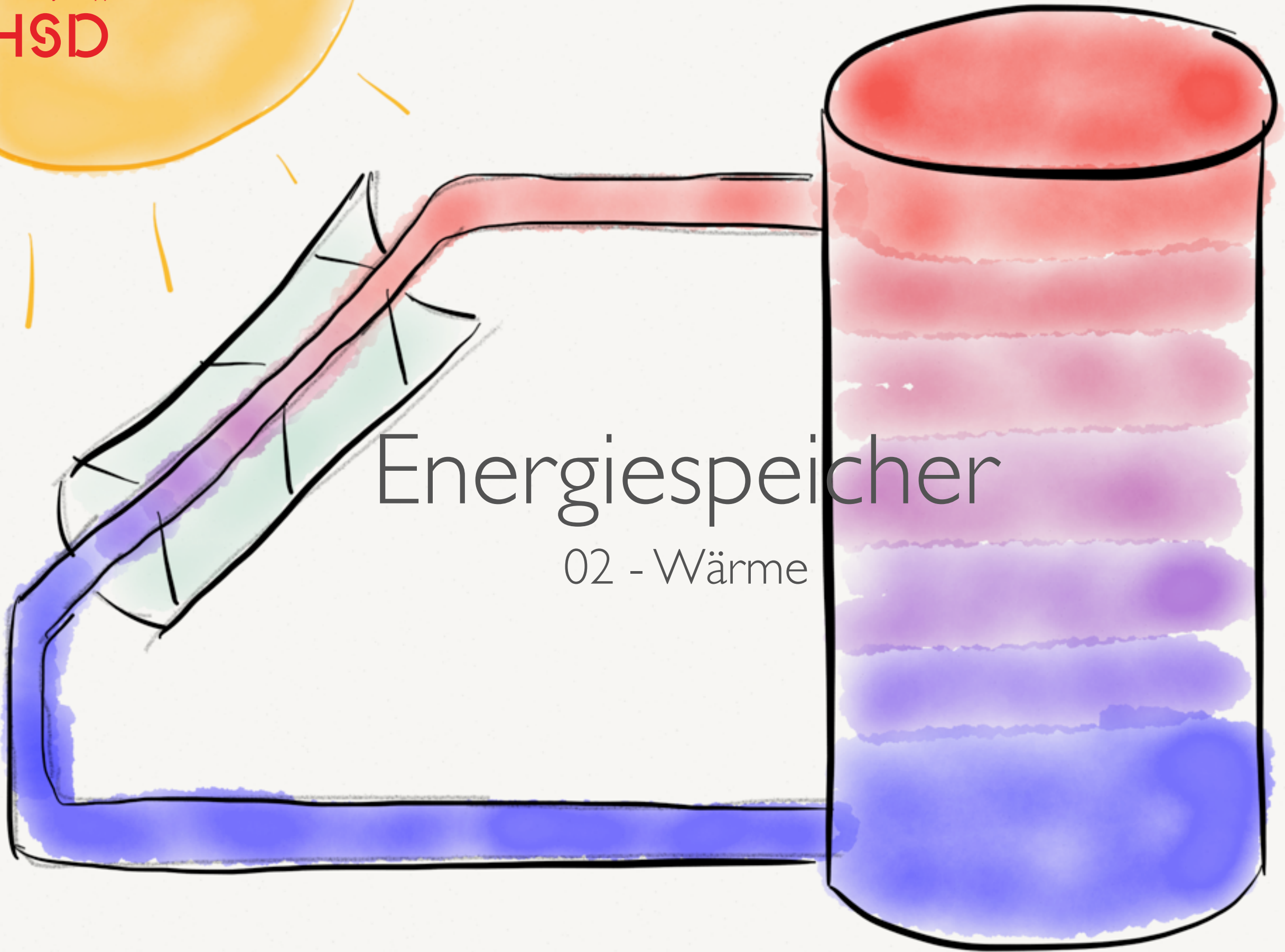


Energiespeicher

02 - Wärme



Wiederholung

Energiearten

Primärenergie



- Kernenergie

- Chemische Energie



Quelle:



Physikalische Energie

- Potentielle Energie

- Kinetische Energie

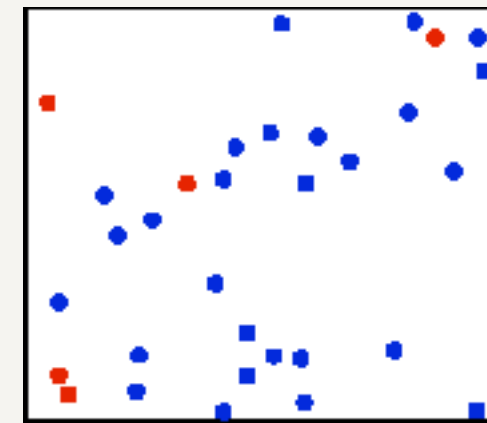
- Innere Energie

Innere Energie

Innere Energie

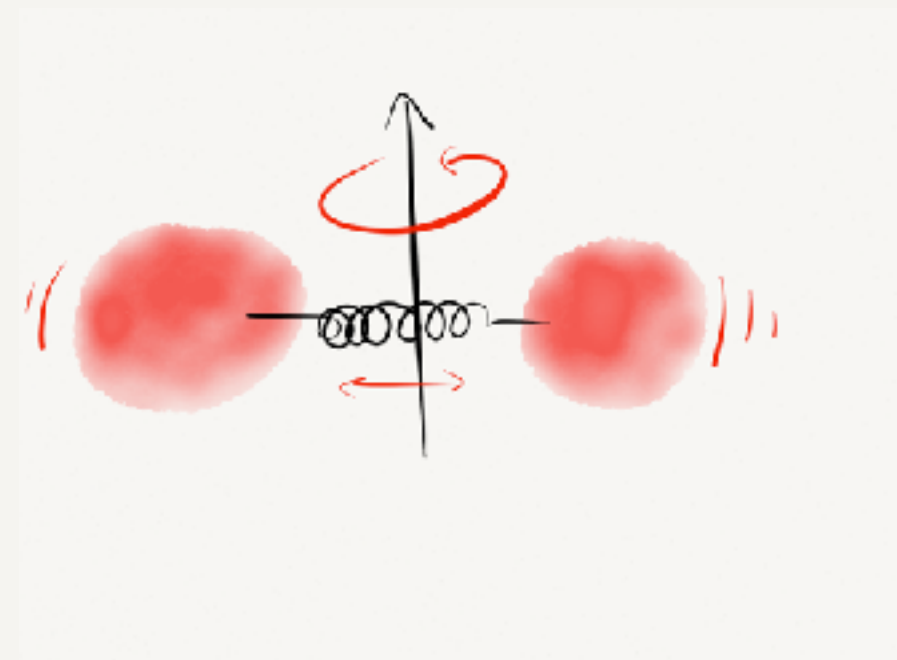
- Die innere Energie beschreibt die kinetische und potenzielle Energie aller Moleküle im System
- Sie teilt sich in translatorische, rotatorische und vibratorische Beiträge auf
- Dazu gehören auch Bindungsenergien
 - ▶ Chemische
 - ▶ Nukleare

Translation



Reales Gas

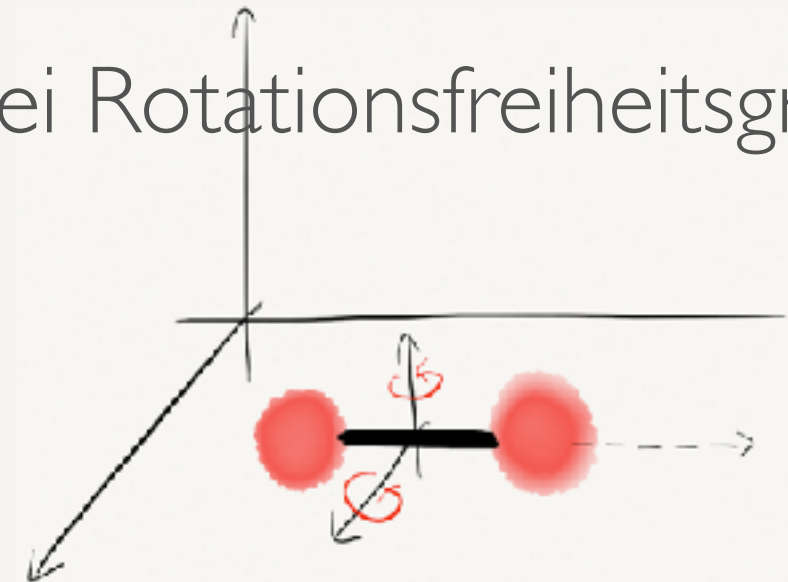
Rotation und Vibration



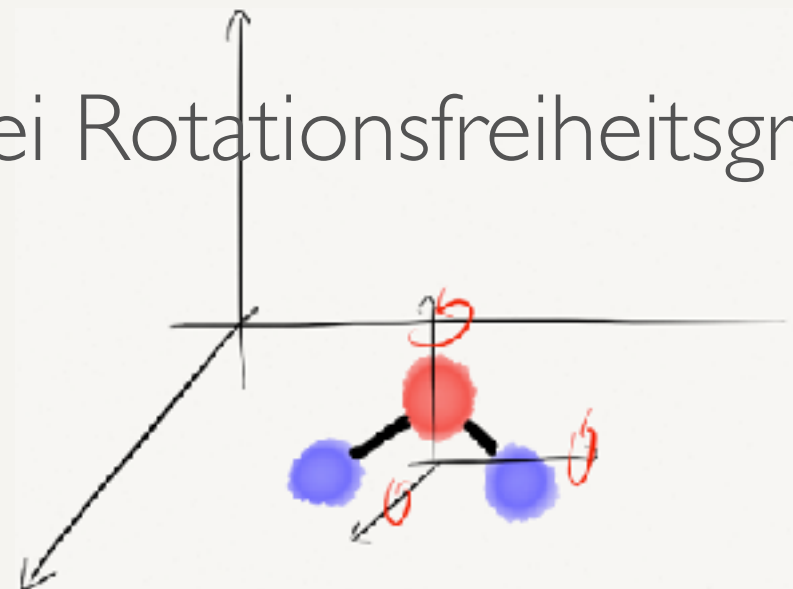
Innere Energie eines Gases

- Ideales einatomiges Gas: ausschließlich die drei Freiheitsgrade der Bewegung
- Mehratomige Gase: zusätzliche zwei bis drei Rotationsfreiheitsgrade (Schwingungsfreiheitsgrade noch „eingefroren“)
- Chemische sind in erster Näherung nicht vorhanden.
- Reales Gas: Wechselwirkung zwischen den Molekülen wird berücksichtigt.
- Nukleare spielen bei stabilen Isotopen keine Rolle.

Zwei Rotationsfreiheitsgrade



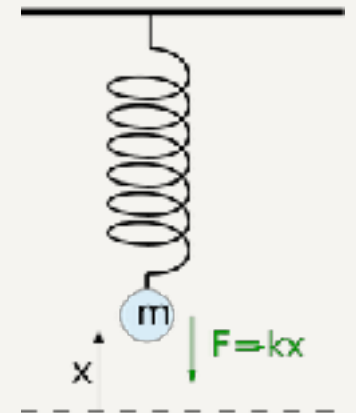
Drei Rotationsfreiheitsgrade



Molekülschwingungen

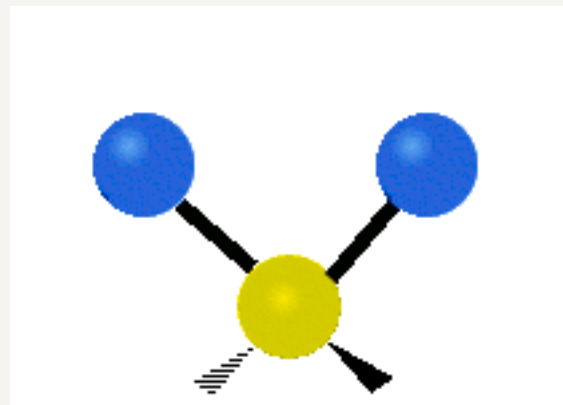
Harmonischer Oszillator:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

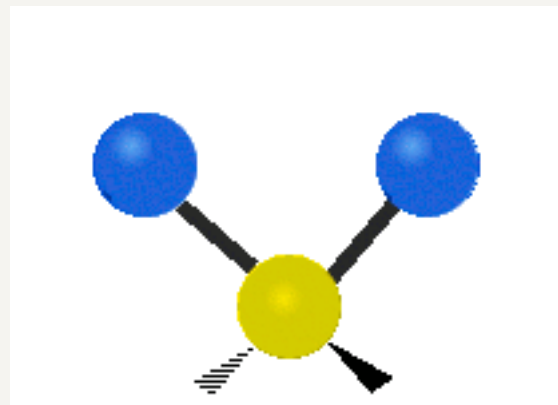


- Die Schwingungsfrequenzen hängen von der Stärke der Bindung und den Massen der schwingenden Atome ab.
- Die Rotationsenergie hängt auch von der Masse des Moleküls ab.
- Bei größeren Molekülen können Molekülgruppen gegen den Rest schwingen
- **Masse:** Bindungen mit Wasserstoff-Atomen haben höhere Frequenzen als Bindungen mit schweren Atomen (C, N, O).
- **Federkonstante:** Dreifach-Bindungen haben höhere Frequenzen als zweifach-Bindungen als einfach-Bindungen.

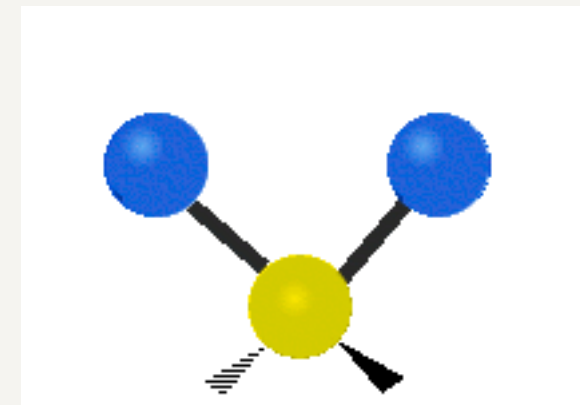
Molekülschwingungen



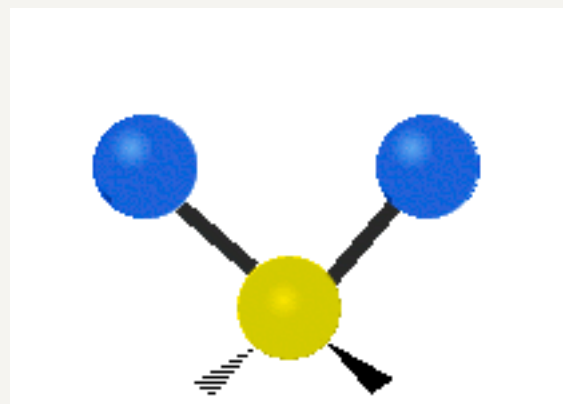
Symmetrische
Streckschwingung



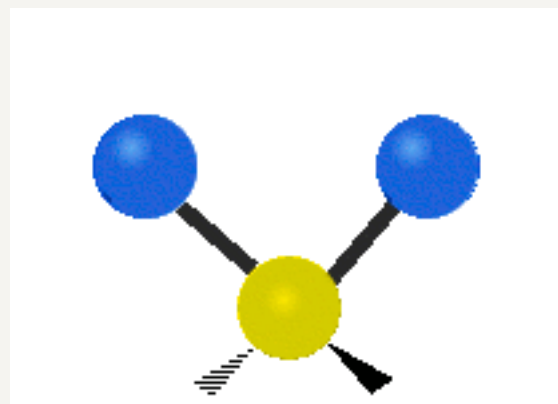
Asymmetrische
Streckschwingung



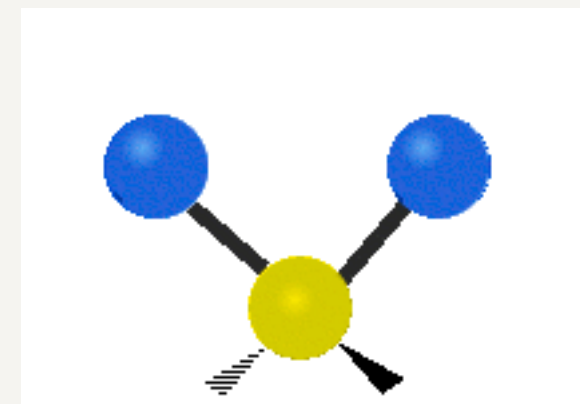
Schaukel-
schwingung



Scher-
schwingung

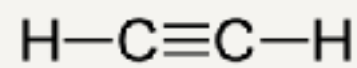


Dreh-
schwingung

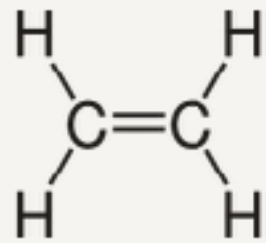


Wipp-
schwingung

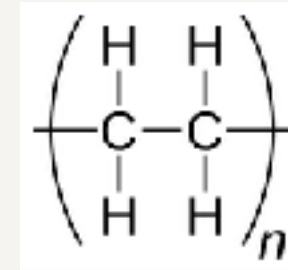
Molekülschwingungen



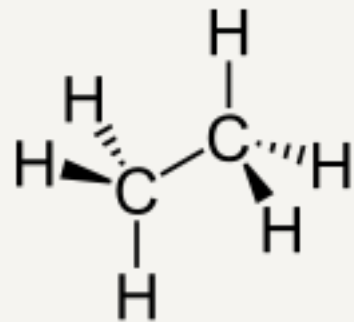
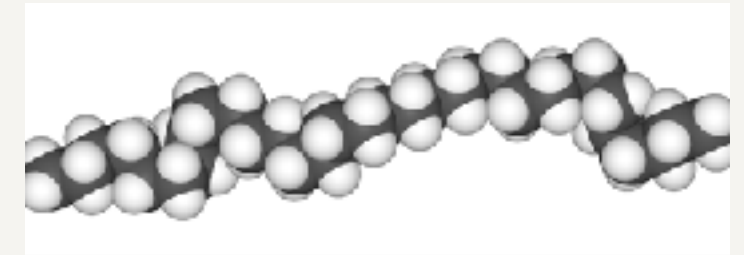
Ethin



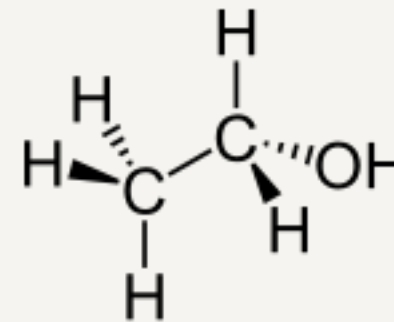
Ethen (Ethylen)



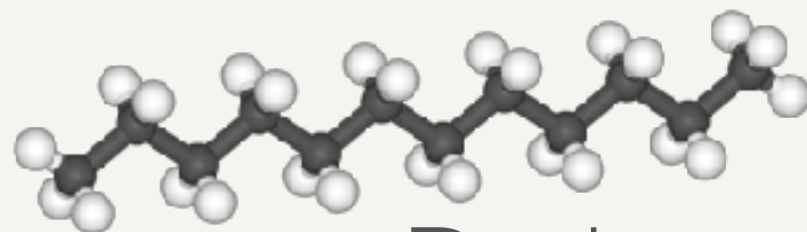
Polyethylen



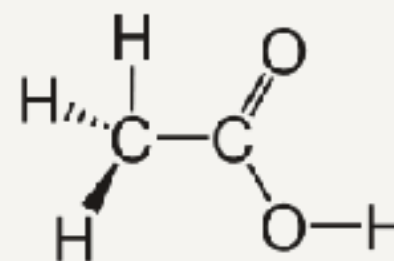
Ethan



Ethanol



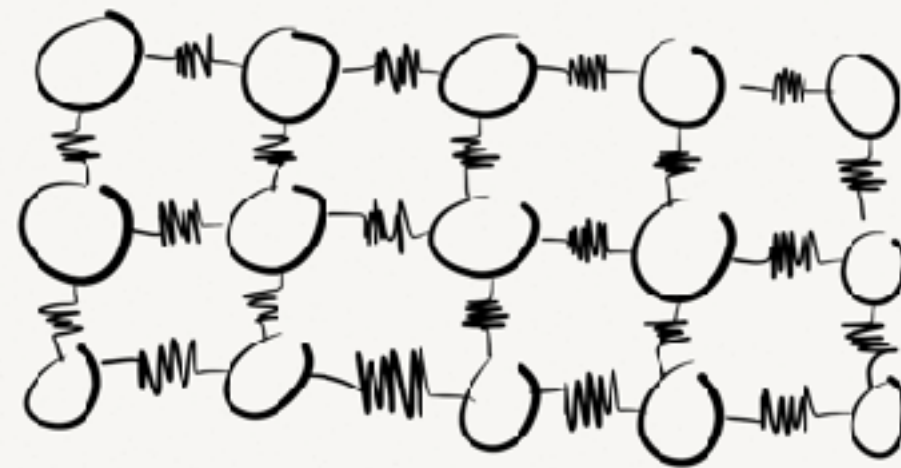
n-Dodecan



Essigsäure

Innere Energie des Festkörpers

- Wärme ist Bewegung der Atome.
- Im Festkörper ist Bewegung die Schwingung der einzelnen Atomen bzw. der ganzen Atom-Kette.
- Diese Energie ist aber so niedrig, dass die Atome alle an ihren Plätzen bleiben.



Wärme

Wärme ist nicht Temperatur

- **Wärme ist Energie**, nicht Temperatur!
- Wärme wird in $[Q] = \text{J}$ angegeben.
- Der Begriff **Wärmemenge** verdeutlicht das besser.

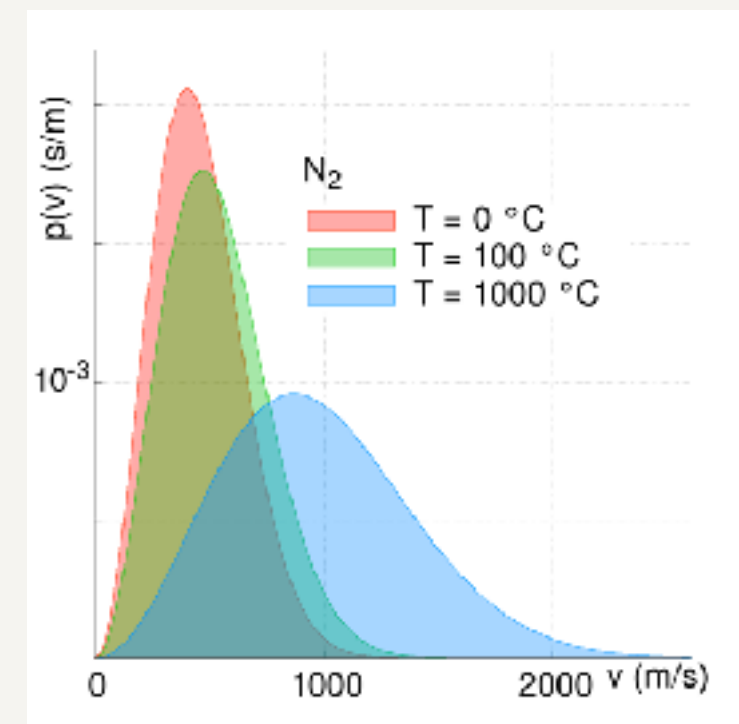
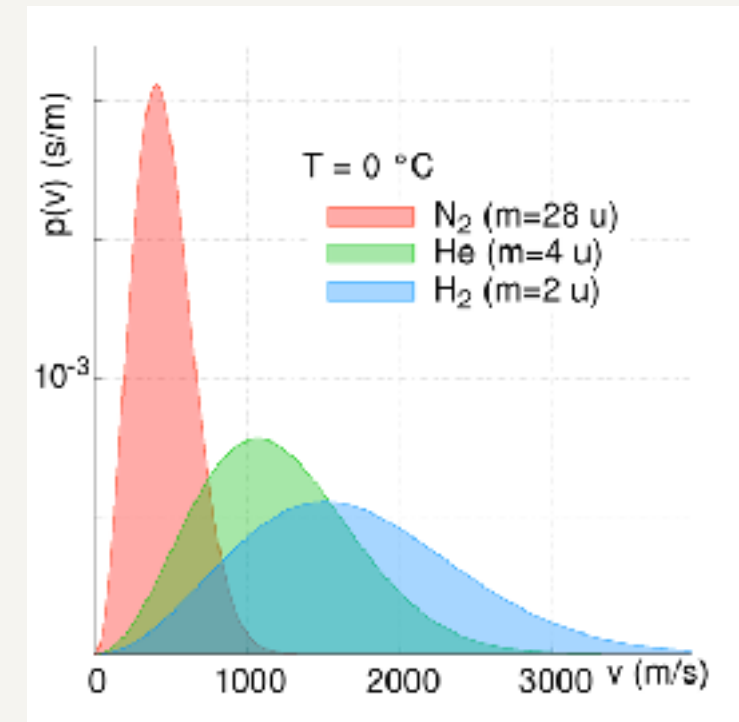
$$Q \neq T$$

Wärme in Gasen

Quelle:



- Innere Energie in Gasen
- Mittlere kinetische Energie so hoch, dass keine Flüssigkeit mehr gebildet wird.
- Konvektion oder Drift ist eine überlagerte Bewegung und keine Wärme!
- Geschwindigkeit = **Maxwell-Boltzmann-Verteilung**



Wärme in Flüssigkeiten und Festkörpern

- In Flüssigkeiten und Festkörpern ist die Geschwindigkeit der Atome und Moleküle so stark reduziert, dass anziehende Wechselwirkungen zwischen den Teilen dominant werden.
- In Festkörpern reicht die mittlere Energie (Boltzmann-Faktor!) nicht aus um die Plätze zu tauschen.
- Um einen Festkörper zu schmelzen muss so viel Energie hinzugefügt werden, dass die mittlere Energie die Bindungsenergie des Kristallgitters überwinden kann.
- Entsprechendes gilt beim Sieden einer Flüssigkeit.
- Die Bindungsenergie ist Teil der inneren Energie.

Wärmekapazität

$$Q = C \cdot \Delta T$$

- Wieviel Wärme kann in einem Stoff (Gas, Flüssigkeit, Festkörper) gespeichert werden.
- Symbol C
- Einheit J / K

$$C_V = \left. \frac{\partial U}{\partial T} \right|_V$$

$$C_p = \left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_p$$

H = Enthalpie. Dazu nächstes Mal mehr.

Wärmekapazität

- Die Wärmekapazität von Gasen und Flüssigkeiten wird typischerweise bei konstantem Volumen gemessen.
- Bei konstantem Druck vergrößert sich das Volumen und muss mechanische Arbeit gegen den Zylinderdruck aufbringen.
- Deswegen ist die Wärmekapazität bei konstantem Druck höher.

Wärmekapazität

Beispiele

- Luft: $1.0 \text{ kJ} / (\text{kg K})$
- Wasser (flüssig): $4.2 \text{ kJ} / (\text{kg K})$
- Kupfer: $0.385 \text{ kJ} / (\text{kg K})$

Aufgabe

- Potentielle Energie: Sie haben ein Pumpspeicherwerk mit einem Höhenunterschied von **210m**.
- Berechnen Sie die potentielle Energie und damit die Arbeit W um **1kg** Wasser hochzupumpen.
- Nehmen Sie für Wasser eine Wärmekapazität von **4.2 kJ / (kg K)** an.
- Wie warm können Sie das Wasser mit der eingesetzten Arbeit W damit machen?

Gesetz von Dulong-Petit

- Das Gesetz von Dulong-Petit beschreibt die Wärmekapazität von Festkörpern bei ‚hohen‘ Temperaturen (Raumtemperatur)
- Jedes Atom im Festkörper kann in drei Raumrichtungen schwingen.
- Jede Schwingung hat im Mittel die kinetische Energie $k_B T$.
- Pro Atom also $3k_B T$.
- Pro Mol also $3k_B T N_A$

$$U = N_A 3 k_B T$$

$$C = \frac{\partial U}{\partial T} \\ = 3N_A k_B$$

Aufgabe

- Rechnen Sie den Zahlenwert des Gesetzes von Dulong-Petit aus.

$$\begin{aligned} C &= \frac{\partial U}{\partial T} \\ &= 3N_A k_B \\ &= 24.9 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \end{aligned}$$

Aufgabe

- Vergleichen Sie den Wert von Kupfer mit dem Ergebnis aus dem Gesetz von Dulong-Petit.

Literatur

1. Stieglitz, Heinzel: Thermische Solarenergie, Springer (2008)
2. U. Sauer et al: Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, SEFEP (2012). Übersetzung der englischen Originalversion. Siehe www.sefep.eu.
3. Weigand, Köhler, v. Wolfersdorf: Thermodynamik kompakt, Springer-Vieweg (2013)