

Formelsammlung

Physik II

<Marco.Moeller@macrolab.de>

Stand: 24.10.2005 - Version: 1.0.0

ERHÄLTlich UNTER [HTTP://PRIVAT.MACROLAB.DE](http://privat.macrolab.de)

Diese Formelsammlung basiert auf der Vorlesung "Physik II" von Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Achim Richter an der Technischen Universität Darmstadt im Sommersemester 2005.

Die folgende Formelsammlung steht zum kostenlosen Download zur Verfügung. Das Urheberrecht und sonstige Rechte an dem Text verbleiben beim Verfasser, der keine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Inhalte übernehmen kann.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|---|
| <p>1 Flüssigkeiten 2</p> <p>1.1 Aggregatzustände 2</p> <p>1.2 Flüssigkeiten unter Druck 2</p> <p>1.3 Grenzflächen 2</p> <p>1.4 Bewegung von Flüssigkeiten 3</p> <p>1.5 Viskosität 3</p> <p>2 Wärmelehre 4</p> <p>2.1 Empirische Gasgesetze 4</p> <p>2.2 Verallgemeinerung der Zustandsgleichung der Gase 4</p> <p>3 Mikroskopische Analyse des Gasdrucks 5</p> <p>3.1 Gastheorie 5</p> <p>3.2 Energiebetrachtungen und Freiheitsgerade 5</p> <p>3.3 Gasdruck und mittlere freie Weglänge . 5</p> <p>3.4 Transportphänomene-Diffusion und innere Reibung 5</p> <p>4 Wärme 6</p> <p>4.1 Definition und Begriffe 6</p> <p>4.2 Wärmemenge und spezifische Wärme . 6</p> <p>4.3 Spezifische Wärme von Gasen und 1.Hauptsatz 6</p> <p>4.4 Zustandsänderungen 7</p> | <p>5 Reale Gase 7</p> <p>5.1 Zustandsgleichung 7</p> <p>5.2 Phasenumwandlungen 8</p> <p>6 2. HS der Wärmelehre 8</p> <p>6.1 Verschiedene Formulierungen 8</p> <p>6.2 Kreisprozesse 8</p> <p>6.2.1 Carnot'sche Kreisprozess 8</p> <p>6.2.2 Verbrennungskraftmaschine 8</p> <p>6.2.3 Stirlingmotor 9</p> <p>6.3 Entropie 9</p> <p>7 Wellenbewegung in elastischen Medien 9</p> <p>7.1 Zeitliche und örtliche Ausbreitung einer Störung - Wellengleichung 9</p> <p>7.2 Harmonische Wellen 9</p> <p>7.3 Reflexion der Seilwelle und stehende Wellen 9</p> <p>7.4 Polarisierung einer Welle 10</p> <p>7.5 Torsionswelle 10</p> <p>7.5.1 Torsionspendelkette 10</p> <p>7.6 Schallwellen 10</p> <p>7.6.1 Schallwellen in Gasen 10</p> <p>7.6.2 Akustik 11</p> <p>7.6.3 Dispersion 11</p> <p>7.7 Dopplereffekt 11</p> <p>7.8 Masse Energieäquivalenz 11</p> <p>8 Energie und Energiedichte einer Welle 11</p> <p>9 Wellenausbreitung in mehreren Dimensionen 12</p> <p>9.1 Ebene Wellen und Kugelwellen 12</p> <p>9.2 Interferenz 12</p> <p>9.3 Beugung und Huygens'sches Prinzip . . 12</p> <p>9.4 Brechung 12</p> <p>9.5 Doppelerffekt und Machkegel 13</p> |
|---|---|

1 Flüssigkeiten

1.1 Aggregatzustände

Fester Aggregatzustand Atomare Bausteine des Körpers haben feste Lagebeziehung zueinander (Gleichgewichtslage). Veränderung der Gleichgewichtslage ist durch Verformung möglich. (Hook'sches Gesetz, siehe Physik I Skript)

Flüssiger Aggregatzustand Atomare Bausteine nehmen keine Gleichgewichtslage ein, sie sind gegeneinander verschiebbar.

- Oberfläche der Flüssigkeit ist immer Senkrecht zur an ihr angreifenden Kraft (strebt diesen Zustand an)
- Wasser in Rotierendem Becherglas gibt Höhenkurve (Parabel) $z(r) = \frac{\omega^2}{2g}r^2 + z_0$

Gaßförmiger Aggregatzustand entspricht in etwa einem "verdünnten" flüssigen Aggregatzustand

- Wechselwirkungskräfte zwischen Molekülen sind so gering, dass ein Gaß jedes Volumen ausfüllt.
- Gase sind wesentlich leichter komprimierbar als Flüssigkeiten und Festkörper

Dichte $\rho_{fest} \gtrsim \rho_{flssig} \gg \rho_{gas}$

1.2 Flüssigkeiten unter Druck

Druck $p = \frac{F}{A}$

- Kraft die senkrecht auf der Begrenzungsfläche steht (pro Fläche)
- $[p] = 1 \frac{N}{m^2} = 1 \text{ Pascal} = 1 \text{ Pa}$
- $1 \text{ bar} = 10 \frac{N}{cm^2} = 10^5 \frac{N}{m^2}$
- Spezielle (noch gebräuchliche Druckeinheiten):
 - $1 \text{ atm} \hat{=} \text{Druck am unteren Ende einer Hg (Quecksilber)-Säule, die 760mm lang ist.}$
 - $1 \text{ atm} = 1,01325 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$
 - $1 \text{ Torr} \hat{=} \frac{1}{760} \text{ atm} \hat{=} \text{Druck von 1mm HG-Säule}$

Kompressionsmodul $\kappa = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p}$

- ist wegen $\Delta V < 0$ immer positiv
- Flüssigkeiten und Feste Stoffe sind praktisch inkompressible

Zerreißfestigkeit Kraft die Aufgewandt werden muss, bis Flüssigkeit / fester Stoff zerreißt. Ist bestimmt durch die inneren Wechselwirkungskräfte

Allseitiger Druck Auf einer Äquipotentialebene ist der Druck auf die Wände überall gleich

Hydraulik $F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1$

- Abgesehen von (etwaiigen) Gewichtskräften der Flüssigkeit stimmt diese Gleichung.

Schweredruck $p = \rho gh$

- ist nicht abhängig von der Form des Gefäßes, sondern nur von der Höhe der Flüssigkeitssäule über dem Körper
- Ist immer senkrecht zur Gefäßwand gerichtet.

Auftrieb $F_A = \rho_{Fl} \cdot g \cdot V_{Körper} = m_{Fl} \cdot g$

- Es muss noch die Gewichtskraft des Körpers berücksichtigt werden
- ρ_{Fl} Dichte der verdrängten Flüssigkeit
- m_{Fl} Masse der verdrängten Flüssigkeit
- $V_{Körper}$ Volumen des eingetauchten Körpers

1.3 Grenzflächen

Spezifische Oberflächenenergie $\gamma = \frac{\text{Arbeit } \Delta W_A \text{ zur Bildung von } \Delta A}{\text{Fläche } \Delta A}$

- $[\gamma] = 1 \frac{N}{m}$
- Ist von Material und Temperatur auf beiden seiten der Grenzfläche Abhängig

Oberflächenspannung $\gamma = \frac{F}{2d}$

- Die 2 steht dort, da die Fläche doppelt (auf beiden Seiten) entsteht
- d Länge, über die die Fläche gezogen wird
- Ist von Material und Temperatur auf beiden seiten der Grenzfläche Abhängig

Oberflächendruck $p = \frac{4\pi\gamma}{r}$

- Druck durch eine Kugelförmige Oberfläche auf den Inhalt

Grenzflächenspannung $\gamma_{12} = \gamma_{23} + \gamma_{13} \cos \alpha$

- Fläche 2 Ist hier die Unterlage

- α ist der Winkel zwischen Unterlage und der Kante zwischen 1 und 3, aber auf der Seite von 3 gemessen
- Grenzfälle:
 - $\cos \alpha \rightarrow +1 \Leftrightarrow$ Tropfen zerfließt, Benetzung
 - $\cos \alpha \rightarrow -1 \Leftrightarrow$ (vollständige) nichtbenetzung
 - für $|\gamma_{12} - \gamma_{23}| > \gamma_{13}$ vollständiges zerfließen der Flüssigkeit

Kapillaraszension Flüssigkeit benetzt gut, und steigt in schmalen spalten auf

- Maximale Steighöhe $h = \frac{2\gamma}{r\varrho g}$

Kapillardepression Flüssigkeit benetzt schlecht, und wird aus schmalen Ritzen verdrängt.

1.4 Bewegung von Flüssigkeiten

Strömung geordnete Bewegung von Flüssigkeits- oder Gasmolekülen

ideale Flüssigkeit ist inkompressibel (lässt sich nicht zusammendrücken) und besitzt keine innere Reibung

Kontinuitätsgleichung $\vec{A}_1 \vec{v}_1 = \vec{A}_2 \vec{v}_2$

- Es geht keine Flüssigkeit verloren, alles was hineinfließt, kommt auch wieder heraus
- mit einbeziehung der Masse gilt dies auch für kompressible Gase
- bei Verengungen muss dafür die Strömungsgeschwindigkeit steigen

Stromlinien Verbindung von Teilchenvektoren; Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren zu verschiedenen Zeitpunkten

- schneiden sich nicht!

Stempeldruck Strömung verursacht durch Druckunterschied

Schweredruck durch Äußeres Kraftfeld verursachte Strömung

Staudruck Dynamisch durch Rückstauung verursachter Druck

Bernoulli'sche Gleichung $\frac{1}{2}\varrho v^2 + p + \varrho gh = c = \text{konstant}$

- hieraus folgt, dass bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten der Druck abnimmt.

- Die Druckdifferenz einer Flüssigkeitssäule ist nur durch ihre Höhe bestimmt

Ausströmgeschwindigkeit $v \approx \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\varrho}}$

- genauere Formel folgt aus der Bernoulli'schen Gleichung, bzw. für akt. Situation
- Ausströmzeit ist Proportional zu $\frac{1}{\text{Ausströmgeschwindigkeit}}$
- Ausströmzeit zweier unterschiedlicher Gase gleichen Volumens bei gleichen Überdruck aus der selben Öffnung $\frac{t_1}{t_2} = \sqrt{\frac{\varrho_1}{\varrho_2}}$

Prantl-Rohr $v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\varrho_{gas}}} = \sqrt{\frac{2\varrho_f g h}{\varrho_{gas}}}$

- Misst mit Hilfe eines U-Rohrs mit Flüssigkeit, die Geschwindigkeit von Vorbeiströmender Luft, mit Hilfe der Druckdifferenz zwischen bewegter und stehender Luft

Flugzeug $F = A\varrho v (v_1 - v_2)$

- A Flügelfläche
- ϱ Dichte der Luft
- v_1 Geschw. über dem Flügel
- v_2 Geschw. unter dem Flügel
- v Geschw. des Flugzeuges

1.5 Viskosität

Viskosität η

- $[\eta] = 1 \frac{kg}{ms} = 1Pa \cdot s$
- Alte Einheit $1Pa \cdot s = 1Poise$
- $F = \eta A \frac{dv_x}{dz}$
 - Zwei Platten mit Flüssigkeitspuffer werden aneinander mit der Geschwindigkeit v_x vorbeigezogen
 - z ist der Normalabstand von der unteren Platte

Stokessches Gesetz $F_R = 6\pi\eta Rv$

- Flüssigkeitsreibung einer Kugel mit dem Radius R und der Geschwindigkeit v .
- Gilt nur für kleine v

Hagen-Poiseuille Gesetz $Q = \frac{\Delta P \pi R^4}{8\eta L}$

- Q Flüssigkeitsvolumen pro Sekunde
- Überdruck ΔP
- R Rohrdurchmesser
- η innere Reibung

2 Wärmelehre

2.1 Empirische Gasgesetze

Ideales Gas Gase, die $p = \frac{const}{V}$ bei $T = const$ genügen heißen *ideale* Gase (z.B. H_2, He, N_2 (Luft)), dabei haben Gasteilchen kein eigenes Volumen (in sehr guter Näherung). Außerdem wirken keine Abstoßenden Kräfte (WW-Kräfte) zwischen ihnen.

reale Gase sind Gase, die $p < \frac{const}{V}$ bei $T = const$ genügen (z.B. $C =_2$). Das heisst, das der Druck kleiner ist als bei einem idelaen Gas, wegen der WW-Kräfte der Gasmoleküle untereinander

Boyle-Mariotte'sches Gesetz $pV = p_0V_0 = const$ bei Temperatur $T = const$

- Über Dichte Ausgedrückt
 $\frac{p}{\rho} = const$

$$\bullet \left(p + \underbrace{\frac{a}{V^2}}_{\text{Binnendruck}} \right) \left(v - \underbrace{b}_{\text{Eigenvolumen}} \right) = konst$$

bei $T = const$
 a, b van der Waalsche Konstanten

Gay-Lussare'sche Gesetz $\frac{p}{T} = const$ bei $V = const$

Zustandsgleichung des idealen Gases

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0} = const$$

Zustandsdiagramme es gibt 3 Schnittlinien der Zustandsfläche mit der Ebene

Isotherme für $T = const$. Ergibt im $p - V$ Diagramm Hyperbeln, die für Größere T weiter von den Achsen entfernt sind

Isobare für $p = const$. Ergibt Ursprungsgraden im $V - T$ Diagramm, mit größerer Steigung für kleinere p

Isochore für $V = const$. Ergibt Ursprungsgraden im $p - T$ Diagramm, mit größerer Steigung für kleinere V

Grad Celsius Temperatureinteilung, mit $0^\circ C$ bei Gefrierpunkt von Wasser und $100^\circ C$ bei Siedepunkt von Wasser unter Normalbedingungen von 760 Torr.

Kelvin Gleiche Abstufung wie bei Grad Celsius, aber $0K \doteq 273,15K$

- $0K$ ist die *absolute Temperatur*, das heisst, dass es keine kältere Temperaturen geben kann.
- bei $0K$ befinden sich die Moleküle in absoluter Ruhe

Trippelpunkt des Wassers. Bei $T = 273,16K$ und $p = 4,6Torr$ kommt Wasser in allen 3 Phasen (fest, flüssig, gasförmig) gleichzeitig vor. In diesem Punkt schneiden sich die 3 Übergangslinien zwischen jeweils zwei Aggregatzuständen.

Temperaturabhängiger Widerstand für nicht sehr kalte Temperaturen gilt: $\frac{R}{R_0} = \frac{T}{T_0}$

2.2 Verallgemeinerung der Zustandsgleichung der Gase

Mol $1mol$ ist diejenige *Substanzmenge*, die die gleiche Anzahl von Teilchen (Atomen, Molekülen, Ionen, Elektronen) enthält wie $12,000 \dots g$ von ^{12}C .

Stoffmenge $[\nu] = 1mol$

Avogadro'sche Zahl $N_A (= N_L) = 6,022045 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$

- Anzahl von Teilchen pro Mol
- Auch *Loschmidt'sche Zahl* genannt
- Anzahl der Moleküle $N = N_A \nu$
- ν Anzahl der Mole

Molmasse $M_{mol} = \frac{m}{\nu}$

- $[M_{mol}] = \frac{g}{mol}$

Relative Molmasse $[A_r] = 1$

- entspricht $\frac{1}{12}$ der Molmasse von ^{12}C
- $M_{mol} = A_r \frac{g}{mol}$
- \approx Anzahl Protonen + Anzahl Neutronen

Molvolumen $V_{mol} = \frac{V}{\nu} = V_m$

- $[V_m] = 1 \frac{cm^3}{mol}$

Normalvolumen $V_m = 22413,6 \frac{cm^3}{mol}$

- Unter Normalbedingungen haben alle üblichen Gase ein Volumen von 22,4l pro mol

Moldichte $n = \frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_{mol}}$

- $[n] = \frac{mol}{m^3}$

allgemeine Gaskonstante $R = \frac{p_0 V_m}{T_0} = 8,3143 \frac{J}{mol \cdot K} = k N_A$

Zustandsgleichung

ideales Gas $pV = \nu RT$

reelles Gas $\left(p + \frac{a\nu^2}{V^2} \right) (V - \nu b) = \nu RT$

3 Mikroskopische Analyse des Gasdrucks

$$\frac{dN(v)}{dv} = 4\pi v^2 N \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

3.1 Gastheorie

Annahmen

- Gase enthalten große Teilchenanzahl (Atome, ...) verhalten sich wie starre Kugeln
- Regellose Translationsbewegung (keine Rotation)
- Mittlere Teilchenbewegung sei gross gegen ihren Durchmesser
- Kräfte der Teilchen mögen nur beim Stoß wirken
- Alle Stöße (Teilche-Teilchen bzw. Teilchen-Wand) seien vollkommen elastisch

Druck $p = \frac{1}{3}nm\overline{v^2} = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2}$

- $n = \frac{N}{V}$ Moldichte
- gilt unter obrigen Annahmen
- ist eine fluktuierende Größe
- m Masse pro Teilchen

3.2 Energiebetrachtungen und Freiheitsgerade

Innere Energie $U = Nm\frac{\overline{v^2}}{2}$

- $pV = \frac{2}{3}U$

kin. Energie $\overline{E_{kin}} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{f}{2}kT$

- gilt für einatomige Gase
- $\overline{E_{kin}} \sim T$
- $k = 1,3806505 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} = \frac{R}{N_a}$
- Temperatur lässt sich nicht für ein einzelnes Teilche definieren, sondern nur für eine Menge
- $E_{ges} = N_a \nu \overline{E_{kin}}$

Gleichverteilungssatz $\frac{\overline{E_{kin}}}{\text{Freiheitsgerade}} = \frac{1}{2}kT$

Geschwindigkeit $v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$

- mittlere quadratische Geschwindigkeit
- root mean square Velocity

- ist unsymmetrisch zum maximum
- nennt sich auch *Maxwellverteilung*
- Maximum bei: $\tilde{v} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$
- Mittel bei $\bar{v} = \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \approx 1,13\tilde{v}$
- $\tilde{v} < \bar{v} < v_{rms}$
- Mittleres Geschw. Quadrat $v_{rms} \approx 1,22\tilde{v}$

Barometrische Höhenformel $n(h) = n(0) e^{-\frac{mgh}{kT}}$

- m ist masse Pro Teilchen
- $n = \frac{N}{V}$ ist die Dichte
- $p(h) = p_0 e^{-\frac{\rho_0 g h}{p_0}}$
- unter vernachlässigung von vertikalen Temperaturdifferenzen

3.3 Gasdruck und mittlere freie Weglänge

mittlere freie Weglänge $\langle l \rangle = \tau \langle v \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma}$

mittlere Flugzeit $\tau = \frac{\langle l \rangle}{\langle v \rangle}$

mittlere Stoßhäufigkeit $\langle z \rangle = \frac{1}{\tau} = \frac{\langle v \rangle}{\langle l \rangle}$

Wirkungsquerschnitt / Stoßquerschnitt

$$\sigma = \pi (r_1 + r_2)^2$$

3.4 Transportphänomene-Diffusion und innere Reibung

Diffusion $j = \frac{\text{Anzahl}}{m^2 s} = -D \frac{dn}{dx}$

- $\frac{dn}{dx}$ Konzentrationsgefälle
- $D = \frac{\langle l \rangle \langle v \rangle}{3}$ Diffusionskoeffizient
- $D = \sqrt{\frac{1}{6}} \frac{1}{p\sigma} \sqrt{\frac{(kT)^3}{m}}$

innere Reibung $\eta = \frac{1}{3}nm \langle l \rangle \langle v \rangle$

- auch *Viskosität* genannt

4 Wärme

4.1 Definition und Begriffe

Wärme Q ungeordneter Energieinhalt eines Systems (Körper, Gas, Flüssigkeit)

Temperatur T Die Temperatur hingegen ist ein Maß für die mittlere ungeordnete Energie eines Systems, d.h. $\overline{E_{kin}} = \frac{\text{Freiheitsgrade}}{2} kT$

Temperaturausgleich Im Laufe der Zeit gleicht sich die mittlere kinetische Energie $= T$ zweier Körper aus (0.te Hauptsatz der Thermodynamik)

- Temperaturausgleich stellt sich beim Übergang von Wärme ein. Dabei bleibt die Wärmemenge Q , d.h. die gesamte ungeordnete kinetische Energie konstant.

Temperaturgleichgewicht beobachtetes System hat eine einheitliche Temperatur

4.2 Wärmemenge und spezifische Wärme

Wärme $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$

- c spezifische Wärme = Wärmemenge die notwendig ist, um 1g eines Stoffes um 1K zu erhöhen.
 - ist (schwach) Temperaturabhängig
 - Bei tiefen Temperaturen ist c nicht mehr konstant, sondern sinkt auf Null ab (mit $\sim T^3$)
- $[Q] = 1J = 1Ws = 1Nm$
- $[c] = 1 \frac{J}{kg \cdot K}$

Wärmekapazität $W = c \cdot m = \frac{Q}{\Delta T}$

Molwärme $C = \frac{c \cdot m}{\nu}$

- Die Wärmemenge, die zur Erwärmung von einem Mol um 1 Grad notwendig ist.
- ν Anzahl der Mole in der Masse m
- $C_{metall} = 25 \frac{J}{mol \cdot K}$ ist für Metalle in etwa konstant

Energieerhaltungssatz $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$

- Auch 1.Hauptsatz der Thermodynamik
- ΔQ Änderung des Wärmehaltes
- ΔW äußere Arbeit am System geleistet
 - + Arbeit, die am System geleistet wird, d.h. die dem System zugeführt wird.

- – Arbeit, die vom System geleistet und nach aussen abgeführt wird.

- ΔU Änderung des gesamten inneren Energieinhaltes des Systems (geordnet und ungeordnet).

- Die Summe der eines Systems von aussen zugeführten Wärme und der von Außen geleisteten Arbeit ist gleich der Zunahme der inneren Energie

Wärmestrahlung Energietransport mithilfe elektromagnetischer Strahlung

Konvektion in strömender Materie (Gas, Flüssigkeiten) wird Wärme mitgeführt (Zentralheizung, Golfstrom, ...) an bewegte Materie gebunden.

Wärmeleitung $\Phi_Q = \frac{Q}{A \cdot t}$ $\vec{\Phi} = -\lambda \vec{\nabla} T(\vec{r})$

- $[\Phi_Q] = \frac{W}{m^2}$
- Wärmefluss durch eine Querschnittsfläche A
- $\lambda = \frac{1}{3} n l v c \frac{\partial T}{\partial z}$
 - l Freie Weglänge
 - $v = v_{rms}$
 - $n = \frac{N}{V}$
 - c Wärmekapazität
 - $[\lambda] = \frac{W}{m \cdot K}$
- $\frac{d}{\lambda} = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i}$
- λ ist unabhängig vom Druck. Falls aber $\lambda \geq \text{Gefäßdimension}$, gilt $\lambda \sim p$
- $\frac{\text{Wärmeleitfähigkeit } \lambda}{\text{El. Leitfähigkeit}} = \text{konst}$

4.3 Spezifische Wärme von Gasen und 1.Hauptsatz

Ideales Gas

$$\begin{aligned} dU &= dQ + dW \\ &= dQ - p dV \end{aligned}$$

- U Innere Energie

Spezifische Wärmekapazität $Q = C_{p/V} \cdot \nu \cdot T$

konst. Volumen $C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$

konst. Druck $C_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_p + p \underbrace{\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_p}_R =$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_p + R = \left(1 + \frac{f}{2}\right) R$$

- $R = C_p - C_v = 8,31 \frac{J}{mol \cdot K}$

- $C_v = \frac{f}{2}R$
- Unterschied hängt mit der Arbeit zusammen, die ein ideales Gas leistet, wenn es sich bei der Erwärmung ausdehnt.

- nur für Temperaturen ca. zwischen $100K$ und $800K$
- für kleine Temperaturen fällt C_V mit T^3 ab gegen 0. Man sagt auch, die *Freiheitsgerade frieren aus*. Dies geschieht um so später, je weniger freiheitsgerade vorhanden sind.
- Für große Temperaturen kommen zusätzliche Schwingungsfreiheitsgerade hinzu, und C_v wird größer.

Adiabatenexponent $\kappa = \frac{C_p}{C_v} = \frac{2+f}{f} = 1 + \frac{2}{f}$

- f Freiheitsgerade des Gases
- $f = \frac{2}{\kappa-1}$

Freiheitsgerade

- 3 für 1-Atomiges Gas
- 5 für 2-Atomiges Gas
- 6 für 3-Atomiges Gas

4.4 Zustandsänderungen

Arbeit $W = - \int_{V_1}^{V_2} p dV$

- $W > 0$ Kompression, wir leisten Arbeit
- $W < 0$ Expansion, das expandierende Gas leistet Arbeit

Isotherm $T = \text{konstant}$

- $W = -\nu RT \ln\left(\frac{V_1}{V_0}\right)$
- $W = -p_0 V_0 \ln\left(\frac{p_0}{p_1}\right)$
- $W = -p_0 V_0 \ln\left(\frac{V_1}{V_0}\right)$

Isobare $p = \text{konstant}$

- $W = -p(V_2 - V_1)$

Isochore $V = \text{konstant}$

- $W = 0$

Adiabatisch $Q = \text{konstant}$

- $W = \nu C_v (T_1 - T_2)$
- $T \cdot V^{\kappa-1} = \text{konstant}$
- $p \cdot V^\kappa = \text{konstant}$
- $\frac{T^\kappa}{p^{\kappa-1}} = \text{konstant}$

5 Reale Gase

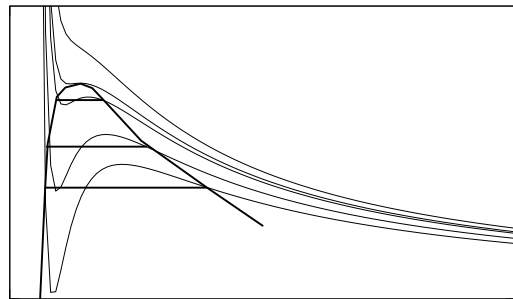
5.1 Zustandsgleichung

Van der Waals Gleichung $\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT$

- $\frac{a}{v_m^2}$ Binnendruck
- b Eigenvolumen
- v_m Molvolumen

Verhalten des idealen Gases $p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{v_m^2}$

Abbildung 1: Druck in Abhängigkeit vom Volumen für verschiedene Temperaturen bei einem realen Gas



- Siehe [Abbildung 1](#)
- In Wirklichkeit gibt es diese Knicke nach unten in den Kurven nicht, sondern der Druck geht linear entlang der Fettgedruckten Linien auf die andere Seite.

Maxwell-Konstruktion Die Querbalken haben die Charakteristik, dass der Flächeninhalt zwischen Originalkurve und ihnen ober und unterhalb gleich Null ist.

Phasenkoexistenzgebiet Die Verbindungskurve aller Schnittpunkte der Querbalken mit den dazugehörigen Kurven bildet den im Bild unten markierten Bereich. In diesem

Bereich koexistieren Gas und flüssige Phase. Links des Bereichs ist der Stoff flüssig, rechts gasförmig.

Kritischer Punkt ist das Maximum der Hüllkurve des Phasenkoexistenzbereichs, und zugleich der Sattelpunkt der Zustandsgeraden.

$$- V_{mol \text{ kritisch}} = 3b$$

$$- T_k = \frac{8a}{27Rb}$$

$$- p_k = \frac{a}{27b^2}$$

Enthalpie $H = U + pV = \text{konstant}$ für $dQ = 0$

- $dH = C_V dT + \frac{2a}{\sqrt{2}} dV + \frac{RT}{\sqrt{2}b} dV - \frac{RVT}{(\sqrt{2}b)^2} dV + \frac{RV}{\sqrt{2}b} dT$
- $dT \approx \frac{dV}{\sqrt{2}C_p} (RTb - 2a) = \frac{dp}{C_p} \left(\frac{2a}{RT} - b \right)$

Inversionstemperatur $T_{inv} = \frac{2a}{Rb} = \frac{2T}{4} T_k$

- reale Gase kühlen sich bei gedrosselter Entspannung ab, wenn ihre Temperatur T unterhalb von T_{inv} liegt. Oberhalb T_{inv} gibt es Erwärmung.

5.2 Phasenumwandlungen

Dampfdurckkurve Geht vom Tripelpunkt bis zum Kritischen Punkt. Flüssige und gasförmige Phase existieren gleichzeitig. Oberhalb flüssig, unterhalb Gasförmig

Schmelzkurve Beginnt im Tripelpunkt, hat aber nach oben hin kein Ende. Feste und flüssige Phase existieren gleichzeitig. Links Fest, rechts flüssig.

Sublimationskurve feste und Gasförmige Phasen existieren gleichzeitig. Endet im Tripelpunkt und beginnt in der Nähe des Ursprungs. Oben fest, Rechts flüssig

Dampfdruck Druck des Gases, der sich im Raum über einer Flüssigkeit einstellt. Ebensoviele Moleküle verlassen die Flüssigkeit wie in Sie zurückkehren.

Latente Wärme (gespeicherte Wärme) Übergang einer Stoffmenge von der Phase i in die Phase k . Wärmemenge $Q_{ik} = -Q_{ki}$. Ist $Q_{ik} > 0$ muss sie dem System zugeführt werden, für < 0 gibt das System sie ab.

spezifische Phasenübergangswärme $\lambda_{ik} = \frac{Q_{ik}}{m}$

- $[\lambda] = \frac{Ws}{kg}$
- spez. Schmelzwärme $\lambda_{F,L}$
- spez. Verdampfungswärme $\lambda_{F,G}$
- spez. Sublimationswärme $\lambda_{F,G}$

Phasenübergang 1. Ordnung heißen Phasenübergänge, bei denen sich V (bei $p = \text{konst}$) und p (bei $V = \text{konst}$) eines Systems bei einer Übergangstemperatur $T_{\dot{U}}$ ändert. D.h. $V(T_{\dot{U}})$ und $p(T_{\dot{U}})$ verhalten sich unstetig.

Phasenübergang 2. Ordnung heißen Phasenübergänge, bei denen sich V und p stetig an $T_{\dot{U}}$ verhalten, aber $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{T_{\dot{U}}}$ und $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{T_{\dot{U}}}$ unstetig verhalten.

Hier gibt es also keine Änderung der potentiellen Energie des Systems, d.h. es gibt keine latenten Wärmen. Phasenumwandlungen erfolgen also ohne Energiezufuhr, $Q_{ik} = 0$

- $\frac{\Delta Q_{ik}}{\Delta T} = C$ ist also abgeknickt beim Übergang.

6 2. HS der Wärmelehre

6.1 Verschiedene Formulierungen

- Die Konstruktion einer periodisch arbeitenden Maschine, die weiter nichts bewirkt, als die Erzeugung mechanischer Arbeit und Abkühlung eines Wärmespeichers (Perpetuum mobile 2. Art) ist unmöglich
- η_C ist der grösstmögliche theoretische Wirkungsgrad
- In einem abgeschlossenen System nimmt die Entropie stets zu: $\Delta S \geq 0$

6.2 Kreisprozesse

Wirkungsgrad $\eta = \frac{\text{geleistete Arbeit}}{\text{aufgenommenen Wärme}}$

- Die Abwärme bleibt unberücksichtigt, da der Wirkungsgrad sonst zwangsläufig 1 sein müsste

6.2.1 Carnot'sche Kreisprozess

Kurve im PV-Diagramm zusammengesetzt aus zwei Abiabaten und zwei Isothermen

- Kurveninhalt ist die geleistete mechanische Arbeit
- Q_1 ist die aus dem wärmeren Reservoir mit der Temperatur T_1 aufgenommene Wärmemenge
- Q_2 ist die an das kältere Reservoir mit der Temperatur T_2 abgegebene Wärmemenge

Wirkungsgrad $\eta_C = \eta_C^{WK} = \frac{W_{total}}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

- entspricht dem Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschine

Wärmepumpe $\eta_C^{WP} = \frac{|Q_1|}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{1}{\eta_C^{WK}}$

Kältemaschine $\eta_C^{KM} = \frac{|Q_2|}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

6.2.2 Verbrennungskraftmaschine

- z.B. Ottomotor / Dieselmotor

Kurve im PV Diagramm besteht aus zwei Abiabaten und zwei Isochoren (konstantes Volumen)

Wirkungsgrad $\eta = 1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} < \eta_C$

6.2.3 Stirlingmotor

Kurve im PV-Diagramm besteht aus zwei Isothermen und zwei Isochoren (konstantes Volumen)

Wirkungsgrad $\eta_{st} = \eta_C \frac{1}{1 + \eta_C \frac{c_V}{R \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}} < \eta_C$

6.3 Entropie

Entropie $S(T, V) = \int \frac{1}{T} dQ$

- $[S] = 1 \frac{J}{K}$

Ideales Gas $S = \nu C_v \ln(T) + \nu R \ln(V) + S_0$

- $\Delta S = \nu \left(C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \right)$

- Anzahl der Mole
- Adiabate $\Delta S = 0$

Eigenschaften In der Natur laufen nur solche Vorgänge ab, bei denen die Entropie zunimmt.

- $dS \geq 0$

Irreversible Prozesse Die Entropie nimmt stets zu.

- Prozessen, die nur mit Energiezufuhr ablaufen können sind Irreversible.

7 Wellenbewegung in elastischen Medien

7.1 Zeitliche und örtliche Ausbreitung einer Störung - Wellengleichung

Schwingung ein periodisch in der Zeit ablaufender Vorgang

Welle Zeit- und raumperiodischer Vorgang mit der Geschwindigkeit v
 $y = y(\vec{r}, t)$

Zugspannung $\sigma = \frac{\text{Kraft } F}{\text{Querschnittsfläche } A}$

Wellengleichung $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \left(\frac{\sigma}{\rho}\right) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$

- ρ steht für die Materialdichte

Lösung Wellengleichung $y = f\left(\underbrace{x \mp vt}_{=c}\right) = f(c)$
 für welle in positive x -Richtung steht dort ein - (Minus)!!

- $v = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \sqrt{\frac{F \cdot l}{m}}$

- bedeutet, dass an allen Stellen $x-vt$ f den gleichen Wert hat. Da $v \cdot t$ mit der Zeit wächst, rutscht der Ort, an dem y den gleichen Wert hat in x -Richtung davon.

Phase der Welle $(x - vt)$

Phasengeschwindigkeit Falls $x - vt = \text{konstant}$ wird $\dot{x} = v$ die Phasengeschwindigkeit genannt.

7.2 Harmonische Wellen

Ansatz $y(x, t) = a \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(vt - x)\right)$

- Sinusförmige Störung, die sich nach rechts mit der Geschwindigkeit v ausbreitet
- In einer Momentaufnahme ist λ der Abstand weiterer Wellenberge (Täler)

Wellenlänge λ aus der vorherigen Formel

Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Frequenz $f = \frac{v}{\lambda}$

Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f = kv$

Phasengeschwindigkeit $v = \lambda f$

Amplitude a

Harmonische Welle $y = a \cdot \sin(\omega t - kx)$

7.3 Reflexion der Seilwelle und stehende Wellen

festes Ende Reflexion am Ende, das fest ist

- Grenzbedingung $y = 0$ am festen Ende führt zu einer Reflexion der Störung mit negativem Vorzeichen (*Phasensprung*)

offenes Ende Reflexion am Ende, das offen ist

stehende Wellen Reflexion an zwei festen Enden, so dass die Welle zu stehen scheint. Sie entstehen aus der Überlagerung von der hinlaufenden und der Reflektierten Welle

$$\begin{aligned} y &= \sin(\omega t - kx) - \sin(\omega t + kx) \\ &= -2 \cos(\omega t) \sin(kx) \end{aligned}$$

Grundschwingung Auf ein Seil der Länge l passt genau eine Schwingung mit der Wellenlänge $\lambda = 2l$. Die Schwingung mit dieser Wellenlänge wird Grundschwingung genannt.

Oberschwingung Auf einem Seil der Länge l können nur stehende Wellen der Wellenlänge $\lambda = n \cdot 2l$ mit $n \in \mathbb{N}$ entstehen. $n = 1$ ist die Grundschwingung, alle weiteren sind die n .te Oberschwingung

7.4 Polarisierung einer Welle

Transversalwelle Schwingung der Masse erfolgt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

Longitudinalwelle Schwingung der Masse erfolgt in Ausbreitungsrichtung. Man kann hier auch von Dichteschwankungen im Medium sprechen.

Lineare Polarisation liegt bei einer Transversalwelle vor, wenn die Schwingungsebene konstant ist.

Zirkuläre Polarisation liegt bei einer Transversalwelle vor, wenn sich die Schwingungsamplitude über die Zeit nicht ändert, sondern nur ihre Richtung. Der Amplitudenvektor rotiert sozusagen um die Ausbreitungsrichtung.

7.5 Torsionswelle

Torsionsmodul G

- auch Schub- oder Schermodul
- $[G] = \frac{N}{m^2}$
- $\gamma = \frac{F_t}{G \cdot A}$ Drehwinkel ist proportional zu angreifender Kraft und Querschnittsfläche des Materials

Torsionsschwingung $T = I\ddot{\varphi} = \frac{\gamma}{a}\varphi$

7.5.1 Torsionspendelkette

Ansatz $T_n = -\frac{\gamma}{a}(\varphi_n - \varphi_{n-1}) - \frac{\gamma}{a}(\varphi_n - \varphi_{n+1})$

- a Abstand der Pendel
- $I_n\ddot{\varphi}_n = \frac{\gamma}{a}(\varphi_{n+1} - \varphi_n + \varphi_{n-1})$
- Randpunkte fixiert $\varphi_0 = \varphi_N = 0$
- $\varphi_n = A_n e^{i\omega t}$ mit $A_n = A e^{\pm i \cdot k \cdot a \cdot n}$

Kreisfrequenz $\omega^2 = \frac{4\gamma}{Ia} \sin^2\left(\frac{ka}{2}\right)$

- da ω eine Funktion von k ist läuft die Welle auseinander.

Lösung $\varphi_{n,\mu} = E \cdot e^{-\omega_\mu t} \sin\left(\frac{n\mu\pi}{N+1}\right)$

- Eigenfrequenzen $\omega_\mu = 2\sqrt{\frac{\mu}{Ia}} \sin\left(\frac{\mu\pi}{2(N+1)}\right)$
- Amplituden $A_{n\mu} = E \sin\left(\frac{n\mu\pi}{N}\right)$

7.6 Schallwellen

Ausbreitung in allen elastischen Medien. Entspricht einer Dichteschwankung im Medium

Dichtegradient $\frac{\partial \rho}{\partial x} = -\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$

Druckgradient $\frac{\partial p}{\partial x} = -\left(\frac{dp}{d\rho}\right)_{\rho_0} \rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$

Wellengleichung $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_{\rho_0} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$

Lösung $\xi = \xi_0 \sin(\omega t - kx)$

Ausbreitungsgeschwindigkeit $v^2 = \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_{\rho_0}$

Schallwellen Longitudinalwellen in Luft

Schallwellendruck $p = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$

Energietransport $P_v = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \cdot \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Fläche}}$

Schallintensität $\frac{\text{Energie}}{\text{Zeit} \cdot \text{Fläche}}$

Standardintensität $J_0 = 10^{-6} \frac{W}{cm^2}$

- Schmerzgrenze $J_{max} \approx 10^{13} J_0$
- Wahrnehmungsschwelle $J_{min} \approx 10^{-10} J_0$

Lautstärke $L \sim \text{konst} \cdot \log J$

- Alte Einheit Phon:
 $L \text{ in Phon} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{J}{J_0}\right)$

Tonhöhe \sim Frequenz

7.6.1 Schallwellen in Gasen

Polarisation Nur Longitudinal möglich, da Gase keine Schersteifigkeit besitzen.

Ideales Gas entspricht einem Adiabaten Prozess, da er schnell abläuft

Ausbreitungsgeschwindigkeit $v_{schall} = \sqrt{\kappa \frac{kT}{m}}$

- nur für ideales Gas
- m Molmasse
- $v_{therm}^2 = \frac{3}{\kappa} v_{schall}^2$ also ähnliche Größe
- $c_{schall} = 340 \frac{m}{s}$ bei Norm Bedingungen

7.6.2 Akustik

Ton Schallempfindung, die durch harmonische Schwingung des Schallgeber erzeugt wird

Klang Schallempfindung regelmäßiger harmonischer Schwingungsvorgänge mit rationalem Frequenzspektrum

Geräusch kein rationales Frequenzspektrum

Schwebung Überlagerung zweier Töne mit annähernd gleichen Frequenzen

- $x_1 = x_0 \sin(\omega_1 t)$
 $x_2 = x_0 \sin(\omega_2 t)$
- $\omega_1 \approx \omega_2$
- $x = x_1 + x_2 = x_0 (\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t))$
- $x = 2 \cdot x_0 \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right)$
- $x = 2 \cdot x_0 \cdot \sin(\omega_m t) \cdot \cos(\omega_s t)$
- Mittenfrequenz $\omega_m = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$
- Schwebungsfrequenz $\omega_s = \left| \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \right|$
- Hat Phasensprünge an Stellen wo der Sinus und der Cosinus gleich 0 werden

7.6.3 Dispersion

Phasengeschwindigkeit $\frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = v_{phase}$

- wegen $\omega t - kx = \text{konstant}$

Gruppengeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit mit der bei Überlagerung von mehreren harmonischen Wellen sich die umhüllende Kurve vorbewegt.

- im Medien mit $v_{phase} = v(\lambda)$
- $v_{gr} = v_{phase} - \lambda \frac{dv_{phase}}{d\lambda} = \frac{d\omega}{dk}$

Dispersion die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen von ihrer Wellenlänge bzw. von der Frequenz

linear $v_{gruppe} = v_{phase} = \text{konst}$

nichtlinear $v_{phase} \neq \text{konst}$

- $v_{gruppe} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \neq v_{phase}$
- Signal behält seine Form bei der Ausbreitung nicht bei, dies führt zu einer Deformation (Dispersion) des Signals
- Wasserwelle $p_{ph} = v = \sqrt{\frac{\lambda g}{2\pi}} = v(\lambda)$
 - Im Fernfeld des Erregers überholen die langen Wellen die kürzeren

7.7 Dopplereffekt

Ursache bewegte Schwingungserreger bewegen sich relativ zum Übertragungsmedium. Ebenso kann sich der Beobachter relativ zum Medium bewegen.

Bewegte Quelle und ruhender Beobachter (relativ zum Medium)
 $\lambda' = \lambda \left(1 - \frac{v}{c}\right)$

- v Geschwindigkeit der Quelle
- c Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium
- $f' = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}}$
- für $v \ll c$ gilt: beide Transformationen sind identisch

Bewegter Beobachter und ruhende Quelle (relativ zum Medium)
 $\lambda' = \lambda \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$

- $f' = f \left(1 + \frac{v}{c}\right)$
- für $v \ll c$ gilt: beide Transformationen sind identisch

7.8 Masse Energieäquivalenz

Es gilt

$$E = mc^2$$

8 Energie und Energiedichte einer Welle

Hooksches Gesetz $\frac{F}{A} = E \frac{\Delta l}{l} = \frac{\partial \xi}{\partial x} E$

- Mit E dem *Elastizitätsmodul* einer Materialkonstanten

Wellengleichung $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \frac{E}{\rho}$

Energietransport $\frac{\partial W}{\partial t} = -F \frac{\partial \xi}{\partial t}$

- F ist die Zugkraft in dem Seil

Harmonisch $\xi = \xi_0 \sin(kx - \omega t)$

- $\frac{\partial W}{\partial t} = v A \rho \omega^2 \xi_0^2 \cos^2(kx - \omega t)$
- $\frac{\partial W}{\partial t} \geq 0$ gilt stets
- Mittelwert $\langle \frac{\partial W}{\partial t} \rangle = v A \frac{1}{2} \rho \omega^2 \xi_0^2 = v A \epsilon$
- $\epsilon = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \xi_0^2$
- A Querschnittsfläche des Wellendurchdringung
- $\rho_{Luft} = 1,29 \frac{kg}{m^3}$
- $v_{schall} = 340 \frac{m}{s}$

Energiedichte $\epsilon = \frac{\text{Energie}}{\text{Volumen}}$

9 Wellenausbreitung in mehreren Dimensionen

9.1 Ebene Wellen und Kugelwellen

Wellenvektor \vec{k} mit $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ und in Richtung der Ausbreitungsrichtung der Wellenfronten

Harmonische eben Welle $\xi(\vec{r}) = \xi_0 \sin(\vec{k}\vec{r} - \omega t)$

Kugelwelle $\xi(\vec{r}) = \frac{\xi_0}{r} \sin(\vec{k}\vec{r} - \omega t) = \Im\left(\frac{\xi_0}{r} e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}\right)$

Energiedichte das Integral über der Energiedichte muss auf einer geschlossenen Oberfläche konstant sein. Da die Amplitude quadratisch in die Energiedichte eingeht, muss bei der Kugel mit $\frac{1}{r}$ multipliziert werden, und nicht mit $\frac{1}{r^2}$

9.2 Interferenz

Interferenz bezeichnet die Überlagerung von Wellen gleicher Frequenz (mit annähernd gleicher Ausbreitungsrichtung)

Gangunterschied bezeichnet die Strecke Δr , die eine Welle von ihrer Quelle mehr zurücklegen musste als die andere (Wegdifferenz)

Verstärkung für $\Delta r = \pm 0, \pm \lambda, \pm 2\lambda, \dots, \pm n\lambda, \dots$

Auslöschung für $\Delta r = \pm \frac{\lambda}{2}, \pm 3\frac{\lambda}{2}, \pm 5\frac{\lambda}{2}, \dots, \pm \frac{2n+1}{2}\lambda, \dots$

Phasendifferenz Bezeichnet den Unterschied in der Phase zwischen den Interferierenden Wellen am betrachteten Ort

Verstärkung für $\Delta\varphi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$

Auslöschung für $\Delta\varphi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$

Kohärenz Interferenz ist nur bei *kohärenten* Wellen möglich!

- Wellen gleicher Frequenz
- Wellen haben feste Phasenbeziehung

9.3 Beugung und Huygens'sches Prinzip

Huygens'sches Prinzip

- Jeder erregte Punkt im Wellenfeld ist Ausgangspunkt einer elementaren Kugelwelle
- Die nachfolgende Wellenfront ergibt sich durch Überlagerung dieser elementaren Kugelwellen

Beugung Abweichen von der geradlinigen Ausbreitung einer Welle, wenn dies durch eine enge Öffnung tritt oder auf ein Hindernis trifft.

Beugung am Spalt mit der Breite a . In der Richtung α von der Spaltnormale aus betrachtet hat man

Maxima bei $\sin \alpha = \frac{(2n+1)\lambda}{2a}$

Auslöschung bei $\sin \alpha = \frac{n\lambda}{a}$

Beugung am Doppelspalt mit der vernachlässigbaren Breiten und Spaltabstand d . In der Richtung α von der Spaltnormale aus betrachtet hat man

Maxima bei $\sin \alpha = \frac{n\lambda}{d}$

Auslöschung bei $\sin \alpha = \frac{(2n+1)\lambda}{2d}$

- In Wirklichkeit überlagern (Modulieren) sich noch die Spaltbeugungseffekte der beiden einzelnen Spalten.
- Im Vergleich zum Einzelspalt sind die Formeln genau vertauscht

Reflexion Einfallswinkel = Ausfallswinkel für unendlichen Reflektor

9.4 Brechung

Brechung entspricht beim Übertritt einer Welle von einem Medium in ein anderes mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten.

Brechungsindex $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$

- α Winkel zwischen dem Wellenstrahl und dem Lot in Medium 1
- β Winkel zwischen dem Wellenstrahl und dem Lot in Medium 2
- v_1 Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in Medium 1
- v_2 Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in Medium 2
- auch *Snellius'sches Brechungsgesetz* genannt

Totalreflexion $\sin \alpha_{gr} = \frac{v_1}{v_2}$

- ab diesem Winkel wird nicht mehr gebrochen (da dafür $\sin \beta > 1$ sein müsste) sondern ausschließlich reflektiert

9.5 Doppelereffekt und Machkegel

Doppelereffekt falls sich die Quelle im Ausbreitungsmedium bewegt, kommt es je nach Richtung zu Verzerrungen in der Frequenz der Wellen.

Machkegel $\sin \alpha = \frac{v_{\text{medium}}}{v_{\text{Flugzeug}}}$

- Halber Öffnungswinkel des Schallkegels hinter dem Überschallflieger

Machzahl $= \frac{1}{\sin \alpha}$

Index

- Abiabatene exponent, 7
- Abiabatisch, 7
- absolute Temperatur, 4
- Aggregatzustände, 2
- Akustik, 11
- Allseitiger Druck, 2
- Amplitude, 9
- Arbeit, 7
- Auftrieb, 2
- Ausbreitungsgeschwindigkeit, 10
- Auslöschung, 12
- Ausströmgeschwindigkeit, 3
- Avogadro'sche Zahl, 4

- Benetzung, 3
- Bernoulli'sche Gleichung, 3
- Beugung, 12
- Binnendruck, 7
- Boyle-Mariotte'sches Gesetz, 4
- Brechung, 12
- Brechungsindex, 12

- Carnot'sche Kreisprozess, 8
- Celsius, 4

- Dichte, 2
- Diffusion, 5
- Diffusionskoeffizient, 5
- Dispersion, 11
- Doppelereffekt, 13
- Druck, 2, 5

- ebene Welle, 12
- Eigenvolumen, 7
- Elastizitätsmodul, 11
- Energiedichte, 11, 12
- Energieerhaltungssatz, 6
- Energietransport, 10, 11
- Enthalpie, 7
- Entropie, 9

- Fester Aggregatzustand, 2
- festes Ende, 9
- Flüssiger Aggregatzustand, 2
- Flüssigkeit, 3
- Flüssigkeiten, 2
- Flüssigkeitsreibung, 3
- Flugzeit, 5
- Flugzeug, 3
- freie Weglänge, 5
- Freiheitsgerade, 7
- Frequenz, 9

- Gaßförmiger Aggregatzustand, 2
- Gangunterschied, 12
- Gas, 4
- Gase, 7
- Gaskonstante
 - allgemeine, 4
- Gay-Lussare'sche Gesetz, 4
- Geräusch, 11
- Geschwindigkeit, 5
- Gleichgewichtslage, 2
- Gleichverteilungssatz, 5
- Grad Celsius, 4
- Grenzflächen, 2
- Grenzflächenspannung, 2
- Grundschiwingung, 9
- Gruppengeschwindigkeit, 11

- Hagen-Poiseuille-Gesetz, 3
- Harmonische Wellen, 9
- Hook'sches Gesetz, 2
- Huygens'sches Prinzip, 12
- Hydraulik, 2

- ideale Flüssigkeit, 3
- ideales Gas, 4
- Innere Energie, 5
- innere Reibung, 5
- Interferenz, 12
- Inversionstemperatur, 8
- Isobare, 4, 7
- Isochore, 4, 7
- Isotherm, 7
- Isotherme, 4

- Kältemaschine, 8
- Kapillaraszension, 3
- Kapillardepression, 3
- Kelvin, 4
- Klang, 11
- Kohärenz, 12
- Kompressionsmodul, 2
- Kontinuitätsgleichung, 3
- Konvektion, 6
- Kreisfrequenz, 9
- Kreisprozesse, 8
- Kritischer Punkt, 7
- Kugelwelle, 12

- Lautstärke, 10
- Lineare Polarisation, 10
- Longitudinalwelle, 10
- Loschmidt'sche Zahl, 4

- Machkegel, 13
- Machzahl, 13
- Maxwell-Konstruktion, 7
- Maxwellverteilung, 5
- Mittelfrequenz, 11
- mittlere Flugzeit, 5
- mittlere freie Weglänge, 5
- mittlere Stoßhäufigkeit, 5
- Mol, 4
- Moldichte, 4
- Molmasse, 4
- Molvolumen, 4, 7

- Molwärme, 6
 Normalvolumen, 4
 o, 3
 Oberflächendruck, 2
 Oberflächenenergie, 2
 Oberflächenspannung, 2
 Oberschwingung, 9
 offenes Ende, 9

 Phasendifferenz, 12
 Phasengeschwindigkeit, 9, 11
 Phasenkoexistenzgebiet, 7
 Phasensprung, 9
 Polarisierung, 10
 Prantl-Rohr, 3

 Reale Gase, 7
 reale Gase, 4
 Reibung, 5

 Schallintensität, 10
 Schallwellen, 10
 Schallwellendruck, 10
 Schwebung, 11
 Schwebungsfrequenz, 11
 Schweredruck, 2
 Schwingung, 9
 Snellius'sches Brechungsgesetz, 12
 Standardintensität, 10
 Staudruck, 3
 stehende Wellen, 9
 Stempeldruck, 3
 Stirlingmotor, 9
 Stoßhäufigkeit, 5
 Stoßquerschnitt, 5
 Stoffmenge, 4
 Stokessches Gesetz, 3
 Strömung, 3
 Stromlinien, 3
 Substanzmenge, 4

 Temperatur, 6
 Ton, 11
 Tonhöhe, 10
 Totalreflexion, 12
 Transversalwelle, 10
 Trippelpunkt, 4

 Van der Waals Gleichung, 7
 Verbrennungskraftmaschine, 8
 Verstärkung, 12
 Viskosität, 3, 5

 Wärme, 6
 Wärmekapazität, 6
 Wärmeleitung, 6
 Wärmepumpe, 8
 Wärmestrahlung, 6
 Weglänge, 5
 Welle, 9
 Wellengleichung, 9, 11
 Wellenlänge, 9
 Wellenvektor, 12
 Wellenzahl, 9
 Wirkungsgrad, 8
 Wirkungsquerschnitt, 5

 Zerreißeigenschaft, 2
 Zirkuläre Polarisation, 10
 Zugspannung, 9
 Zustandsänderungen, 7
 Zustandsdiagramme, 4
 Zustandsgleichung, 4