



**PEDAGOGICKÁ  
FAKULTA**  
Masarykova univerzita

# **Mechanika a molekulová fyzika**

## **Termika**

**Doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.**

Pedagogická fakulta  
Masarykova Univerzita  
Poříčí 7, 603 00 Brno



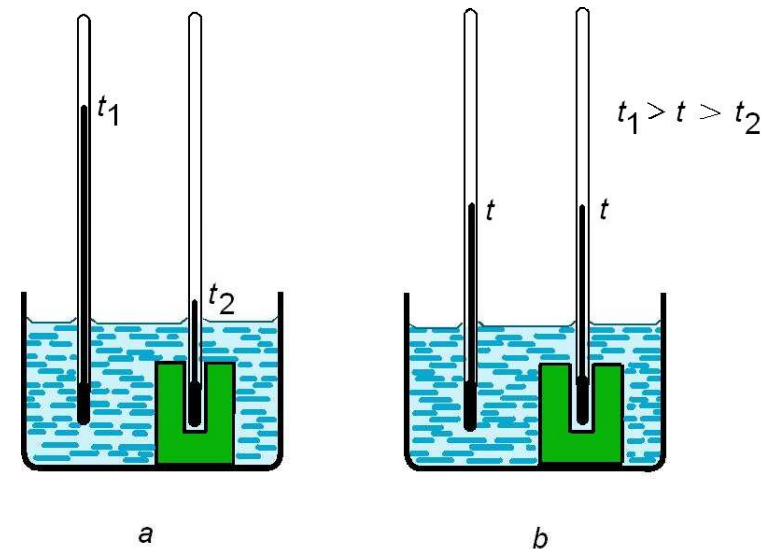
Pro potřeby přednášky zpracováno s využitím [www.studopory.vsb.cz](http://www.studopory.vsb.cz) materialy html\_files

## Teplo, tepelné kapacity látek, kalorimetrická rovnice

Pozorujeme vzrůst teploty chladnějšího tělesa a pokles teploty teplejšího tělesa tak dlouho, až nastane rovnovážný stav, při kterém jsou teploty obou těles jsou stejné.

Na rozhraní obou těles dochází ke srážkám částic a při těchto srážkách částice teplejšího tělesa předávají část své energie částicím studenějšího tělesa.

Tento děj, při kterém neuspořádaně se pohybující částice teplejšího tělesa narážejí na částice studenějšího tělesa a předávají jim část své energie, nazýváme **tepelná výměna**.



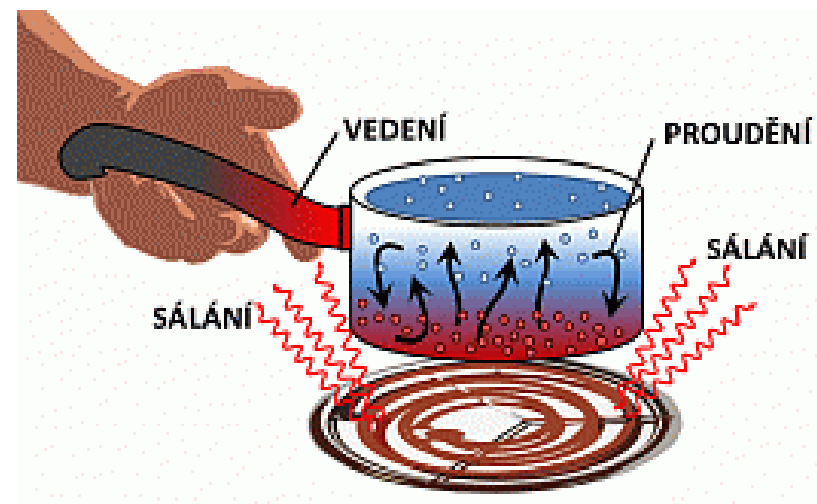
## Teplo, tepelné kapacity látek, kalorimetrická rovnice

Odevzdá-li teplejší těleso studenějšímu tělesu tepelnou výměnou energii, říkáme, že teplejší těleso odevzdalo studenějšímu tělesu **teplo**. Přijme-li studenější těleso od teplejšího tělesa tepelnou výměnou energii, říkáme, že studenější těleso přijalo od teplejšího tělesa **teplo**.

**Teplo  $Q$  je určeno energií, kterou při tepelné výměně odevzdá teplejší těleso studenějšímu.**

Jednotkou tepla je 1 J (joule).

„Teplo = energie na pochodu”



## Teplo, tepelné kapacity látek, kalorimetrická rovnice

■ Nenastane-li současně změna skupenství látky tělesa, je přijaté teplo  $dQ$  přímo úměrné přírůstku teploty.

- $dQ = C \cdot dT$ ,
- kde  $C$  je **tepelná kapacita** tělesa. Jednotkou tepelné kapacity je  $1 \text{ J.K}^{-1}$ .

Protože  $C$  závisí na **hmotnosti tělesa**  $m$ , zavádíme tepelnou kapacitu jednotkové hmotnosti látky, která se nazývá **měrná tepelná kapacita**  $c$

$$c = \frac{dQ}{m dT}$$

Měrná tepelná kapacita je charakteristická pro danou látku. Z běžně známých látek má největší měrnou tepelnou kapacitu voda  $c = 4200 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  (přibližně), proto je voda výhodná jako chladicí kapalina nebo jako kapalina používaná k přenosu energie. Relativně malé měrné tepelné kapacity mají kovy ( např.

# Teplo, tepelné kapacity látek, kalorimetrická rovnice

U všech látek se s klesající teplotou měrná tepelná kapacita látky zmenšuje a při teplotách blízkých 0 K má velmi malou hodnotu (např. měrná tepelná kapacita olova při teplotě 20 °C je 129 J.kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> při teplotě -259 °C je 32 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>).

Pro daný stupeň přesnosti výpočtů lze považovat měrnou tepelnou kapacitu homogenní látky v jistém pokusem ověřeném teplotním intervalu za konstantní.

*Pak*

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

Při tepelných výpočtech zejména pro plyny používáme tepelnou kapacitu vztaženou na 1 mol látky, kterou nazýváme **molární tepelná kapacita**  $C_m = c \cdot M$ , kde  $M$  je molární hmotnost látky. Jednotkou molární tepelné kapacity je 1 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.

Látka	$c$ [J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
<u>voda</u>	4 180
<u>vzduch</u> (0°C)	1 000
<u>ethanol</u>	2 430
<u>led</u>	2 090
<u>olej</u>	2 000
absolutně suché <u>dřevo</u> (0°C)	1 450
<u>železo</u>	450
<u>měď</u>	383
<u>zinek</u>	385
<u>hliník</u>	896
<u>platina</u>	133
<u>olovo</u>	129
<u>kyslík</u>	917
<u>cín</u>	227
<u>křemík</u>	703
<u>zlato</u>	129
<u>stříbro</u>	235

## Teplo, tepelné kapacity látek, kalorimetrická rovnice


Tepelná výměna obecně závisí na podmínkách, za kterých probíhá. **Teplo**, které přijme nebo odevzdá plyn, **závisí** na tom, proběhne-li tepelná výměna při *konstantním tlaku* plynu nebo při *konstantním objemu* plynu.

Tomu odpovídají dvě měrné (resp. molární) tepelné kapacity plynů, a to **měrná** (resp. molární) **tepelná kapacita při stálém tlaku**  $c_p$  (resp.  $C_{mp}$ ) a **měrná** (resp. molární) **tepelná kapacita při stálém objemu**  $c_v$  (resp.  $C_{mV}$ ).

U kapalin a pevných látek jsou tyto rozdíly pro běžné výpočty nevýznamné (ale jsou!).



## Kalorimetrická rovnice

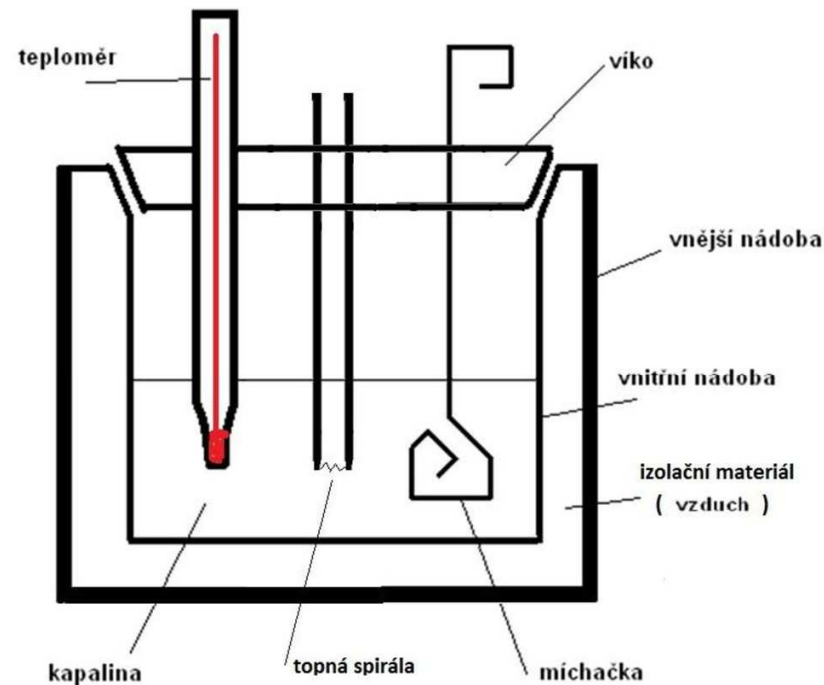
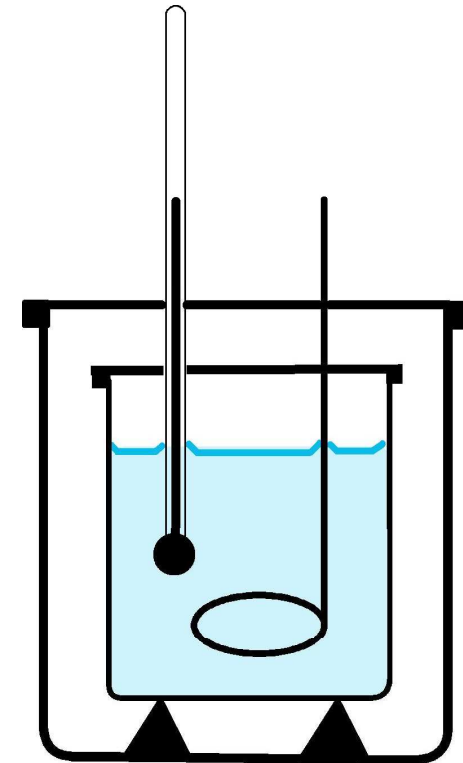
- Vložíme do tepelně izolované nádoby s kapalinou teploty  $t_1$  těleso teploty  $t_2 > t_1$ ,  
tepelná výměna  rovnovážný stav
- teploty vyrovnají na společnou teplotu  $t$ ,
- soustava je izolovaná, bude teplo  $Q_2 = m_2 c_2 (t_2 - t)$ , které odevzdá těleso,
- rovno teplo  $Q_1 = m_1 c_1 (t - t_1)$ , které přijme kapalina v nádobě.
- Proto platí tzv. *kalorimetrická rovnice*  
$$m_1 c_1 (t - t_1) = m_2 c_2 (t_2 - t)$$
- Pozn. Látky spolu nebudou chemicky reagovat a nedojde ke změně jejich skupenství.

# Kalorimetrická rovnice

## Kalorimetr

Tepelná kapacita nádoby kalorimetru, míchačky a teploměru je tepelná *kapacita kalorimetru*  $C_k$ .

$$m_1 c_1 (t - t_1) + C_k (t - t_1) = m_2 c_2 (t_2 - t)$$





## Změny skupenství látky

**Fáze** - soustava v rovnovážném stavu ve všech částech stejné fyzikální a chemické vlastnosti:

- pevná rtuť, kapalná rtuť, rtuťové páry
- diamant, grafit – jsou dvě fáze pevného uhlíku = různé krystalové modifikace téže pevné látky.

Fáze látky je obecnějším pojmem než skupenství látky.

Zkoumaná termodynamická soustava může obsahovat i **větší počet fází**.

Počet stavových veličin, které můžeme libovolně měnit, aniž by se porušil rovnovážný stav soustavy, se nazývá **počet stupňů volnosti** soustavy.

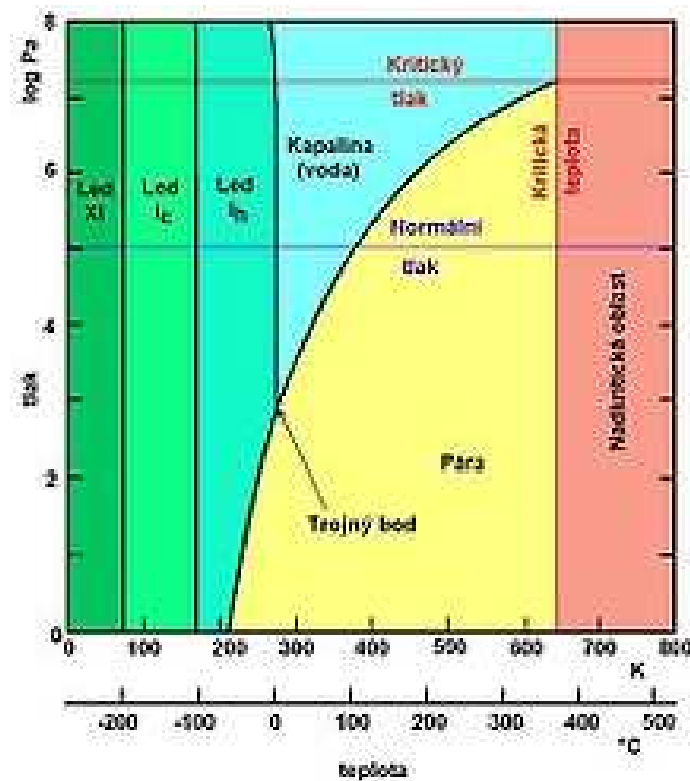
## Změny skupenství látky

**Složka** je každá chemicky čistá látka v soustavě. Má 2 stupně volnosti ( $p$ ,  $T$ ).

*Počet stupňů volnosti* závisí na *počtu složek* tvořících soustavu a na *počtu fází* existujících v soustavě vedle sebe.

### Gibbsův zákon fází

V rovnovážném stavu soustavy platí rovnice  $f + v = s + 2$ , kde  $f$  je počet fází v soustavě a  $s$  je počet složek v soustavě.



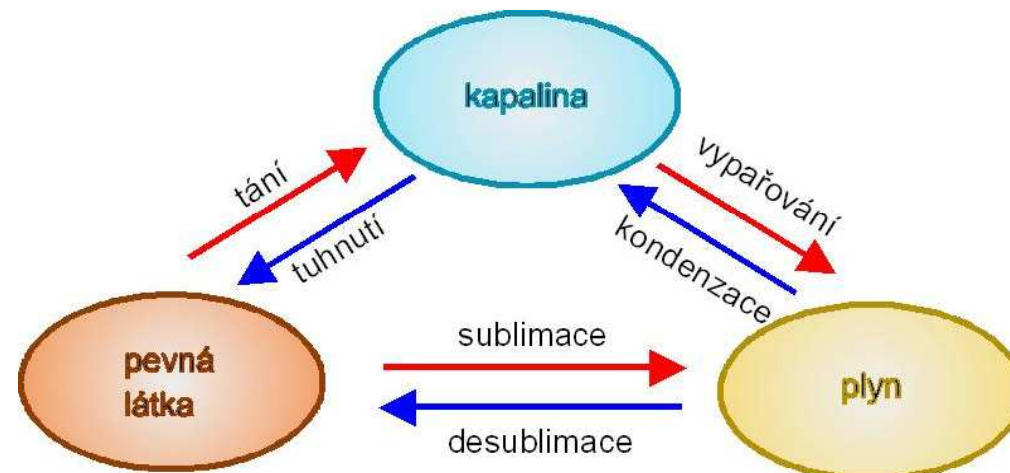
## Změny skupenství látky

Přechod látky z jedné fáze do druhé nazýváme *fázová změna*.  
(led – voda, grafit – diamant)

Přechod látky z jednoho skupenství do druhého skupenství nazýváme *změna skupenství*.

*Fázové změny prvního druhu* - dochází k pohlcování nebo uvolňování tepla, přitom se objem mění skokem.

- **tání, tuhnutí**
- **vypařování, kondenzace**
- **sublimace a desublimace**





## Změny skupenství látky

Těleso o hmotnosti  $m$  při změně skupenství přijme nebo odevzdá **skupenské teplo  $L$**  (tání, vypařování, sublimační).

Skupenské teplo vztažené na 1 kg látky je **měrné skupenské teplo ( $1 \text{ J.kg}^{-1}$ )**.

### a) tání a tuhnutí

Dodané teplo potřebné pro změnu pevného tělesa o **hmotnosti  $m$**  zahřátého na teplotu tání na kapalinu téže teploty je **skupenské teplo tání  $L_t$** .

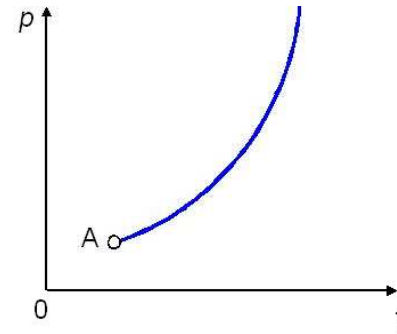
**Měrné skupenské teplo tání  $l_t$**  je tepelnou konstantou látek.

Např. pro led je  $l_t = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .

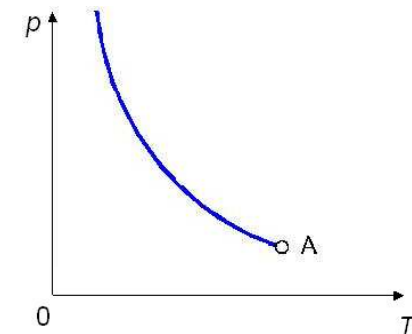
Při teplotě tuhnutí, která je rovna teplotě tání, kapalina se mění v pevné těleso – tuhne. Při tom odevzdá svému okolí **skupenské teplo tuhnutí** rovné  $L_t$ .

Pevné amorfní látky při zahřívání postupně měknou, až se přemění v kapalinu. Nemají proto určitou teplotu tání.

## Změny skupenství látky

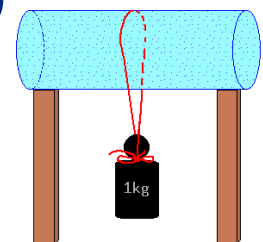


a



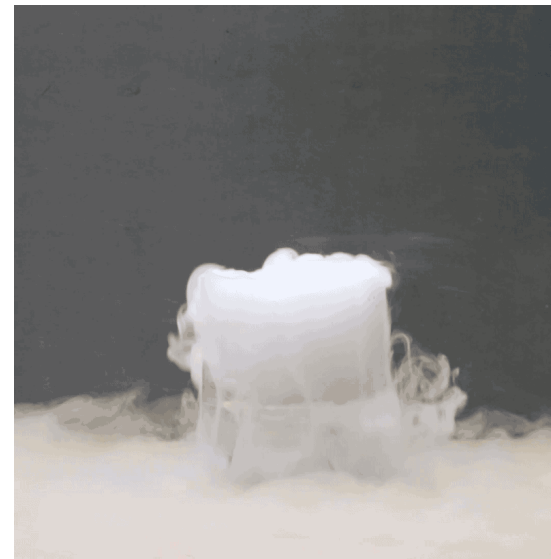
b

- Teploty tání krystalické látky u většiny látek (např. Pb) rostou při zvýšení tlaku. **Při tání zvětšují svůj objem.**
- Některé látky (např. led, Sb, Bi a některé slitiny) mají naopak s rostoucím vnějším tlakem teplotu tání nižší, než měly před zvýšením tlaku. **Při tání zmenšují svůj objem a při tuhnutí zvětšují svůj objem. (Regelace ledu)**
- Každý bod *křivky tání* znázorňuje rovnovážný stav pevné a kapalné fáze určité látky (křivka tání patří mezi rovnovážné křivky).
- Křivka tání začíná v bodě A, kterému odpovídá nejmenší možný tlak, při kterém jsou kapalina a pevná látka ještě v rovnováze.
- Protože teploty tání různých látek závisí na tlaku, udávají se v tabulkách za normálního tlaku a nazývají se *normální teploty tání*.



## Změny skupenství látky

### b) Sublimace a desublimace



*Sublimace* = přeměna látky z pevného skupenství přímo ve skupenství plynné. Opačný děj je *desublimace*.

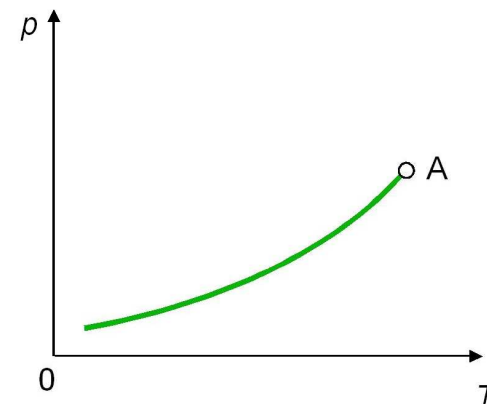
Za normálního tlaku sublimuje např. jod, naftalen, pevný oxid uhličitý = suchý led, led nebo sníh.

*Skupenské teplo sublimace*  $L_s$  je teplo přijaté látkou o hmotnosti  $m$  při její sublimaci za dané teploty. Měrné skupenské teplo sublimace závisí na teplotě.

*Měrné skupenské teplo sublimace*  $l_s = L_s / m$

Např. pro led  $H_2O$  je při teplotě  $0\text{ °C}$   $l_s = 2,83\text{ MJ.kg}^{-1}$ .

## Změny skupenství látky



Sublimující látka dostatečné hmotnosti v uzavřené nádobě sublimuje tak dlouho, až se vytvoří *rovnovážný stav mezi pevnou fází a párou*. Takováto pára se nazývá **sytá pára**.

Nemění-li se teplota, zůstává konstantní poměr hmotností plynné a pevné fáze a nemění se tlak syté páry vzniklé sublimací.

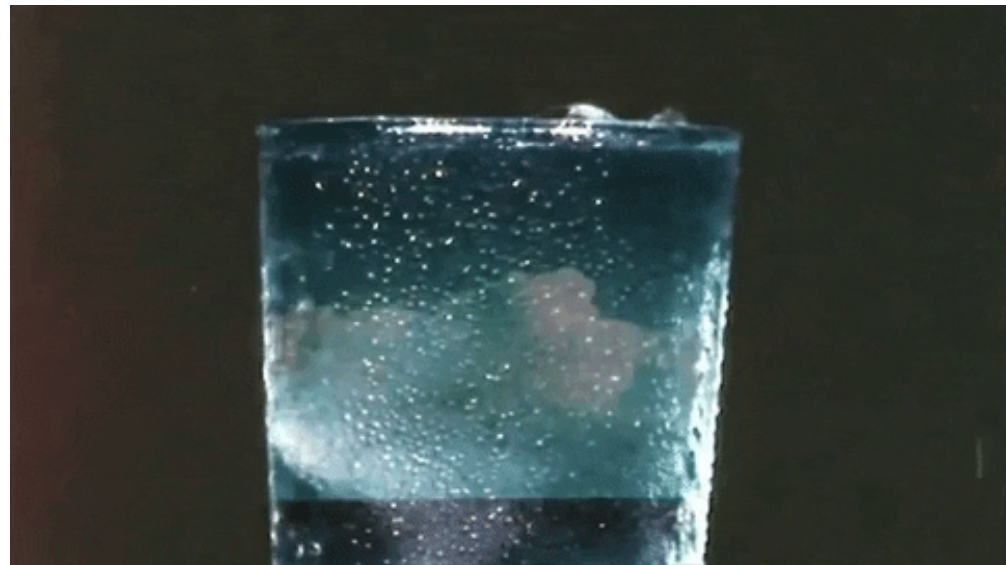
Grafické znázornění závislosti tlaku syté páry na teplotě je *sublimační křivka*.

Každý bod sublimační křivky znázorňuje *rovnovážný stav mezi pevnou látkou a její sytou párou*.

Sublimační křivka končí v bodě A, ve kterém začíná křivka tání pro tutéž látku.

## Změny skupenství látky

### c) Vypařování a var, kondenzace



**Vypařování** je děj přeměny kapaliny v páru. Na rozdíl od tání probíhá vypařování z **volného povrchu kapaliny** za každé teploty.

Na přeměnu kapaliny o hmotnosti  $m$  v páru téže teploty je třeba dodat *skupenské teplo vypařování*  $L_v$ .

*Měrné skupenské teplo vypařování*  $l_v = L_v / m$

Měrné skupenské teplo vypařování klesá s rostoucí teplotou.

Např. pro vodu teploty  $0\text{ °C}$  je  $2,51\text{ MJ.kg}^{-1}$ , pro vodu teploty  $100\text{ °C}$  je  $2,26\text{ MJ.kg}^{-1}$  (za normálního tlaku).



## Změny skupenství látky

Zvláštním případem vypařování kapaliny je **var**.

Na rozdíl od vypařování se kapalina při varu **vypařuje nejen na volném povrchu, ale také uvnitř - vznik bublinek**).

(Při dosažení určité teploty při daném okolním tlaku se uvnitř kapaliny vytvářejí bubliny páry, které zvětšují svůj objem a vystupují k volnému povrchu kapaliny).

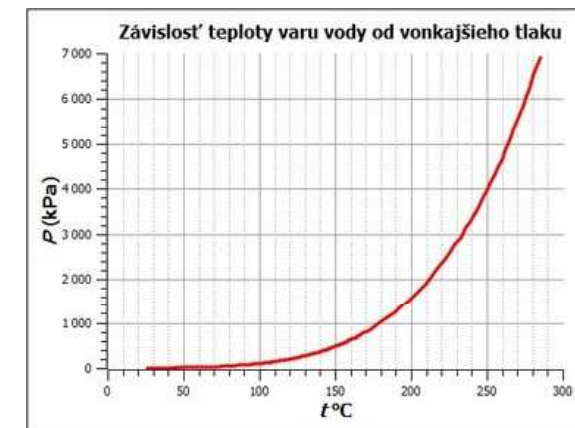


Teplota  $t_v$ , při které za daného vnějšího tlaku nastává var kapaliny, se nazývá **teplota varu**.

S rostoucím tlakem se teplota varu zvětšuje.

V tabulkách se uvádí teplota varu za normálního tlaku – normální teplota varu.

**Měrné skupenské teplo varu** se rovná měrnému skupenskému teplu vypařování při teplotě varu kapaliny.



## Změny skupenství látky



Obrácený děj k vypařování je **kondenzace**.

- Při tomto ději látka odevzdá svému okolí skupenské teplo kondenzační.
- Měrné skupenské teplo kondenzační je rovno měrnému skupenskému teplu vypařování téže látky při téže teplotě.
- Kondenzace může nastat na povrchu kapaliny, pevné látky nebo i ve volném prostoru (orosené zrcadlo, mžení...)
- Při tomto ději dochází k spojování několika molekul páry v drobné kapičky, které pak postupně rostou. Vytváření těchto kapiček usnadňují drobná zrnka prachu nebo elektricky nabitě částice = **kondenzační jádra**.

## Změny skupenství látky

Kapalina v uzavřené nádobě se **vypařuje tak dlouho až nastane rovnovážný stav mezi kapalinou a její párou.**

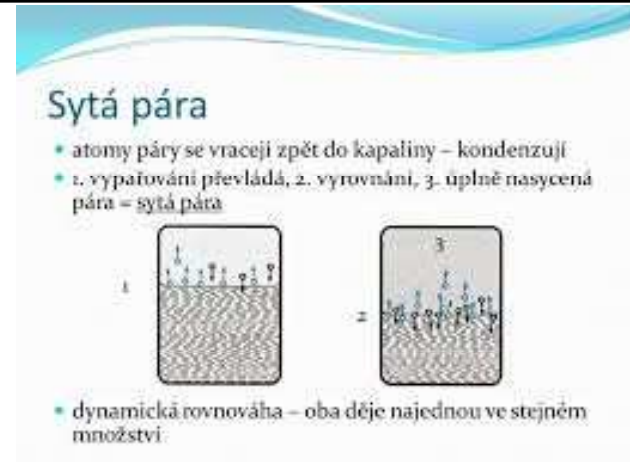
V tomto rovnovážném stavu se objemy kapaliny a páry nemění, konstantní zůstává také tlak páry a teplota soustavy kapalina + pára.

Pára, která je v rovnovážném stavu se svou kapalinou, se nazývá **sytá pára**.

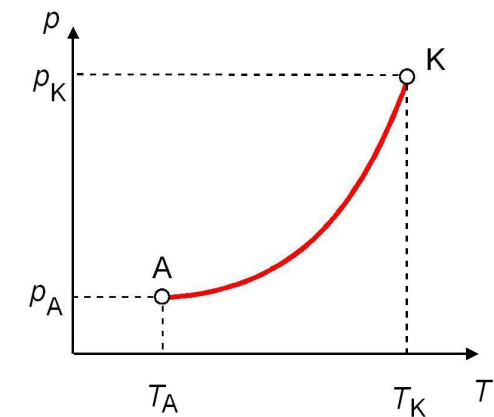
V uzavřené nádobě za přítomnosti kapaliny je vždy sytá pára.

Tlak syté páry nezávisí při stálé teplotě na objemu páry.

Protože tlak syté páry za dané teploty nezávisí na objemu( při zvětšení objemu prostoru nad kapalinou se vypaří další část kapaliny), neplatí pro sytou páru zákon Boyleův-Mariottův a stavová rovnice a sytá pára se tím podstatně liší od ideálního plynu.



## Změny skupenství látky



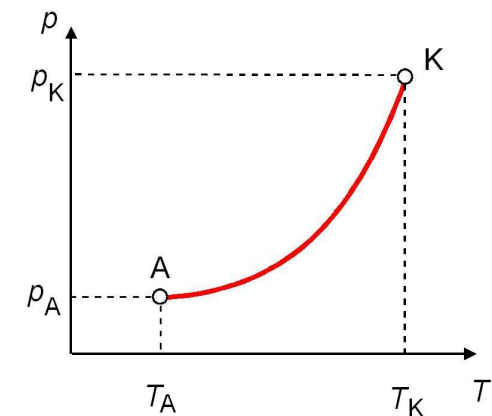
Zvýšíme-li teplotu soustavy kapalina a její sytá pára, tlak syté páry nad kapalinou vzroste - *křivka syté páry*.

Každý bod křivky syté páry odpovídá rovnovážnému stavu soustavy kapalina a její sytá pára.

- Křivka začíná v bodě A, který reprezentuje nejmenší hodnotu tlaku a teploty, při kterých existuje kapalina a její sytá pára v rovnovážném stavu.
- Bodem A začíná také křivka tání a končí jím sublimační křivka.

Např. pro  $H_2O$  je v bodě A termodynamická teplota 273,16 K a tlak asi  $6,1 \cdot 10^2$  Pa = trojný bod vody.

## Změny skupenství látky



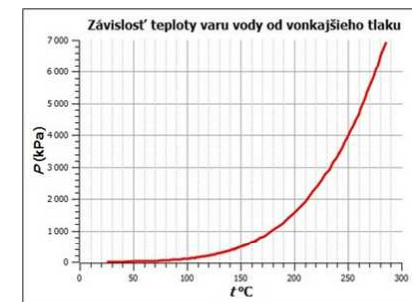
S růstem teploty rovnovážné soustavy kapalina + sytá pára roste hustota syté páry a hustota kapaliny naopak klesá.

- Při určité, tzv. **kritické teplotě**  $T_k$  je hustota kapaliny rovna hustotě páry. Mezi kapalinou a její sytou párou mizí rozhraní a látka se stává stejnorodou.
- Při vyšší teplotě než  $T_k$  už neexistuje látka v kapalně fázi. Proto křivka syté páry končí v bodě K. Tento bod křivky syté páry se nazývá **kritický bod** a znázorňuje kritický stav látky.
- **Kritický stav** je určen **kritickou teplotou**  $T_k$ , **kritickým tlakem**  $p_k$  a **kritickou hustotou**  $\rho_k$ .

Tabulky. např. pro  $H_2O$   $T_k = 647,3$  K ( $374,15$  °C),  $p_k = 22,13$  MPa a  $\rho_k = 315$  kg.m<sup>-3</sup>.

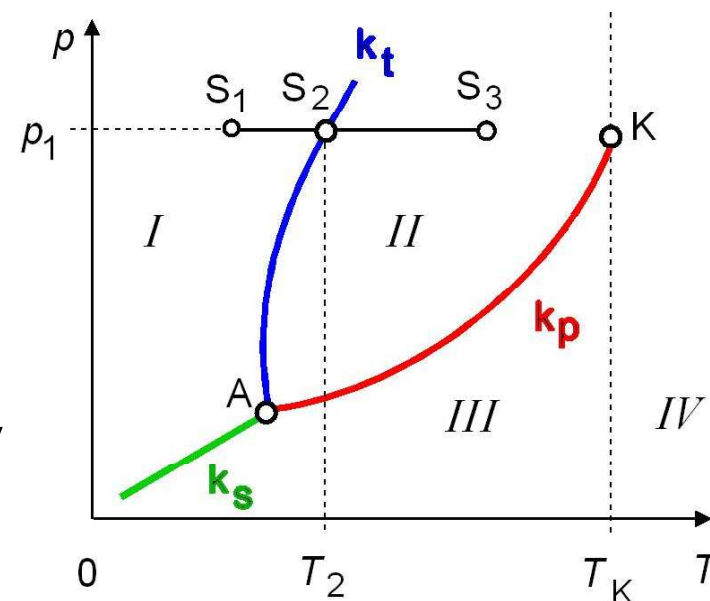
Z křivky syté páry je možno stanovit teplotu varu při daném vnějším tlaku.

Aby bubliny syté páry, které se vytvoří v objemu kapaliny, vystoupily na volný povrch kapaliny, musí být tlak syté páry roven vnějšmu tlaku.



## Změny skupenství látky

**Fázový diagram** dané látky znázorňuje rovnovážný stav pevné, kapalně a plynné fáze těžé látky.



Všechny tři křivky (*křivku tání  $k_t$ , sublimační křivku  $k_s$  a křivku syté páry  $k_p$* ) se stýkají v jediném bodě A, který se nazývá **trojný bod**. Znázorňuje rovnovážný stav pevné, kapalně a plynné fáze těžé látky.

Jednotlivé křivky  $k_t$ ,  $k_s$  a  $k_p$  rozdělují rovinu fázového diagramu na tři oblasti podle skupenství:

- I- látka v pevném skupenství
- II- různé stavy kapaliny.
- III- plynné skupenství látky, které má nižší tlak než sytá pára těžé teploty.

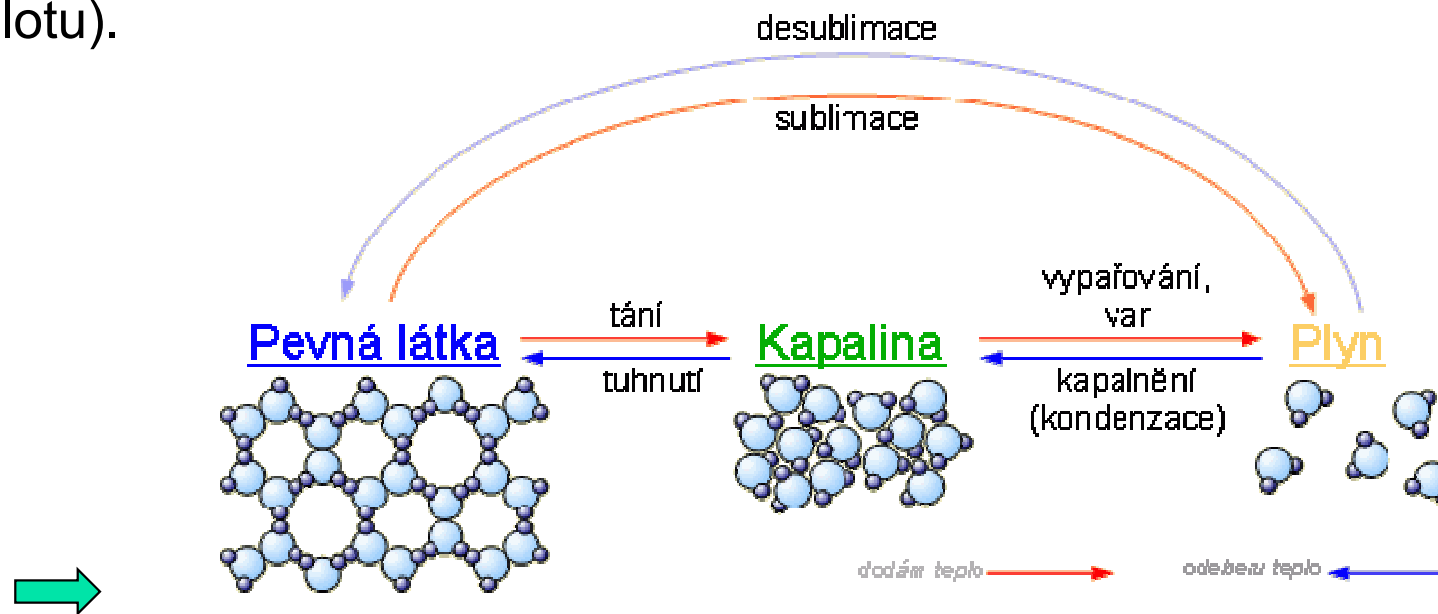
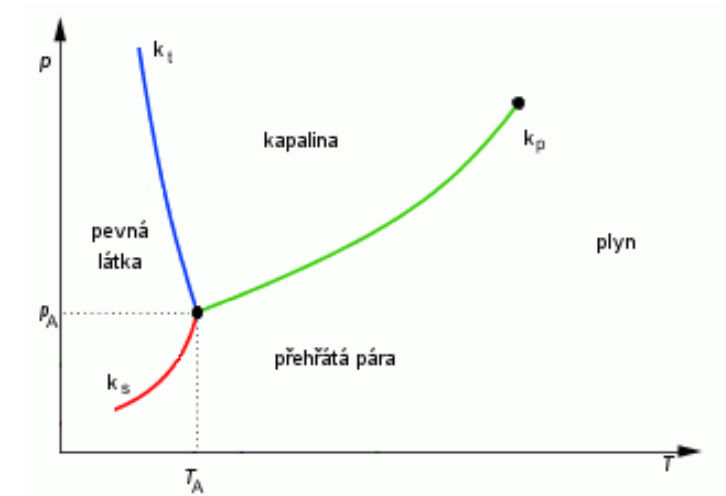
➡ **přehřátá pára**. Přehřátá pára je pára, která má nižší tlak a hustotu než sytá pára těžé teploty (např. zahřívání bez přítomnosti kapaliny).

## Změny skupenství látky

Oblast IV znázorňuje stavy plynného skupenství látky pro teploty vyšší než je kritická teplota.

Toto plynné skupenství stručně nazýváme **plyn**.

Má-li být plyn zkapalněn, je třeba ho ochladit před kompresí pod kritickou teplotu).



# Vnitřní energie termodynamické soustavy, práce a teplo

Každé látkové těleso má energii, která souvisí s jeho vnitřní částicovou strukturou. Tuto energii nazýváme ***vnitřní energií tělesa*** (soustavy).

- Částice látky (molekuly, atomy, ionty) konají neustálý a neuspořádaný pohyb (posuvný, otáčivý, kmitavý).
- Celková kinetická energie všech neuspořádaně se pohybujících částic látky je jednou složkou vnitřní energie tělesa (soustavy).
- Částice látky na sebe navzájem působí silami, a mají proto potenciální energii.
- Celková potenciální energie všech částic závisící na jejich vzájemné poloze je další složkou vnitřní energie tělesa (soustavy).

Dalšími složkami jsou zejména potenciální a kinetická energie kmitajících atomů, ze kterých se skládají molekuly, a vnitřní energie atomů (energie elektronů v elektronovém obalu, energie jádra atomu atd.)



# Vnitřní energie termodynamické soustavy, práce a teplo

***Vnitřní energii  $U$  tělesa (soustavy) budeme tedy definovat jako součet celkové kinetické energie neuspořádaně se pohybujících částic tělesa a celkové potenciální energie vzájemné polohy těchto částic.***

Děje, při nichž se mění vnitřní energie tělesa, lze rozdělit do tří skupin:

a) děje, při kterých se mění vnitřní energie konáním práce

Například při tření dvou těles, při stlačení plynu v tepelně izolované nádobě, při zahřívání kapaliny prudkým mícháním, při ohýbání drátu, při nepružném nárazu tělesa na podložku.

b) děje, při nichž nastává změna vnitřní energie tepelnou výměnou

Zahřívání, ochlazování.

c) děje, při kterých se vnitřní energie mění oběma způsoby.

**Jestliže děj bude probíhat v izolované soustavě, zůstává součet kinetické, potenciální a vnitřní energie těles konstantní.**

# Vnitřní energie termodynamické soustavy, práce a teplo

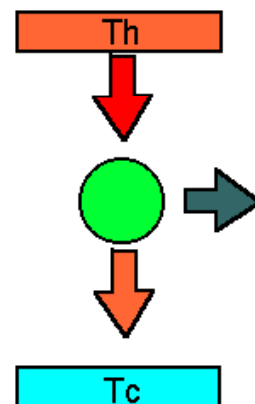
Vztah mezi veličinami  $A'$ ,  $\Delta U$  a  $Q$  vyjadřuje **první termodynamický zákon (1.VT)**:

**Přírůstek vnitřní energie soustavy  $\Delta U$  se rovná součtu práce  $A'$  vykonané okolními tělesy působícími na soustavu silami a tepla  $Q$  odevzdaného okolními tělesy soustavě.**

$$\Delta U = A' + Q$$

$$dU = \delta A' + \delta Q$$

Vnitřní energie  $U$  je tak zvanou stavovou funkcí. To znamená, že její změna  $dU$  závisí po proběhnutí určité změny stavu soustavy (děje) jen na hodnotách stavových veličin v počátečním a konečném stavu soustavy (na začátku a na konci děje) a nezávisí na druhu stavové změny (děje), tj. je úplný (totální) diferenciál. Teplo a práce nejsou stavové funkce a jejich diferenciály nejsou v obecném případě úplné.



# Vnitřní energie termodynamické soustavy, práce a teplo

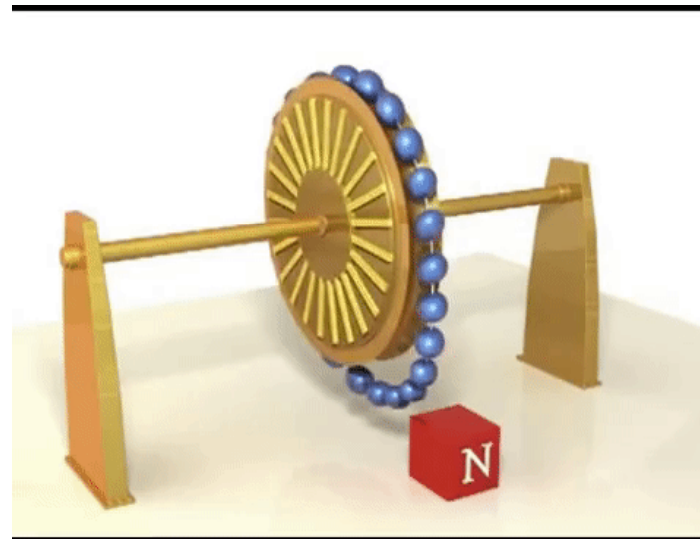
Vztah mezi veličinami  $A'$ ,  $\Delta U$  a  $Q$  vyjadřuje **první termodynamický zákon (1.VT)**:

**Není možné sestavit stroj, který by trvale anebo po jistou dobu vykonával práci, aniž by se změnila jeho energie nebo energie jeho okolí.**

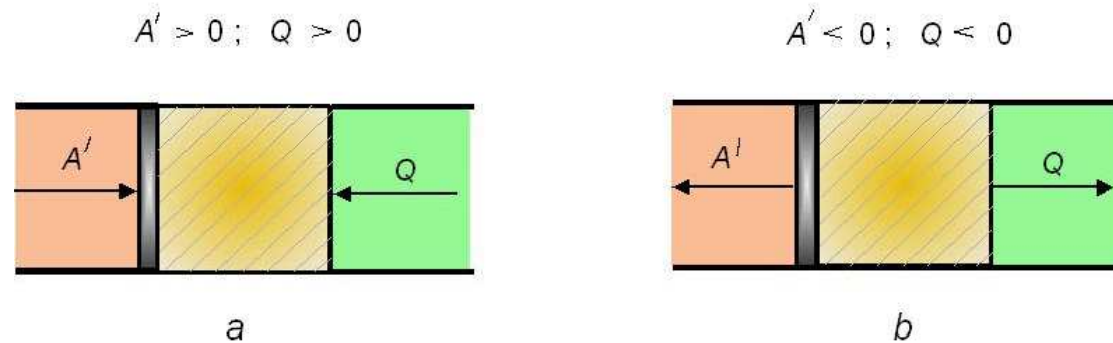
~~Perpetuum mobile 1. druhu~~

$$\delta A = \delta Q - dU$$

Pokud nebude dodáno žádné teplo  $Q$ , po jisté době se vnitřní energie  $U$  vyčerpá.



# Vnitřní energie termodynamické soustavy, práce a teplo



- Jestliže konáním práce nebo tepelnou výměnou soustava přijímá energii, považujeme práci vykonanou okolními tělesy za kladnou veličinu  $A' > 0$  (práce konaná soustavou je  $A < 0$ , tj. soustava práci spotřebovává) a teplo přijaté soustavou rovněž za kladné  $Q > 0$ .
- Jestliže soustava konáním práce nebo tepelnou výměnou odevzdává energii okolním tělesům, je  $A' < 0$ ,  $A > 0$ ,  $Q < 0$ .
- Změna vnitřní energie soustavy je kladná  $\Delta U > 0$ , jestliže se vnitřní energie soustavy zvětšila. V opačném případě je změna vnitřní energie záporná  $\Delta U < 0$ .

## Zdroje:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/be/Maqterm1rP.gif>

[https://e-konstrukter.cz/files/articles/thumbs/x50pyn53dr6i61cciy47tv0d73ro\\_270x-1448809723.gif](https://e-konstrukter.cz/files/articles/thumbs/x50pyn53dr6i61cciy47tv0d73ro_270x-1448809723.gif)

[https://www.helago-cz.cz/files/thumbs/mod\\_eshop/produkty/full/22597.217084881.jpg](https://www.helago-cz.cz/files/thumbs/mod_eshop/produkty/full/22597.217084881.jpg)

[https://docplayer.cz/docs-images/40/6889407/images/page\\_3.jpg](https://docplayer.cz/docs-images/40/6889407/images/page_3.jpg)

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/90/Voda\\_fazovy\\_diagram.jpg/220px-Voda\\_fazovy\\_diagram.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/90/Voda_fazovy_diagram.jpg/220px-Voda_fazovy_diagram.jpg)

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/16/Melting\\_icecubes.gif/200px-Melting\\_icecubes.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/16/Melting_icecubes.gif/200px-Melting_icecubes.gif)

[https://img.buzzfeed.com/buzzfeed-static/static/2017-01/20/12/asset/buzzfeed-prod-fastlane-02/anigif\\_sub-buzz-12984-1484933871-5.gif](https://img.buzzfeed.com/buzzfeed-static/static/2017-01/20/12/asset/buzzfeed-prod-fastlane-02/anigif_sub-buzz-12984-1484933871-5.gif)

<https://media4.giphy.com/media/RNkOyi9iD30Qc87kV9/giphy.gif>

<http://vyuka.jihlavsko.cz/teplo/obr/skupenske-premeny-nazvy.gif>

[https://thumbs.gfycat.com/AgitatedGargantuanFlamingo-size\\_restricted.gif](https://thumbs.gfycat.com/AgitatedGargantuanFlamingo-size_restricted.gif)