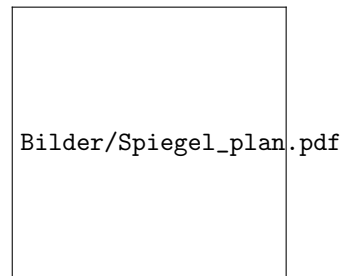


Feststellung: Der optische Eintrittswinkel α ist gleich gross wie der optische Reflektionswinkel α' .

31.8 Der plane Spiegel

Trifft ein Lichtstrahl auf einen planen Spiegel, so gilt das obige Reflektionsgesetz.

Jeder Objektpunkt eines Gegenstandes ist für unser Auge sichtbar, weil er reflektiertes Licht zu unserem Auge schickt. Wir sagen diesem Licht Lichtstrahl.

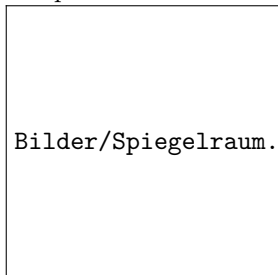


Feststellung: Das Auge meint, der Gegenstandspunkt sei dort, woher der Strahl kommt.

→ Das Auge meint, der Gegenstand sei hinter dem Spiegel.

31.9 Der Spiegelraum

Beispiel:



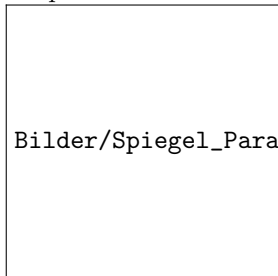
Bilder/Spiegelraum.pdf

Feststellung: Die Lösungsmenge steigt an, wenn der Öffnungswinkel α kleiner wird. Wenn $\alpha = 0$, wird die Lösungsmenge unendlich.

Diese Spiegeleigenschaften stellen wir bei allen Wellenarten fest, sobald die Oberflächenrauheit kleiner $\frac{1}{3}\lambda$ ist.

31.10 Die gekrümmte Spiegelfläche

Eine interessante Erscheinung zeigt sich, wenn die Wölbung der Spiegelfläche ein Paraboloid ist.



Bilder/Spiegel_Paraboloid.pdf

Feststellung: Strahlen, welche parallel zur Drehachse einlaufen treffen sich nach der Reflektion in einem Punkt. Definiert sich eine Quelle in diesem Brennpunkt, verlassen die Wellen den Spiegel parallel zur Drehachse.

31.11 Reflektionsarten

Eine Seilwelle, welche an einem festen Punkt aufläuft erzeugt eine reflektierte Welle von gleicher Amplitude mit einem Phasensprung.

Beachte: Die Beschleunigungen fast im Eingangspunkt sind "fast unendlich" gross. Die auftretenden Kräfte sind entsprechend hoch.

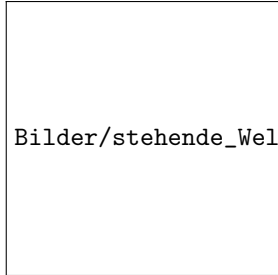
Eine Seilwelle, welche auf ein loses Ende zukommt erzeugt ebenfalls eine Reflektion von gleicher Amplitude, aber ohne Phasensprung.

Spezialfall der Reflektion: Stehende Wellen

Aufgabe: Untersuche die Reflektionssituation mit einer geeigneten Animation.

Feststellung: Wird eine Welle geradlinig abgesetzt, und sie trifft dabei auf ein Hindernis, so wird sie reflektiert. Wenn die Bedingungen wie in obiger Animation erfüllt werden, ergibt die Addition von vorlaufender und rücklaufender Welle

eine stehende Welle.



solche Systeme werden als Resonatoren eingesetzt. Sie haben dann die festen Frequenzen:

- f_1 : Grundwelle
- f_2 : 2. Harmonische (1. Oberwelle)
- f_3 : 3. Harmonische (2. Oberwelle)
- ...

Zeigt die Reflektionsstelle eine harte Reflektionsstelle, gilt für

$$f_1 : \quad \lambda_1 = 2\ell \quad \rightarrow f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{2\ell}$$

$$f_2 : \quad \lambda_2 = \ell \quad \rightarrow f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{c}{\ell}$$

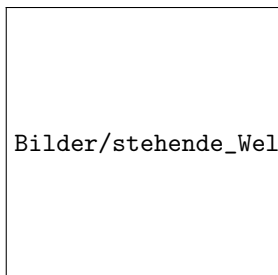
...

Beispiele für solche Resonatoren:

- Alle Saiteninstrumente
- Die geduckte Flöte

Ist die Reflektionsstelle eine weich reflektierende Stelle, so gilt:

An der Reflektionsstelle schwingt das Teilchen mit voller Amplitude.



$$f_1 : \quad \lambda_1 = 4\ell \quad \rightarrow f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{4\ell}$$

$$f_2 : \quad \lambda_2 = \frac{4}{3}\ell \quad \rightarrow f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3c}{4\ell}$$

$$f_3 : \quad \lambda_3 = \frac{4}{5}\ell \quad \rightarrow f_3 = \frac{c}{\lambda_3} = \frac{5c}{4\ell}$$

...

Beispiel: Wird in einem Zimmer mit parallelen Wänden ein Lautsprecher betrieben, so ergibt sich in allen Zimmerachsen (Länge, Breite, Höhe) eine stehende Welle.