



Termodynamika 2 – FYZ2

2023 FS

Ing. Štěpán Kunc, Ph.D.

stepan.kunc@tul.cz

Základní pojmy molekulové fyziky

Termodynamické děje:

izobarický děj

izochorický děj

izotermický děj

adiabatický děj

polytropický děj

tlak je konstantní : $p = \text{konst.}$

objem je konstantní: $V = \text{konst.}$

teplota je konstantní: $T = \text{konst.}$

neprobíhá tepelná výměna s okolím

tepelná kapacita soustavy je konstantní
 $C = \text{konst.}$

Základní pojmy termodynamiky

Energie termodynamické soustavy:

Kinetická energie W_K
Potenciální energie W_P



Celková mechanická energie
soustavy jako celku

$$W_K + W_P + U = E \quad \leftarrow \text{Celková energie soustavy } E$$

1. Celková kinetická energie tepelného pohybu částic E_k
2. Celková potenciální energie částic E_p
3. Energie elektronů v atomech
4. Energie jader atomů částic



Vnitřní energie U

Závisí pouze na termodynamickém stavu soustavy nemění se změnou polohy ani rychlosti soustavy jako celku

Závisí pouze na charakteru pohybu a Vzájemného působení částic

Pokud uvažujeme děje, při nichž se nemění poslední dvě složky vnitřní energie (např. neprobíhají chemické reakce, ionizace, rekombinace a jaderné přeměny), postačí uvažovat vztah



$$E_K + E_P = U$$

Základní pojmy termodynamiky

Změna vnitřní energie soustavy:

Při zkoumání dějů, které probíhají mezi soustavou a okolím, resp. mezi tělesy tvořícími soustavu, nás většinou zajímá pouze *změna vnitřní energie*. Ta může nastat obecně dvěma ději: konáním práce a tepelnou výměnou.

A: Konáním práce – soustava koná práci nebo vnější síly konají práci na soustavě. (komprese expanze)

Adiabaticky izolovaná uzavřená soustava:

1. Komprese – Při působení vnějšího síly F – zvýšení střední kinetické energie – zvýšení vnitřní potenciální energie, jako projev se zvýší teplota.

$$A = U_2 - U_1 = \Delta U \quad \Delta U > 0$$

2. Expanze – Plyn koná práci – sníží se střední kinetické energie – sníží vnitřní potenciální energie, jako projev se sníží teplota.

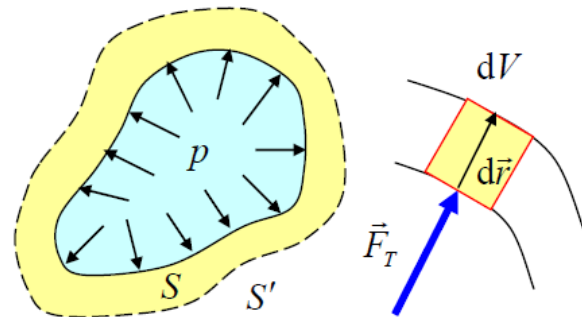
$$A' = U_2 - U_1 = \Delta U \quad \Delta U < 0$$

3. Plyn v pružné bláně: Vnitřní tlaková síla: $\vec{F}_t = p d\vec{S} = p \vec{n} ds$

Práce vnitřních sil: $dA' = \vec{F}_t d\vec{r} = p dS dr = p dV$

$$dV > 0 \quad \longrightarrow \quad A' > 0$$

$$dV < 0 \quad \longrightarrow \quad A' < 0$$



Základní pojmy termodynamiky

Změna vnitřní energie soustavy:

Při zkoumání dějů, které probíhají mezi soustavou a okolím, resp. mezi tělesy tvořícími soustavu, nás většinou zajímá pouze *změna vnitřní energie*. Ta může nastat obecně dvěma ději: konáním práce a tepelnou výměnou.

A: Tepelnou výměnou

Tělesa si vyměňují energii

1. Pomocí srážek částic v místě styku
2. Pomocí tepelného (elmag.) záření

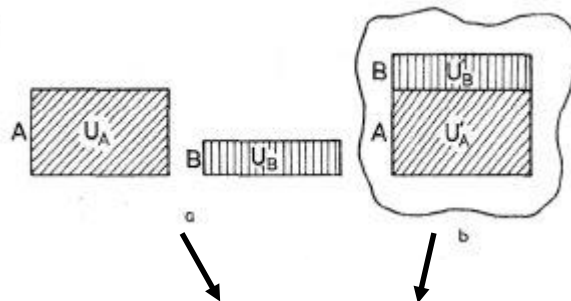
Teplo Q je mírou změny vnitřní Energie při tepelné výměně mezi Dvěma soustavami (soustava, okolí)

$$Q = \Delta U > 0$$

Dodání tepla

$$Q' = \Delta U < 0$$

Odebírání tepla



$$U_A + U_B = U'_A + U'_B$$

Tepelná bilance výměny

$$\Delta U_A + \Delta U_B = Q_A + Q_B = 0$$

$$Q_A = -Q_B$$



Základní pojmy termodynamiky

Teplota:

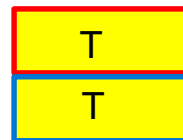
Teplota je stavová veličina, která charakterizuje stav termodynamické rovnováhy soustavy. Znalost teploty zkoumaných těles umožňuje říci, zda mezi tělesy nastane tepelná výměna a jaký je její „směr“.

Tepelná rovnováha:

Jsou-li dvě tělesa A a B v kontaktu, potom po určité době nastane **tepelná rovnováha**.
Ve stavu tepelné rovnováhy neprobíhá tepelná výměna.
Obě tělesa mají stejnou teplotu **T**.

Nultý zákon termodynamiky:

Pokud dva systémy jsou v termální rovnováze s třetím systémem, pak jsou též ve vzájemné termální rovnováze.



$$Q_a = Q_b = 0$$



Měření teploty T

Umožňuje jedno z těles stanovit jako „teploměr“

Základní pojmy termodynamiky

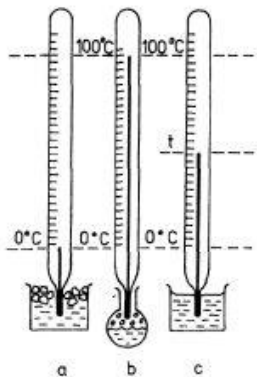
Měření Teploty:

Teploměr:

1. Veličina, která popisuje některou vlastnost citlivého elementu teploměru, se musí výrazně monotonně měnit při tepelné výměně. Příkladem je objem kapaliny nebo plynu, tlak, elektrický odpor, termoelektrické napětí, magnetická susceptibilita apod.
2. Citlivý element teploměru nesmí být velkých rozměrů, aby tepelná výměna mezi tělesem a teploměrem neovlivňovala příliš původní teplotu tělesa.

A. Kapalinové teploměry:

$$V = V_0(1 + \beta t) \quad \beta = f(t) \quad \beta = \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} [K^{-1}] \quad \text{Objemová roztažnost kapalin}$$



$$t = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0} \cdot 100^\circ\text{C} \quad \beta = \frac{V_{100} - V_0}{100V_0} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Závisí na typu kapaliny (např. líh, rtuť), objemová roztažnost závislá na teplotě

Celsiova stupnice:

V denní praxi měříme nejčastěji teplotu v *Celsiově teplotní stupnici*. K jejímu sestavení volíme dva základní stavy:

Rovnovážný stav chemicky čisté vody a jejího ledu za normálního tlaku. Tomuto stavu přiřazujeme dohodou teplotu 0°C .

Rovnovážný stav chemicky čisté vody a její syté páry za normálního tlaku. Tomuto stavu přiřazujeme dohodou teplotu 100°C .

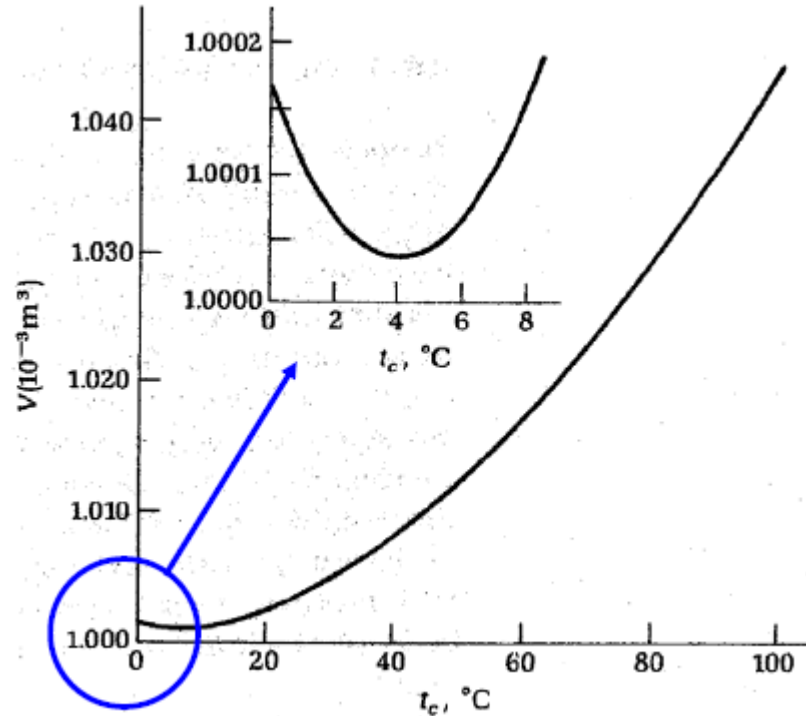
Rozdělíme-li teplotní stupnici mezi těmito základními teplotami na 100 stejných dílků, odpovídá jeden dílek teplotnímu rozdílu *jednoho Celsiova stupně* (1°C).

Teplotní stupnice kapalinových teploměrů jsou závislé na použité teplotoměrné látce.

Základní pojmy termodynamiky

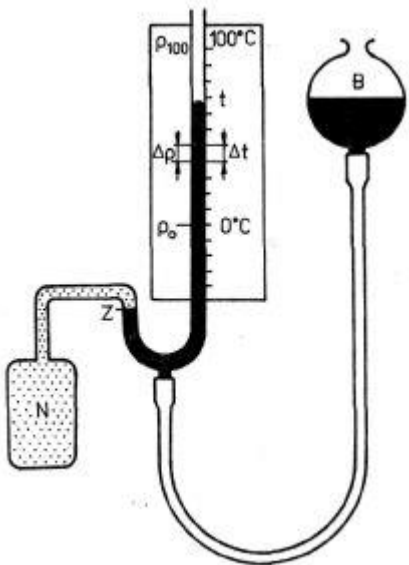
Anomálie vody:

Anomální roztažnost – anomálie 4°C



Základní pojmy termodynamiky

B: plynové teploměry - Kapalinové teploměry závislé na kapalině
Zředěné plyny nezávislé na stupnici - *plynové teplotní stupnice*.
Neměříme změnu objemu ale změnu tlaku



$$t = \frac{p - p_0}{p_{100} - p_0} \cdot 100^\circ\text{C} \quad p = p_0(1 + \gamma t)$$

Objemová rozpínavost plynů
Pro řídké plyny

$$\gamma = \frac{p_{100} - p_0}{100p_0} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \doteq \textit{konst.}$$

$$t_0 = \frac{1}{\gamma}$$

$$p = \frac{p_0}{t_0} (t + t_0)$$

$$\gamma = 3,661 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

$$p = 0 \quad t = -273,15$$

Absolutní nula - nedosažitelná

Absolutní teplota

$$T = \{t + 273,15\} \text{ } K$$

$$1K = 1^\circ\text{C}$$

Základní pojmy termodynamiky

Absolutní teplotní stupnice:

$$p = \frac{p_0}{t_0} (t + t_0) \longrightarrow$$

$$p = \frac{p_0}{T_0} T \quad V = \text{konst.}$$

← Charlesův izochorický zákon

$$1K = \frac{T_0}{273,15}$$

referenční stav:
trojný bod vody
- teplota $T_0 = 273,16 \text{ K}$
- tlak $p = 613 \text{ Pa}$

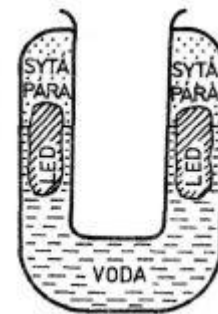
Termodynamická teplotní stupnice:

Totožná s absolutní

Mezinárodní teplotní stupnice SI

Nezávislá ne teploměrné látky

Definována pomocí trojných bodů



$$V = \frac{V}{V_0} T \quad p = \text{konst.}$$

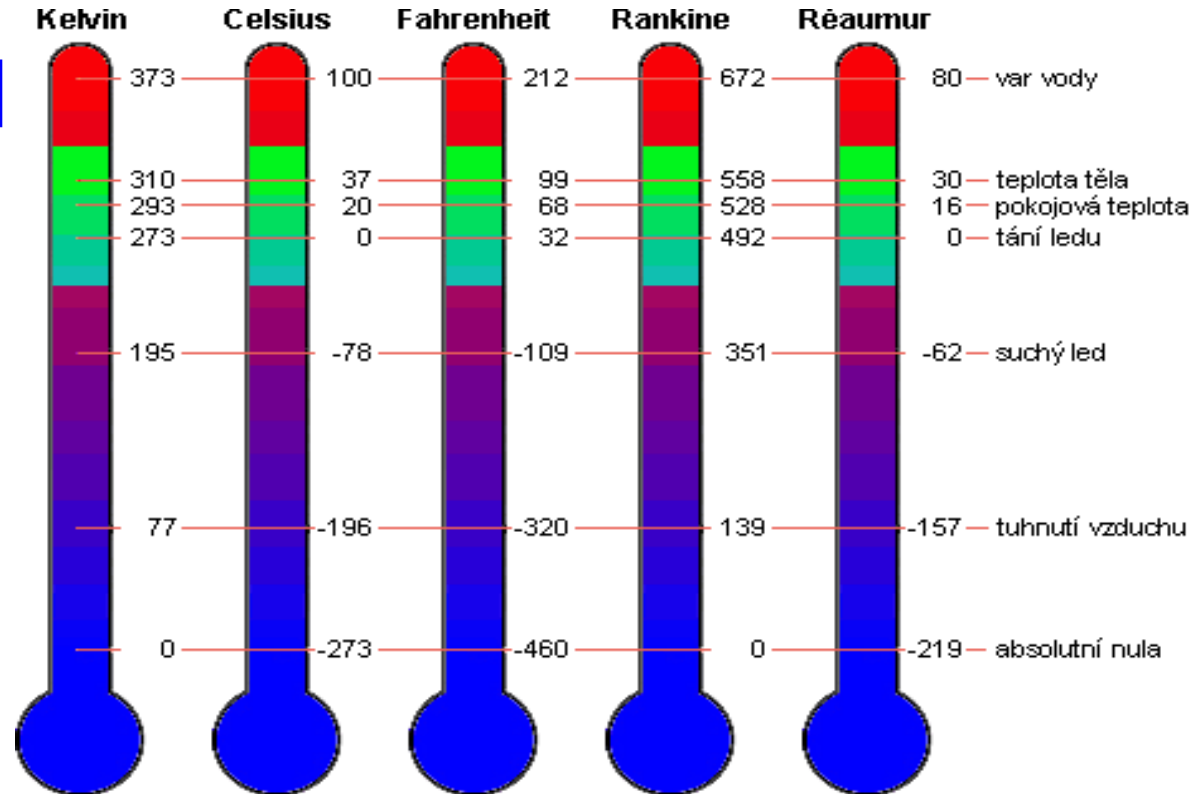
← Gay-Lussacův izobarický zákon

Základní pojmy termodynamiky

Teplotní stupnice:

Fahrenheitova teplotní stupnice:

$$^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} \times 1.8 + 32$$



Základní pojmy termodynamiky

Měření teploty:

A: Dotykové

Kapalinové

Plynové

Bimetalové

Odporové

Termo-elektrické

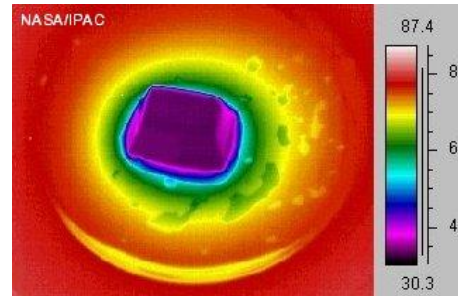
Magnetické

B. Bezdotykové

term. venkovní kamera,
citl. < 100 mK



termokamera pro iPhone
(350 USD)



Tající kostka ledu



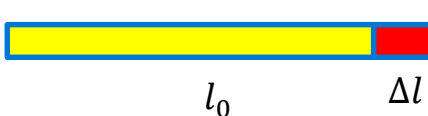
pyrometr

Základní pojmy termodynamiky

Teplotní roztažnost látek:

Délková roztažnost:

$$\alpha = \frac{dl}{dt} \frac{1}{l} [K^{-1}] \quad l = l_0(1 + \alpha t) \quad \alpha = f(t)$$



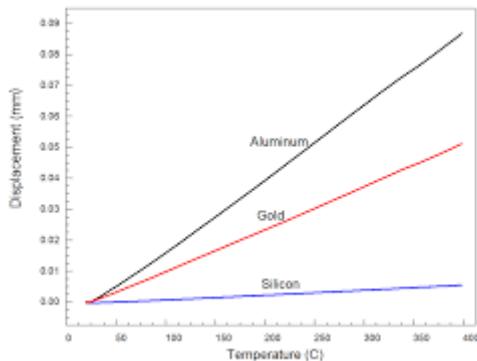
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta t$$

Objemová roztažnost:

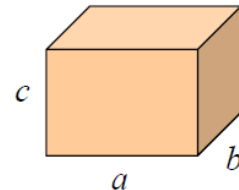
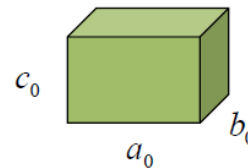
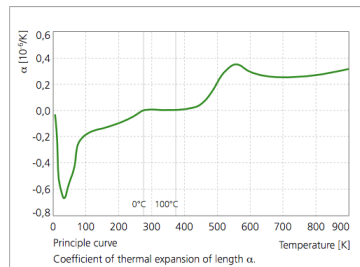
$$V(t) = l(t)^3$$

$$V = abc = a_0 b_0 c_0 (1 + \alpha t)^3 \approx V_0 (1 + 3\alpha)$$

$$\beta = 3\alpha \quad \text{Koeficient objemové roztažnosti}$$

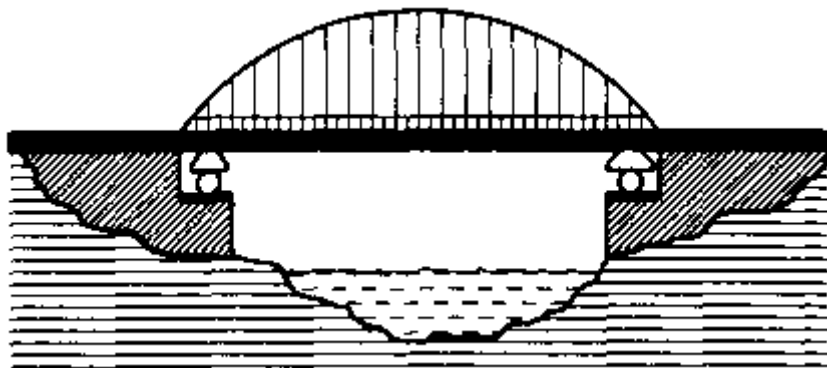


Invar a Zerodur



Základní pojmy termodynamiky

Teplotní roztažnost látek:



Materiál	$\alpha, \beta \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$
ocel	10-12
hliník	24
invar	0,1-0,9
dřevo	6-9
dřevo \perp	55
cihla	3-8
beton	5-10
sklo	7-9
rtuť	180-189
líh	1100
voda (20°C)	2070

Základní pojmy termodynamiky

Teplotní roztažnost látek:

Příklad teplotní roztažnost

Základní pojmy termodynamiky

Tepelná kapacita:

$$C = \frac{dQ}{dT} [JK^{-1}] \quad \text{Množství tepla, které je nutné dodat na ohřátí o 1K}$$

Měrná tepelná kapacita:

$$c = \frac{dQ}{dT} \frac{1}{m} [JkgK^{-1}] \quad \text{Množství tepla, které je nutné dodat na ohřátí 1kg o 1K}$$

U pevných látek a kapalin určujeme tepelnou kapacitu při konstantním tlaku p

U plynů tepelná kapacita závisí na podmínkách, při kterých je určována

$$p = \text{konst.} \rightarrow C_p$$

$$V = \text{konst.} \rightarrow C_V$$

$$C_p > C_V$$

Pro plyny

$$\text{Poissonova konstanta} \quad \kappa = \frac{C_p}{C_V} > 1$$

Adiabatický děj

Tab. Tepelná kapacita (akumulační schopnost)

materiál	měrná tepelná kapacita c J/(kg*K)
rostlé dřevo smrk/borovice	2510
dřevovláknité izolace	2100
cihla	880
čedičová vlna	840
beton	840
hliněná omítka	840
minerální vata	750
železo	446

solvent	Specific Heat Capacity(kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
water	4.18
ethanol	1.41
toluene	1.13
benzene	1.05
carbon	0.54
tetrachloride	0.54

Základní pojmy termodynamiky

Příklad kalorimetrická rovnice

Základní pojmy termodynamiky

Skupenské a fázové přechody:

Skupenství:

Plynné

Kapalné

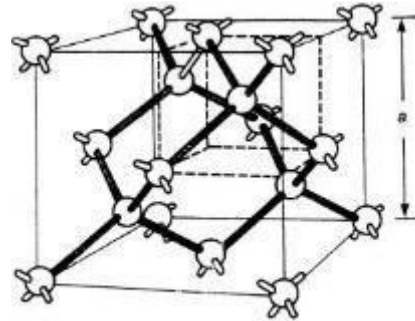
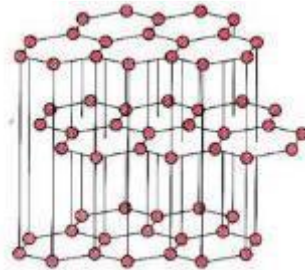
Pevné

Plazma

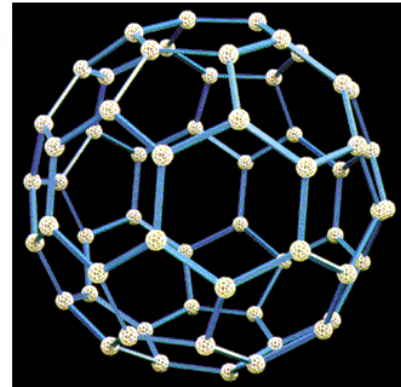
Fáze

V *termodynamice* označuje pojem **fáze** část *termodynamického systému*, tedy části prostoru vyplněného látkovým prostředím, ve které jsou fyzikální vlastnosti látky (jako např. *hustota*, *modul pružnosti/modul objemové pružnosti*, magnetická *permeabilita*, *index lomu*) a chemické složení v zásadě stejné.

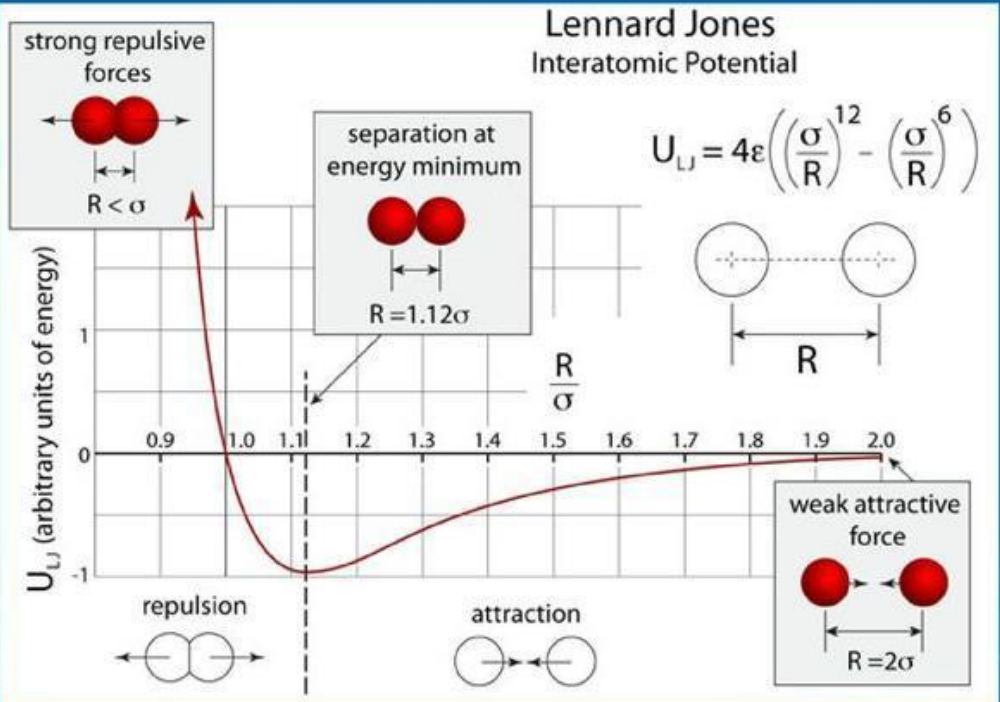
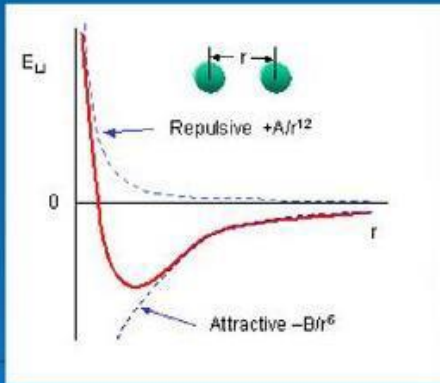
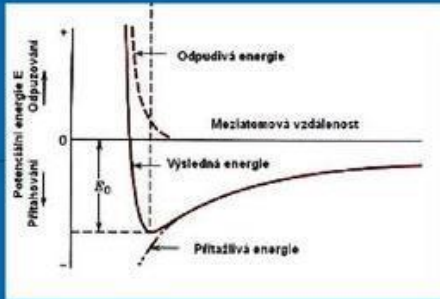
Fáze uhlíku



diamantová mřížka Si



Základní pojmy termodynamiky



Základní pojmy termodynamiky

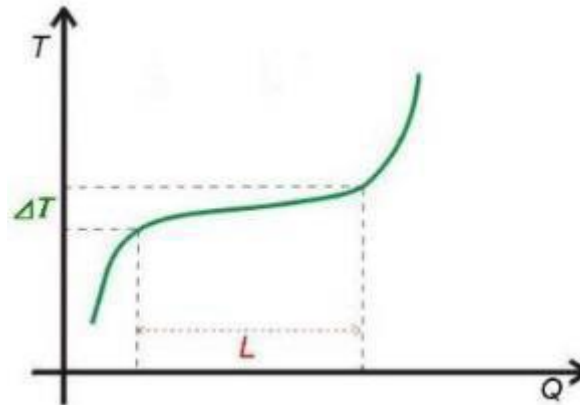
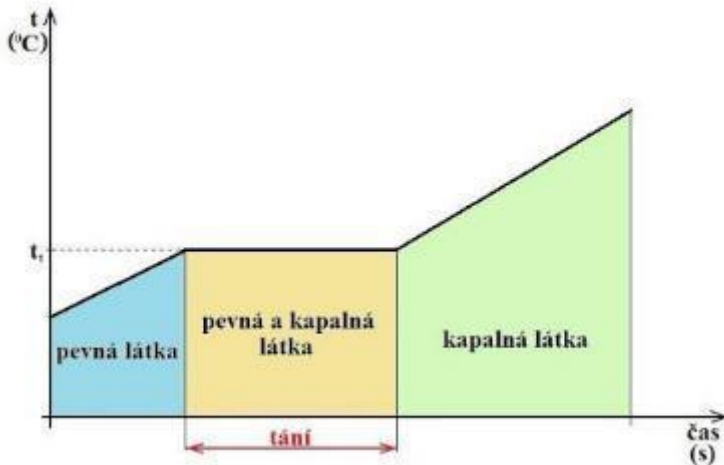
Tání a tuhnutí:

S rostoucí teplotou rostou vibrace-atomy, molekuly se od sebe více vzdalují, až bude přitažlivá síla velmi malá stoupne pravděpodobnost jejich oddělení **Nastane tání** S klesající teplotou se atomy opět zachytávají

$$l_t = \frac{dQ_t}{dm}$$

Skupenské teplo tání a tuhnutí

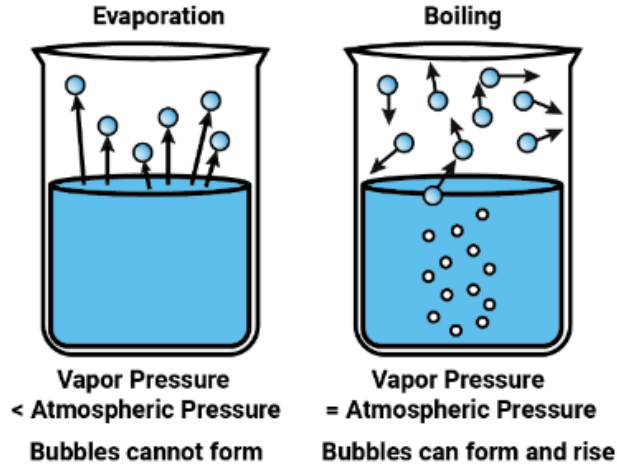
Graf tání pevné krystalické látky



Látky s nečistotami, více fázemi atd.

Základní pojmy termodynamiky

Vypařování, var, kondenzace:



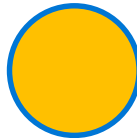
Sytá (nasyčená pára) je v termodynamické rovnováze s kapalinou o stejné teplotě a tlaku. Jedná se o dynamickou rovnováhu, při které je vypařená látka přesně nahrazena zkondenzovanou

Vypařování - nastává za každé teploty –povrchový jev, ochlazuje kapalinu, unikají molekuly s velkou energií

Var - obdoba vypařování, ale na vnitřní stěně bublinek v kapalině, v objemu. Pokud tlak uvnitř bublinky překročí okolní tlak, nastane bouřlivý var.

$$l_V = \frac{dQ_V}{dm} \quad \text{Skupenské teplo tání a tuhnutí}$$

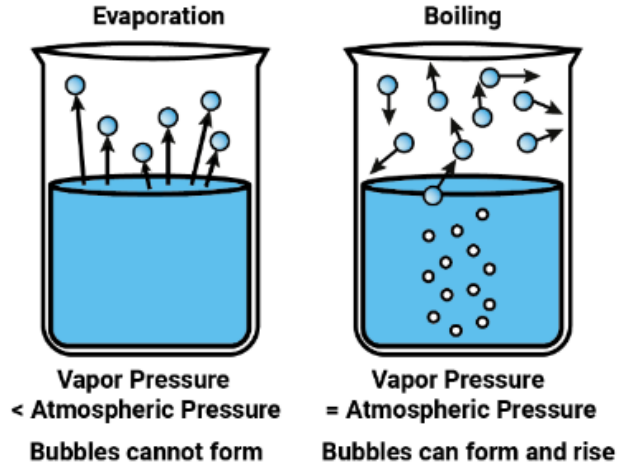
Nasyčená pára uvnitř bublinky



$$l_V > l_t$$

Základní pojmy termodynamiky

Vypařování, var, kondenzace:



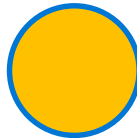
Sytá (nasyčená pára) je v termodynamické rovnováze s kapalinou o stejné teplotě a tlaku. Jedná se o dynamickou rovnováhu, při které je vypařená látka přesně nahrazena zkondenzovanou

Vypařování - nastává za každé teploty –povrchový jev, ochlazuje kapalinu, unikají molekuly s velkou energií

Var - obdoba vypařování, ale na vnitřní stěně bublinek v kapalině, v objemu. Pokud tlak uvnitř bublinky překročí okolní tlak, nastane bouřlivý var.

$$l_V = \frac{dQ_V}{dm} \quad \text{Skupenské teplo tání a tuhnutí}$$

Nasyčená pára uvnitř bublinky



$$l_V > l_t$$

Základní pojmy termodynamiky

Sublimace a desublimace:

Obdoby vypařování, ale z pevného skupenství

Suchý led -CO₂, jód

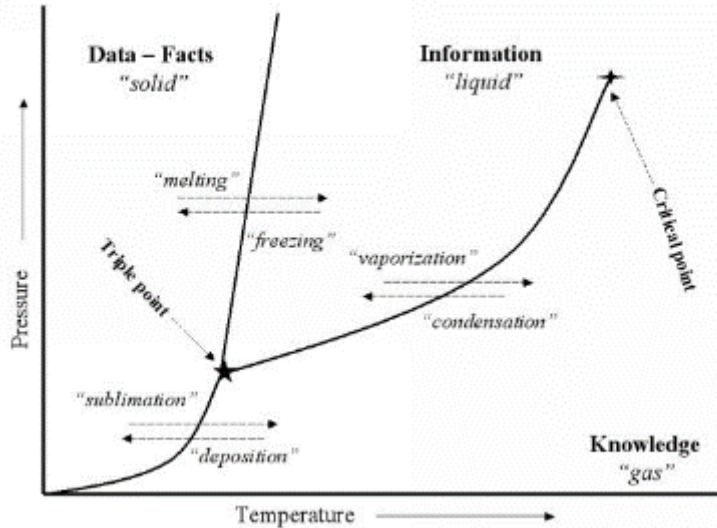


Základní pojmy termodynamiky

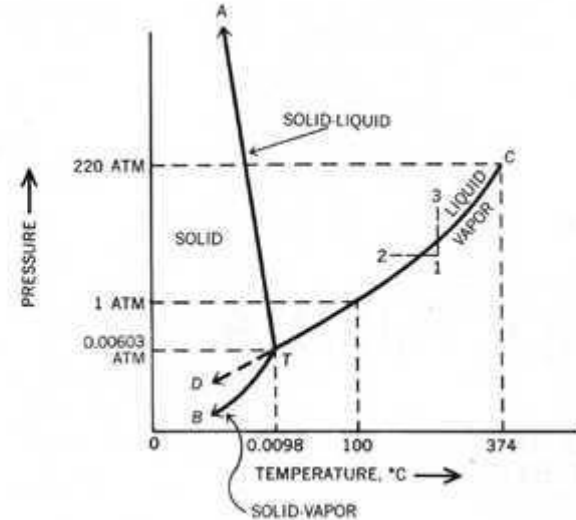
Rovnovážný diagram:

Křivka určuje, za jakých podmínek, teploty a tlaku, nastávají skupenské přechody

Většina látek



Voda

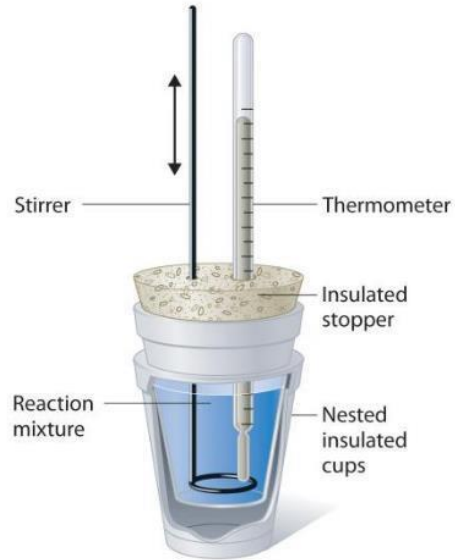


Trojný bod – vedle sebe koexistují pevné, kapalná a plynná skupenství.
Pro vodu 273,16K je teplota trojného bodu vody (teplota 0,01°C, tlak 613 Pa)

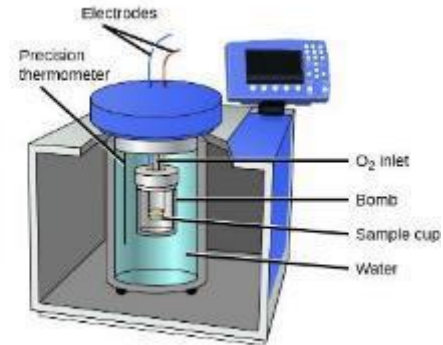
Základní pojmy termodynamiky

Kalorimetrie:

$$Q_{\text{odebrané}} = Q_{\text{přijaté}}$$



(a)



(b)

Příklad kalorimetrie