

Physik für Biologen und Zahnmediziner

Kapitel 11: Wärmelehre

Dr. Daniel Bick



Universität Hamburg
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

13. Dezember 2017

1 Wellen

2 Wärmelehre

Schallfeldgrößen – Amplitude, Schnelle, Druck

- Ein einzelnes Teilchen schwingt mit Amplitude A_0

Schallamplitude

Amplitude A_0 der Schwingung eines Teilchens

Schallschnelle

Maximale Geschwindigkeit der Moleküle

$$v_{0,\max} = \max \left(\frac{dx}{dt} \right) = \max [A_0 \omega \cos(\omega t)] = A_0 \omega \quad a_{0,\max} = A_0 \omega^2$$

Schalldruck bzw. Schallwechseldruck

Durch Schwingung erzeugte maximale Druckschwankung ($\mathcal{O} 10^{-2} \text{ Pa}$)

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot a}{A} = \frac{\rho \cdot V \cdot a}{A} = \rho L a = \rho L A_0 \omega^2 = \rho \cdot c t \cdot \frac{v_0}{\omega} \omega^2 = 2\pi \rho c v_0$$

Schallstärke bzw. Intensität I

$$I = \frac{\text{Energie}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{A\Delta t} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\frac{V}{L} \frac{L}{c}} = \frac{\rho V v^2 c}{2V} = \frac{\rho \left(\frac{p}{2\pi\rho c} \right)^2 c}{2} = \frac{p^2}{8\pi^2\rho c}$$
$$I = \frac{1}{8\pi^2} \frac{p^2}{\rho c}$$
$$[I] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Schallempfindlichkeit des menschlichen Ohrs

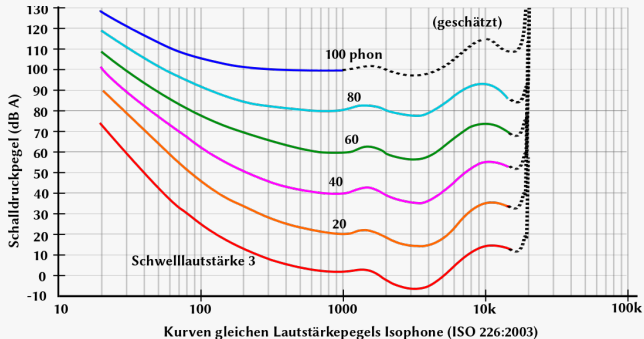
- Bei 1000 Hz
- Hörgrenze 10^{-12} W/m^2
- Schmerzgrenze 1 W/m^2

- Definiere Hörgrenze 10^{-12} W/m^2 als Bezugsintensität I_0

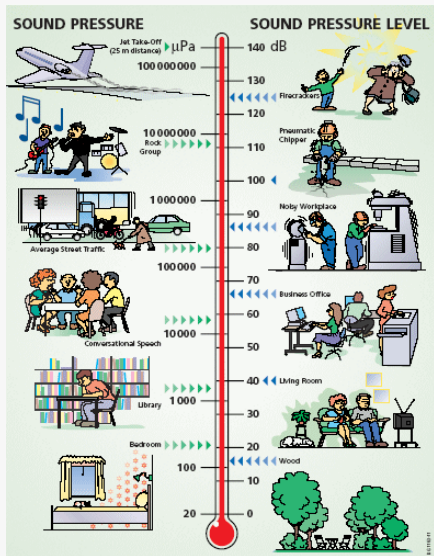
Weber-Fechner-Gesetz

Subjektive Lautstärke wächst nicht linear sondern logarithmisch mit Intensität

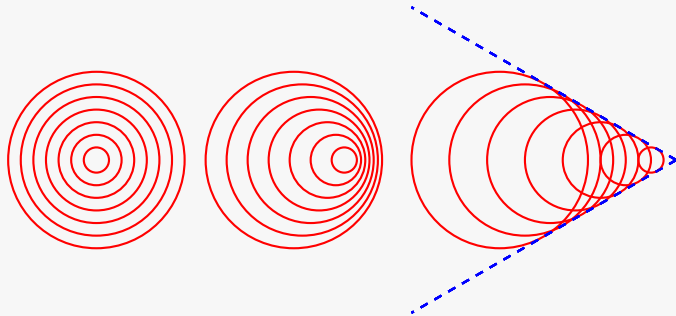
- **Schallstärkenpegel L** (Lautstärke)
- I_0 ist Frequenzabhängig

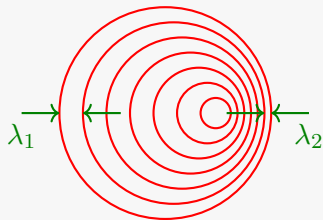


Bildquelle: Wikipedia



Quelle: Brüel & Kjær -- The range of Sound Pressure Levels





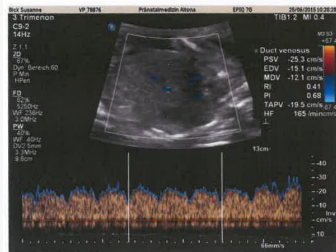
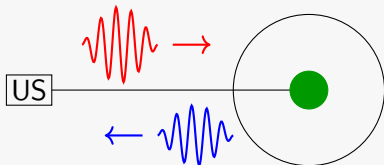
Wellenwiderstand (Impedanz)

- Eigenschaft eines Mediums, in dem sich eine Welle ausbreitet.
- Das Verhältnis von reflektierter und transmittierter Amplitude der Welle an einer Grenzfläche wird durch die **Impedanz** der beiden Medien bestimmt.
- An der Grenzfläche zweier Stoffe mit großem Impedanzunterschied wird Schall stark reflektiert.

Impedanz

Schallreflexionsfaktor

- Laufzeit
- Abstand
- Amplitude des reflektierten Pulses
- Dichteverteilung
- Frequenz
- Bewegung der Schichten (Dopplereffekt)



1 Wellen

2 Wärmelehre

Temperaturempfinden sehr subjektiv

Was ist Wärme?

- Ungeordnete Bewegung der Moleküle: **Wärmebewegung**
- **Temperatur** ist ein Maß für deren kinetische Energie
- bezieht sich auf Mittelwert, nicht auf die individuelle Bewegung eines Atoms/Moleküls
- Wärme ist Form der Energie

Thermodynamik

- Verwendung **makroskopischer Größen** zur Beschreibung **mikroskopischer Vorgänge** auf **statistischer** Basis
- **Zustandsgrößen**
 - Druck
 - Volumen
 - Temperatur

Celsius Skala

- Gefrierpunkt von Wasser: 0°C
- Siedepunkt von Wasser: 100°C

Kelvin Skala

- Absoluter Nullpunkt: 0 K
- Tripelpunkt von Wasser: $273,16\text{ K}$

Umrechnung: $T_K = T_C + 273,15$

Fahrenheit

- Ziel war es, die Temperatur so zu definieren, dass es keine negativen Werte gibt.
- Körpertemperatur des Menschen: 100°F
- Kältester Tag, den Fahrenheit je erlebt hat: 0°F

Umrechnung: $T_F = 1,8 \cdot T_C^{\circ}\text{F}/^{\circ}\text{C} + 32^{\circ}\text{F}$

Wärmeübertrag

- Wärmemenge Q ist näherungsweise Proportional zur Temperaturänderung ΔT

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

- Spezifische Wärmekapazität c , z.B. $c_{\text{Wasser}} = 4.182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Jeder Körper strahlt durch elektromagnetische Strahlung einen Wärmestrom $\frac{dQ}{dt}$ ab.

$$\frac{dQ}{dt} = \varepsilon \sigma A T^4$$

mit

- ε : Emissionsgrad:
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$: Stefan-Boltzmann-Konstante
- A : Oberfläche des abstrahlenden Körpers
- T : absolute Temperatur des abstrahlenden Körpers

- Mit steigender Temperatur nehmen die Ausmaße aller Aggregatzustände zu
- Bei Gasen kommt es auch zur Druckerhöhung

Längenausdehnung bei Festkörpern

- α : linearer (thermischer) Ausdehnungskoeffizient

Volumenausdehnung

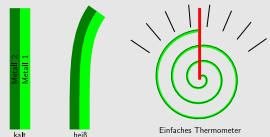
- γ : Volumenausdehnungskoeffizient ($= 3\alpha$)

Quecksilber Thermometer

- Beruht auf Volumenausdehnung
- Ausdehnung **nicht ganz linear**, aber besser als die meisten Flüssigkeiten
- Gefrierpunkt bei $-38,87^{\circ}\text{C}$
- Bei tieferen Temperaturen: **Methanol**

Bi-Metall

- Streifen aus zwei Metallen mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten

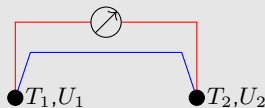


Widerstandsthermometer

- Elektrischer Widerstand nimmt bei Metallen mit der Temperatur zu
→ Messung des Widerstands
- Auch: Leitfähigkeit von Halbleitern (sinkt mit der Temperatur)

Thermoelemente

- Kontaktspannung U bei Berührung zweier unterschiedlicher Metalle
- U abhängig von der Temperatur, Empfindlichkeit etwa 10^{-5} V/K
- Großer Anwendungsbereich (-270°C bis -2000°C)



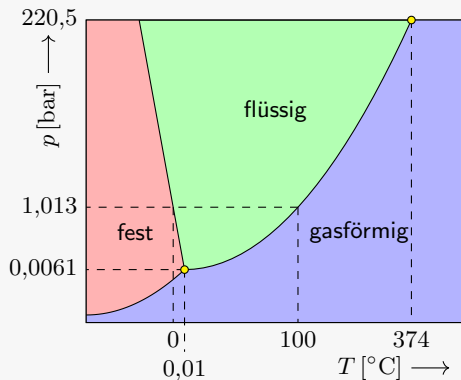
Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Zirkulation einer fast überall in den USA vorkommenden Grille

Dolbear'sches Gesetz

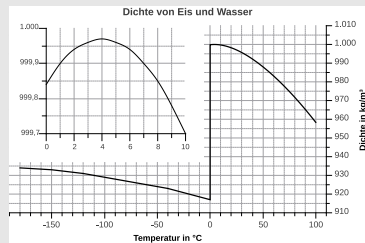
$$T_F = 60 + \left(\frac{N_{60s} - 92}{4,7} \right)$$

Oecanthus fultoni





Anomalie des Wassers



Ideales Gas

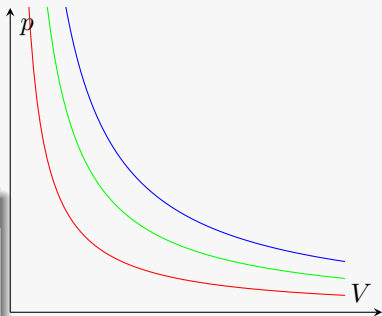
- Der Durchmesser der Atome oder Moleküle ist vernachlässigbar klein gegenüber dem mittleren Abstand zum nächsten Nachbarn
- Die Teilchen üben – außer beim Zusammenstoß – keinerlei Wechselwirkung aufeinander aus
- Alle Gase nähern sich dem idealen Gas bei hoher Temperatur und kleinem Druck
- Bei Edelgasen genügt bereits Zimmertemperatur und Atmosphärendruck

Zustandsgrößen zur Beschreibung des makroskopischen Zustands

- Druck p
- Temperatur T
- Volumen V

Isotherm: $T = \text{konstant}$

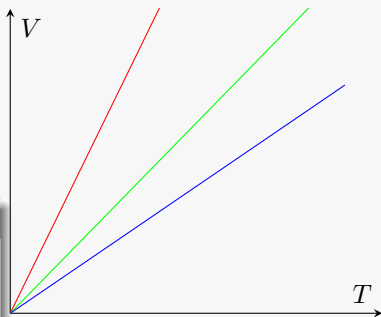
Gesetz von Boyle-Mariotte



$$T_1 > T_2 > T_3$$

Isobar: $p = \text{konstant}$

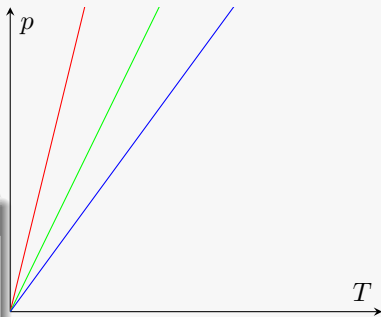
1. Gesetz von Gay-Lussac



$$p_1 > p_2 > p_3$$

Isochor: $V = \text{konstant}$

2. Gesetz von Gay-Lussac



$$V_1 > V_2 > V_3$$

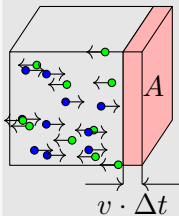
- System wird von einem Zustand in einen anderen überführt wird, ohne Wärme mit seiner Umgebung auszutauschen

Allgemeine Zustandsänderung

- Universelle Gaskonstante $R_m = 8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- n : Stoffmenge in mol

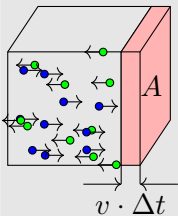
Verknüpfung der Zustandsgrößen mit (Brownscher) Bewegung der Teilchen

Zusammenhang zwischen mittlerer Geschwindigkeit v und Druck p



Verknüpfung der Zustandsgrößen mit (Brownscher) Bewegung der Teilchen

Zusammenhang zwischen mittlerer Geschwindigkeit v und Druck p



- Impulsübetrag bei Stoß mit Wand: $\Delta p = 2mv$
- Drei Bewegungsrichtungen, 6 Wände
- N Teilchen im Volumen
- Stöße auf Fläche A pro Sekunde: $n = \frac{1}{6} \frac{N}{V} Av$

$$p = \frac{F}{A} = \frac{\Delta p}{\Delta t} \frac{1}{A} = \frac{n \cdot (2mv)}{A} = \frac{1}{6} \frac{N}{V} \cdot 2mv^2 = \frac{Nmv^2}{3V} = \frac{1}{3} N \rho v^2$$

$$\text{Es gilt: } E_{\text{kin}} = N \overline{E_{\text{kin}}} = N \frac{1}{2} m v^2 \quad \Rightarrow \quad v^2 = \frac{2 E_{\text{kin}}}{N m}$$

$$p = \frac{1}{3} N \frac{m}{V} \frac{2 E_{\text{kin}}}{N m} = \frac{2}{3} \frac{E_{\text{kin}}}{V}$$

p zusammen mit Gasgleichung ($\frac{pV}{T} = nR_m$)

Mittlere kinetische Energie eines Moleküls

Boltzman-Konstante: $k_B = R_m/N_A = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

p zusammen mit Gasgleichung ($\frac{pV}{T} = nR_m$)

$$\frac{2}{3} \frac{E_{\text{kin}}}{V} = \frac{nR_m T}{V}$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{3}{2} n R_m T$$

$$\overline{E_{\text{kin}}} = \frac{3}{2} \frac{n R_m T}{N} = \frac{3}{2} \frac{n R_m T}{n N_A} = \frac{3}{2} k_B T$$

Mittlere kinetische Energie eines Moleküls

$$\overline{E_{\text{kin}}} = \frac{3}{2} k_B T$$

Boltzman-Konstante: $k_B = R_m / N_A = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

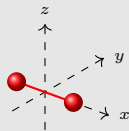
Freiheitsgrade und Energie

Freiheitsgrad: Variable, die Energie aufnehmen kann.

- Drei Translationsfreiheitsgrade: x, y, z

Mittlere Energie pro Freiheitsgrad: $\overline{E_{\text{kin}}} = \frac{1}{2}k_B T$

Mehratomige Gase



Gleichverteilungssatz

- Der Wärmehalt eines Stoffs nimmt pro Freiheitsgrad den Wert $\frac{1}{2}k_B T$ an.
- Zweiatomiges Molekül: $\frac{5}{2}k_B T$
- Dreiatomiges Molekül: $3k_B T$

Summe der kinetischen und potentiellen Energien der Moleküle einer Stoffmenge

- Für ideale Gase werden Wechselwirkungen vernachlässigt
→ nur kinetische Energie

$$U = N \cdot \overline{E_{\text{kin}}} = nN_A \cdot \overline{E_{\text{kin}}} = nN_A \cdot \frac{f}{2} \cdot k_B T$$

$$U = \frac{f}{2} \cdot nR_m \cdot T$$

Die Summe der einem System von außen zugeführten **Wärme** dQ und der an ihm verrichteten **Arbeit** dW ist gleich der Zunahme der **inneren Energie** dU des Systems

$$dU = dQ + dW$$

- System wird von einem Zustand in einen anderen überführt wird, ohne Wärme mit seiner Umgebung auszutauschen

$$dQ = 0 \quad \rightarrow \quad dU = dW$$

Was passiert mit der Temperatur, wenn ich das Volumen ändere?

$$dU = \frac{f}{2} n R_m \cdot dT = -p \cdot dV = dW$$

$$\text{Es gilt: } \frac{pV}{T} = n R_m$$

$$\Rightarrow \frac{dT}{T} = -\frac{2}{f} \frac{dV}{V}$$

- Es treten sowohl **reversible** als auch **irreversible** Vorgänge auf.
- Irreversible Vorgänge laufen nur in eine Richtung ab (z.B. freie Expansion von Gas)
- Wesentliche Zustandsgröße der Wärmelehre

$$\Delta s = \int \frac{dQ}{T}$$

- Entropie nimmt ab, wenn ich dem System Wärme entziehe
- Bei einem reversiblen Prozess ist die Entropieänderung des Universums Null

Verschiedene Formulierungen. . .

Alle Vorgänge in einem abgeschlossenen System verlaufen in dem Sinne, dass sich Ordnung, soweit irgendwie möglich, in Unordnung umgewandelt.

- Der Endzustand ist also immer derjenige, in dem der Ordnungszustand des Systems den niedrigsten Grad erreicht hat
- Ein abgeschlossenes System strebt eine Zustand mit maximaler Entropie an

2. Hauptsatz der Thermodynamik

Verschiedene Formulierungen. . .

Alle Vorgänge in einem abgeschlossenen System verlaufen in dem Sinne, dass sich Ordnung, soweit irgendwie möglich, in Unordnung umgewandelt.

- Der Endzustand ist also immer derjenige, in dem der Ordnungszustand des Systems den niedrigsten Grad erreicht hat
- Ein abgeschlossenes System strebt eine Zustand mit maximaler Entropie an



Auch noch wichtig!

Weitere (prüfungsrelevante) Themen der Wärmelehre, siehe Kapitel 3 in
http://wwiexp.desy.de/users/uwe.holm/physik_www_aug_2005.pdf

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!