



**PEDAGOGICKÁ  
FAKULTA**  
Masarykova univerzita

# **Mechanika a molekulová fyzika**

## **Přenos tepla, Entropie**

**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

## Přenos tepla

**Přenos vnitřní energie** (=přenos tepla) je fyzikální děj, při kterém se část vnitřní energie

tělesa (soustavy, části soustavy) přenáší na jiné těleso (soustavu, část soustavy).

- a) tepelnou výměnou vedením
- b) tepelnou výměnou zářením
- c) prouděním.

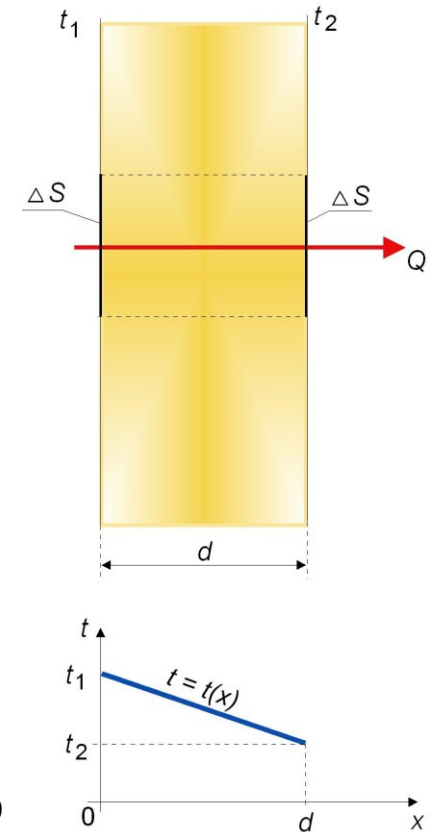
# Přenos tepla

## a) Tepelná výměna vedením

Tepelná výměna vedením (vedení tepla) je děj, při kterém se přenos vnitřní energie v tělese nebo mezi více tělesy, které jsou ve vzájemném styku z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou uskutečňuje vzájemnými srážkami částic látky.

Částice, které mají větší kinetickou energii, předávají část této energie částicím s menší kinetickou energií. Těleso (resp. soustava těles), ve kterém probíhá tepelná výměna, zůstává přitom v klidu.

- Jsou-li teploty míst s vyšší a nižší teplotou udržovány neustále na stejných hodnotách  $\longrightarrow$  **ustálené (stacionární) vedení tepla**.
- V opačném případě  $\longrightarrow$  **neustálené (nestacionární) vedení tepla**.



# Přenos tepla

## a) Tepelná výměna vedením

Vlastnost látky umožňující tepelnou výměnu vedením nazýváme **tepelná vodivost** a veličinu, která charakterizuje tepelnou vodivost látky nazýváme **součinitel tepelné vodivosti**  $\lambda$ .  $\lambda_{\text{Cu}} = 400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{Al}} = 240 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

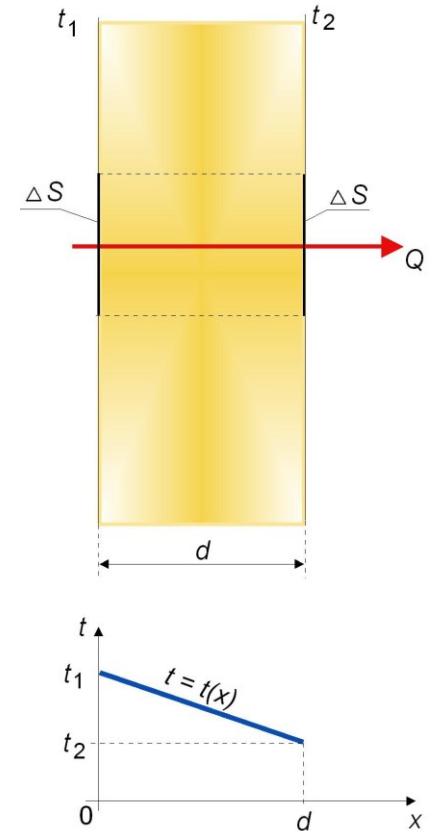
**Tepelný tok  $\Phi$**  :  $\Phi = \frac{Q}{\Delta\tau}$        $\varphi = \frac{\Phi}{\Delta S} = \frac{Q}{\Delta S \cdot \Delta\tau}$   
**Hustota tepelného toku  $\varphi$**  :

Při ustáleném vedení tepla projde **plochou  $\Delta S$**  desky **tloušťky  $d$**  za **dobu  $\Delta t$**  **teplo  $Q$** , které je přímo úměrné teplotnímu spádu

$$Q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{d} \cdot \Delta S \cdot \Delta\tau$$

← **Fourierův zákon** →

$$\varphi = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$



# Přenos tepla

## a) Tepelná výměna vedením

- Experiment  $\longrightarrow$  podíl součinitele *tepelné vodivosti*  $\lambda$  a *měrné elektrické vodivosti*  $\gamma$  kovů je pro *teplotu*  $T$  pro všechny kovy při nepříliš nízkých teplotách **přibližně stejný a úměrný této teplotě**

- Wiedemannův- Franzův zákon

$$\frac{\lambda}{\gamma} = konst. \cdot T$$

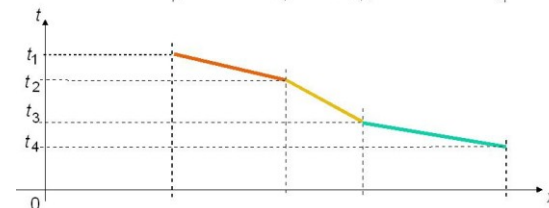
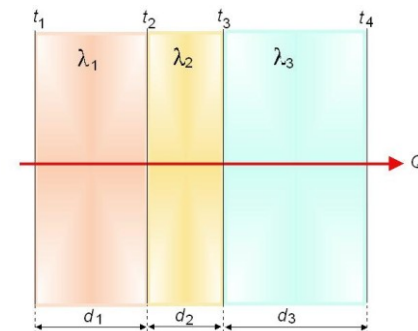
- Elektricky nevodivé látky (izolanty) vedou teplo špatně.

$$\lambda_{\text{PVC}} = 0,12 - 0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \quad \lambda_{\text{porcelán}} = 0,86-1,86 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1},$$

$$\lambda_{\text{voda}} = 0,2 - 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \quad \lambda_{\text{vzduch}} = 0,023 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

*Tepelný odpor*  $R$  tělesa *tloušťky*  $d$

$$R = \frac{d}{\lambda}$$



# Přenos tepla

## b) Tepelná výměna zářením

Tepelná výměna zářením je děj, při kterém se přenos vnitřní energie z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou uskutečňuje prostřednictvím elektromagnetického záření. (bez vzájemného kontaktu)

- emise záření  absorpce záření

*Tepelným zářením* nazýváme obvykle (ne zcela přesně) infračervené záření s vlnovými délkami od asi  $0,78 \mu\text{m}$  do  $360 \mu\text{m}$ .

# Přenos tepla

## b) Tepelná výměna zářením

**Zářivý tok  $\Phi_e$**  definovaný vztahem

$$\Phi_e = \frac{dQ}{d\tau}$$

je výkonem tepelného záření procházejícího danou plochou (jednotkou je 1 W).

Výkon tepelného záření vyzářený jednotkovou plochou se **nazývá intenzita vyzařování  $M_e$**  Jednotkou je 1 W.m<sup>-2</sup>.

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$$

- Dopadá-li na povrch tělesa zářivý tok  $\Phi_e$ , část zářivého toku  $\Phi_{ep}$  se od povrchu tělesa odráží, část  $\Phi_{e\tau}$  tělesem projde a část  $\Phi_{e\alpha}$  se tělesem pohltí.

- ZZE:

$$\frac{\Phi_{ep}}{\Phi_e} + \frac{\Phi_{e\tau}}{\Phi_e} + \frac{\Phi_{e\alpha}}{\Phi_e} = 1$$

# Přenos tepla

## b) Tepelná výměna zářením

- ZZE: 
$$\frac{\Phi_{e\rho}}{\Phi_e} + \frac{\Phi_{e\tau}}{\Phi_e} + \frac{\Phi_{e\alpha}}{\Phi_e} = 1$$

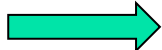
- $\rho$  *odrazivost* tepelného záření  $\rho = \frac{\Phi_{e\rho}}{\Phi_e}$


- $\tau$  *propustnost* tepelného záření

- $\alpha$  *pohltivost* tepelného záření

$$\tau = \frac{\Phi_{e\tau}}{\Phi_e}$$

$$\alpha = \frac{\Phi_{e\alpha}}{\Phi_e}$$

- Je-li  $\alpha = 1$  a  $\rho = \tau = 0$   **černé těleso.**

- Je-li  $\rho = 1$  a  $\alpha = \tau = 0$   **bílé těleso.**

- Je-li  $\tau = 1$  a  $\alpha = \rho = 0$  je těleso **dokonale propustné** (průteplivé).



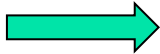
# Přenos tepla

## b) Tepelná výměna zářením

- Černé těleso ( $\alpha = 1$ ) je idealizovaným modelem
- Pro vyzařování černého tělesa platí *Stefanův-Boltzmannův zákon*:

$$M_{e0} = \sigma \cdot T^4$$

kde konstanta úměrnosti  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta.

- **Šedé těleso**  pohltivost  $\alpha < 1$  je **stejná** pro všechny vlnové délky záření (tj. **nezávisí na vlnové délce**).
- Stefanův-Boltzmannův zákon pro šedé těleso:

$$M_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

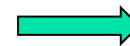
kde  $\varepsilon$  je **emisivita** tělesa. Platí pro ni  $\varepsilon = \alpha$

# Přenos tepla

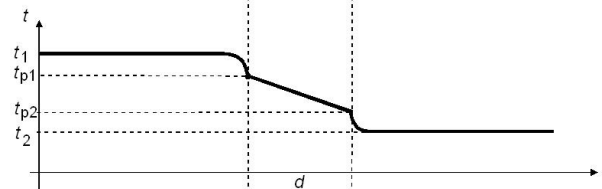
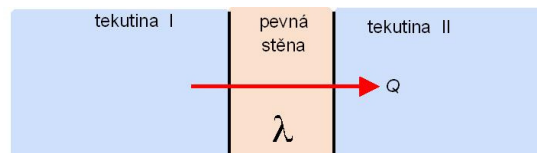
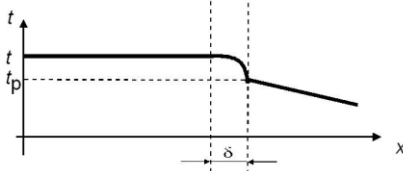
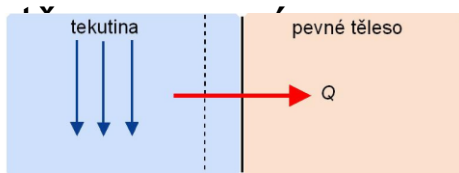
## c) Tepelná výměna prouděním

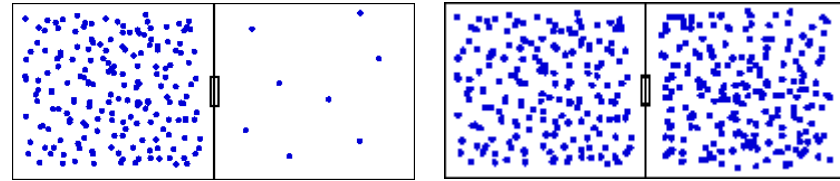
Přenos vnitřní energie prouděním je děj, při kterém se přenos vnitřní energie z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou uskutečňuje prouděním tekutiny.

- Volné proudění (rozdílná hustota)
- Nucené proudění (ventilátor, čerpadlo)



**Přestup tepla:**  $\varphi = h \cdot (t - t_p)$ , kde  $h$  je *součinitel přestupu tepla*,  $t$  je teplota tekutiny a  $t_p$  teplota povrchu





# Entropie

Entropie  $S \longrightarrow$  "míra neurčitosti systému" („míra neuspořádanosti“)

## Clausius – Boltzmann - Gibbs

Zatímco „ostrá“ rozdělení pravděpodobnosti mají entropii nízkou, naopak „neostrá“ či „rozmazaná“ rozdělení pravděpodobnosti mají entropii vysokou.

Za pravděpodobnostní rozložení s nejvyšší entropií lze považovat normální nebo rovnoměrné rozložení.

$$S = -k \sum_i P_i \ln P_i$$

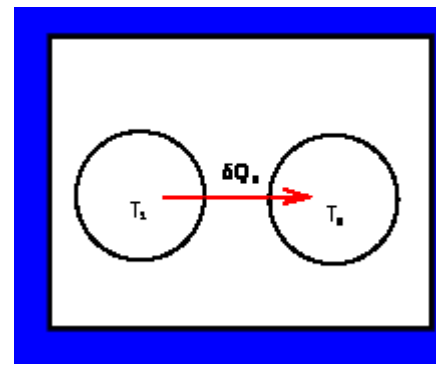
$P_i$  je pravděpodobnost  $i$ -tého mikrostavu

- Termodynamickou entropii  $S$

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

- Carnotův cyklus  $\sum \frac{\delta Q}{T} = 0$   $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \longleftarrow$  **2. VT**

Ne všechna  $\delta Q$  mohou být kladná, ale některá musí být i záporná  $\longrightarrow$  soustava, která vykonává vratný kruhový děj tedy nemůže od okolních těles teplo pouze přijímat, ale musí jim také nějaké teplo odevzdávat.



# Entropie

## Princip růstu entropie

Tepelně izolovaná soustava 2 těles o teplotě  $T_1$  a  $T_2$ . Těleso 1 odevzdá teplo  $\delta Q_1$  a těleso 2 přijme teplo  $\delta Q_2$ , přičemž platí  $\delta Q_1 = \delta Q_2$ .

### Změna entropie

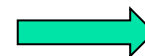
$$dS = dS_1 + dS_2 = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} = \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \delta Q_1 = \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \delta Q_1$$

Pro  $T_1 > T_2$  pak  **$dS > 0$**

**Samovolné děje:  $\Delta S_{\text{tot}} > 0$**

Při vratném adiabatickém ději může být celá entropie stále, avšak nikdy nemůže klesat.

**V přírodě – nevratné děje** (tření, odporové síly)



$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Pokud při nevratném ději působí tření, takže vykonaná práce je menší a v soustavě vzniká třením teplo, je třeba k dosažení výchozího stavu odvádět více tepla než při vratném kruhovém ději, což je vyjádřeno znaménkem nerovnosti.

Celková entropie uzavřeného systému se nemůže nikdy zmenšit. V přírodě tedy všechny děje směřují do více neuspořádaného stavu. Stejně tak roste entropie ve vesmíru. Vyrovnaní veškerých teplotních rozdílů - tepelná smrt vesmíru.

# Entropie

## 3. Termodynamický zákon - 3. VT - Nernstův teorém

*Čistou pevnou látku nelze konečným pochodem ochladit na absolutní nulu.*

Pomocí entropie:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

Není možné dosáhnout  $T = 0$  K.



<https://www.youtube.com/watch?v=DkQfu-8bzEg>

# Entropie

