

**Termika**

# Teplota

**Teplota** je charakteristika tepelného stavu hmoty. V obecném významu je to vlastnost předmětů a okolí, kterou je člověk schopen vnímat a přiřadit jí pocity studeného, teplého či horkého. Postupně bylo pozorováno, že zvýšení teploty působí změnu rozměrů, tvaru nebo skupenství předmětů.

V přírodních a technických vědách a jejich aplikacích je **teplota** skalární intenzivní stavová veličina, která je vzhledem ke svému pravděpodobnostnímu charakteru vhodná k popisu stavu ustálených makroskopických systémů. Teplota souvisí s vnitřní energií systému. Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly (0 K;  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ke které se lze libovolně přiblížit, avšak nelze jí dosáhnout.

Teplota je základní fyzikální veličinou soustavy SI s plným názvem termodynamická teplota, jednotkou **kelvin** (K) a vedlejší jednotkou **stupeň Celsia** ( $^{\circ}\text{C}$ ). K měření teploty se používají teploměry.

**Stupeň Celsia**: teplotní rozdíl  $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$ , avšak Celsiova stupnice je posunutá:  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  odpovídá přesně  $273,15\text{ K}$ , což je přibližná teplota tání ledu, zatímco  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $373,15\text{ K}$ ) je přibližná teplota varu vody (při tlaku  $101,325\text{ kPa} = 1\text{ atm}$ ).

# Teplotní roztažnost

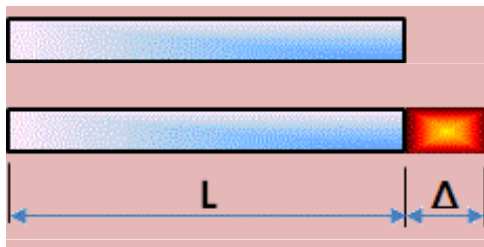
Fyzikální jev spočívající ve změně rozměrů tělesa při změně jeho teploty nazýváme **teplotní roztažnost**. Pokud látce dodáváme teplo, tak na molekulární úrovni tuto energii částice využijí k tomu, že mohou překonat vlivy přitažlivých sil a vzdálí se od sebe.

## Výpočet změny délky

Pokud se zvýší teplota tělesa délky  $L_0$  o teplotní rozdíl  $\Delta T$ , tak délka  $L$  po změně teploty

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_K - T_S))$$

kde  $\alpha$  je teplotní součinitel délkové roztažnosti,  $T_K$  je teplota na konci a  $T_S$  je teplota na začátku teplotní změny.



Látka	$\frac{\alpha}{10^{-6} \text{ K}^{-1}}$
ocel	12
hliník	23,8
mosaz (62 % Cu, 38 % Zn)	18
invar (64 % Fe, 36 % Ni)	2
sklo pro teploměry	8,3
sklo SIMAX	3,7
sklo křemenné	0,6

### Teplotní roztažnost v praxi:

- průvės drátů elektrického vedení,
- konstrukce mostů,
- kolejnice,
- písty tepelných motorů,
- silnice - pružný asfalt mezi betonovými panely,
- pružná kolena v kovových horkých potrubích.

**Eiffelova ocelová věž v Paříži** (dostavěna roku 1889) má výšku 300 m (včetně antény na vrcholu 324 m), která může vlivem teplot kolísat až o 18 centimetrů.

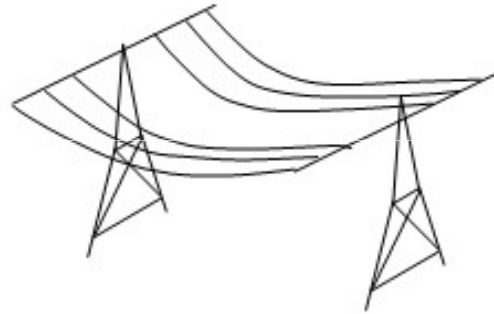


**Zdeformované kolejnice** svědčí o extrémních teplotách okolního prostředí. Relativně běžné teplotní výkyvy kompenzuje **dilatační spára**. U železničních kolejnic se mezi každou 8 m kolejnicí nechává mezera 6 mm, zatímco např. mezi kolejnicemi tramvají nebývá (tramvajové kolejnice jsou pokládány do země, kde nejsou teplotní výkyvy tak značné).





U **telefonních nebo elektrických vedení** se mezi jednotlivými sloupy používá drát daleko delší než je vzdálenost sloupů. Vodiče jsou zejména v parném létě v důsledku tepelné délkové roztažnosti viditelněji **prověšeny** než v období mrazů.

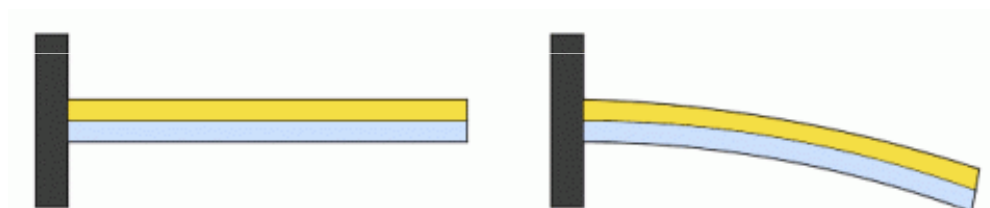


Pro nadzemní i podzemní **potrubí** je ochrana proti nadměrné teplotní dilataci řešena pomocí U-kompensátorů (dilatačních oblouků).

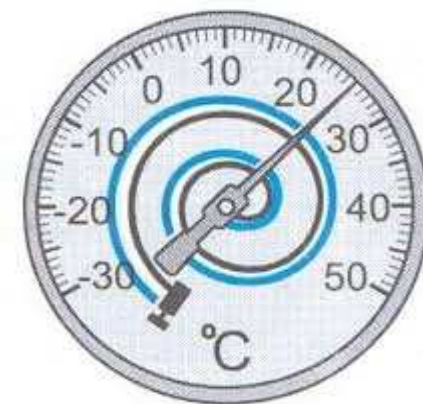


# Bimetal

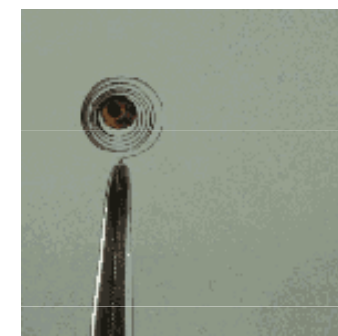
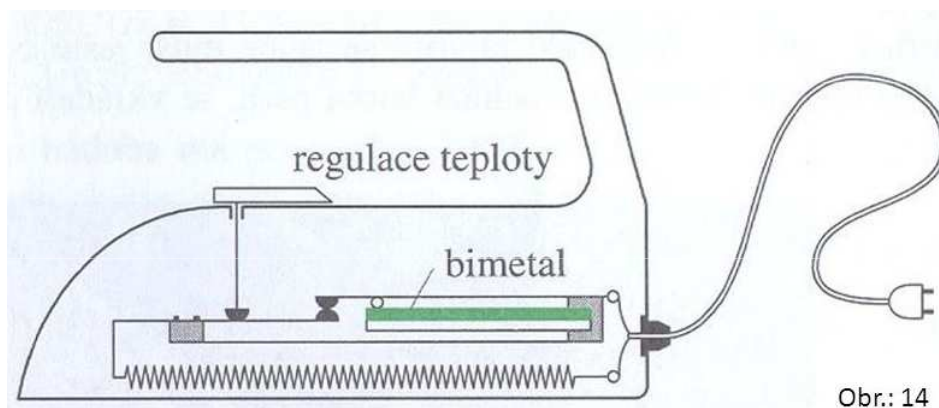
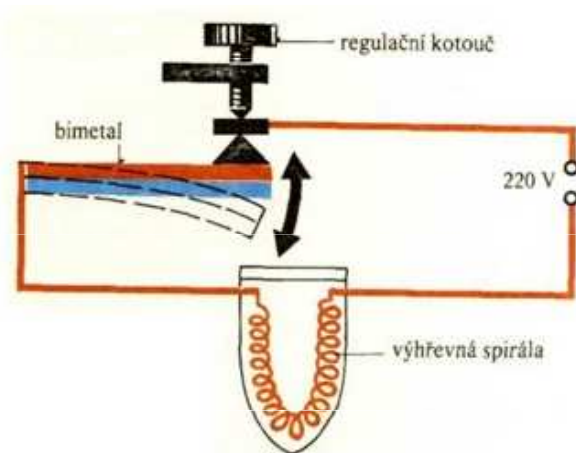
Snýtováním pásků z různých kovů a s různou teplotní délkovou roztažností získáme dvojkov čili **bimetal**. Vrstva kovu z materiálu s větší tepelnou roztažností se označuje jako **aktivní** a vrstva s menší tepelnou roztažností jako **pasivní**.



Bimetalový  
teploměr



Setkáváme se s ním v regulátorech teploty, např. v žehličce. Zvýšením teploty se bimetal zkroučí a sepne, popř. rozezne kontakty.



Obr.: 14

## Teplotní součinitele délkové roztažnosti

Látka	$\alpha$ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$
ocel	12
hliník	23,8
mosaz (62 % Cu, 38 % Zn)	18
invar (64 % Fe, 36 % Ni)	2
sklo pro teploměry	8,3
sklo SIMAX	3,7
sklo křemenné	0,6

Coarse Aggregate/Rock Group	Coefficient of Expansion ( $1^\circ\text{C}$ )
Chert or flint	$12 \times 10^{-6}$
Quartzite	$14 \times 10^{-6}$
Sandstone	$12.5 \times 10^{-6}$
Marble	$7 \times 10^{-6}$
Siliceous limestone	$10.5 \times 10^{-6}$
Granite	$10 \times 10^{-6}$
Dolerite	$9.5 \times 10^{-6}$
Basalt	$10 \times 10^{-6}$
Limestone	$9 \times 10^{-6}$
Glacial gravel	$13 \times 10^{-6}$
Sintered fly ash (coarse and fine)	$7 \times 10^{-6}$
Sintered fly ash (coarse and natural aggregate fines)	$9 \times 10^{-6}$

Material	Thermal Expansion Coefficient ( $\alpha_l$ ) in $\text{m}/\text{m}/^\circ\text{K}$
Aluminum	$23.8 \times 10^{-6}$
Concrete	$12.0 \times 10^{-6}$
Copper	$17.6 \times 10^{-6}$
Brass	$18.5 \times 10^{-6}$
Steel	$12.0 \times 10^{-6}$
Timber	$40.0 \times 10^{-6}$
Quartz Glass	$0.50 \times 10^{-6}$
Quartz Glass	$40-200 \times 10^{-6}$
Polymeric Materials	$23.8 \times 10^{-6}$
Acrylic	$75.0 \times 10^{-6}$

## Teplotní objemová roztažnost

Pokud přejdeme do trojrozměrného prostoru, tak i zde látky reagují na změnu teploty změnou svého objemu.

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) = L_0 \cdot (1 + 3\alpha \cdot (T_K - T_S))$$

kdy  $V$  je objem po teplotní změně,  $V_0$  je počáteční objem tělesa a  $\beta$  je teplotní součinitel objemové roztažnosti. U pevného tělesa z izotropní látky platí:  **$\beta \approx 3\alpha$** .

Objemová roztažnost je problém u cejkovaného laboratorního nádobí. To je zakázáno sušit v sušárně za vyšší teploty.



## Změna hustoty v závislosti na teplotě

Vycházíme z toho, že při změně teploty se nemění hmotnost tělesa. Tím pádem součin objemu a hustoty musí zůstat zachován. Proto při kladném teplotním součiniteli objemové roztažnosti hustota látky klesá.

$$V_0 \cdot \rho_0 = V \cdot \rho \rightarrow V_0 \cdot \rho_0 = V_0 \cdot (1 + \beta \Delta T) \cdot \rho \rightarrow \rho = \frac{\rho_0}{(1 + \beta \Delta T)}$$

## Příklad

Potrubí teplovodu délky 200 m bylo svařované při teplotě 20 °C. O jakou délku se prodlouží, pokud v provozních podmínkách teplota naroste na 120 °C? Teplotní součinitel délkové roztažnosti pro daný materiál je  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

$$l_0 = 200 \text{ m}$$

$$\Delta T = 100 \text{ K}$$

$$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$l = ?$$

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

$$l = l_0 + l_0 \alpha \Delta T$$

$$l - l_0 = l_0 \alpha \Delta T$$

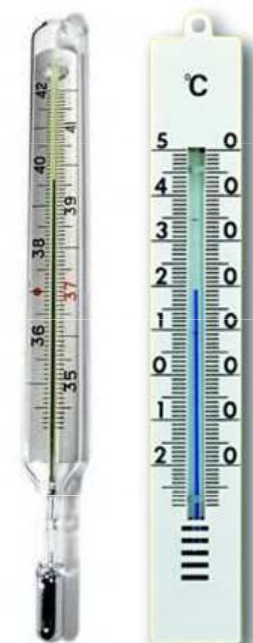
$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$$

$$\Delta l = 200 \text{ m} \cdot 0,000012 \text{ K}^{-1} \cdot 100 \text{ K} = 0,24 \text{ m} = 24 \text{ cm}$$

$$\underline{\Delta l = 0,24 \text{ m}}$$

## Dilatační teploměry

**Dilatační teploměry** jsou založeny na tepelné roztažnosti jednotlivých látek, kdy je objem měrné látky (rtuť, ethanol) závislý na její teplotě (změna rozměru je závislá na dodaném teple).



## Příklad

Zásobník rtuti teploměru lze aproximovat válcem o výšce 1,5 cm a poloměru 0,3 cm, jaký musí být poloměr kapiláry teploměru, aby při změně o 10 °C odpovídala změna výšky rtuťového sloupce v kapiláře 2 cm? Pro rtuť je  $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

$$l = 1,5 \text{ cm}$$

$$r_0 = 0,3 \text{ cm}$$

$$\Delta t = 10 \text{ °C}$$

$$\Delta h = 2 \text{ cm}$$

$$r = ?$$

$$V = V_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)]$$

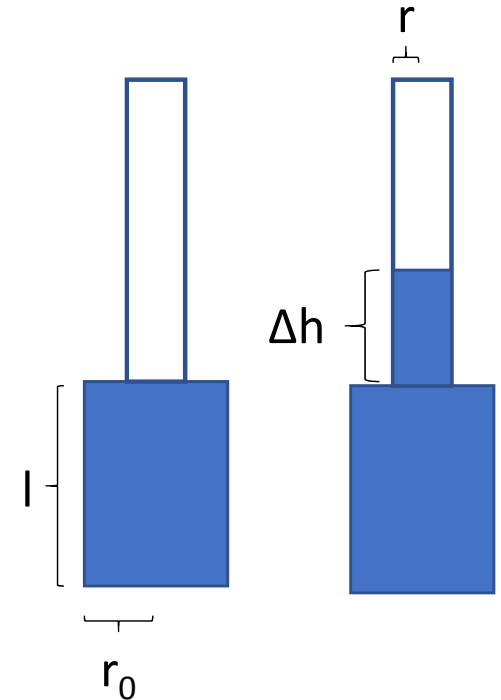
$$(V - V_0) / V_0 = \alpha \cdot (t - t_0)$$

$$\Delta h \cdot \pi \cdot r^2 / l \cdot \pi \cdot r_0^2 = \alpha \cdot \Delta t$$

$$2 \cdot \pi \cdot r^2 / 1,5 \cdot \pi \cdot r_0^2 = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 10$$

$$r / r_0 = 0,037$$

$$r = \underline{0,11 \text{ mm}}$$





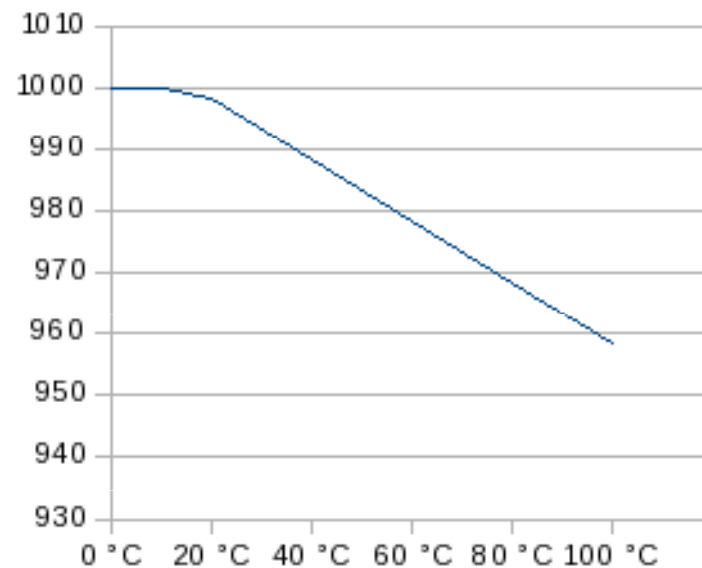
# Fyzikální vlastnosti vody

Přibližná hustota destilované vody se obvykle uvádí  $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$  (1 litr vody váží 1 kilogram).

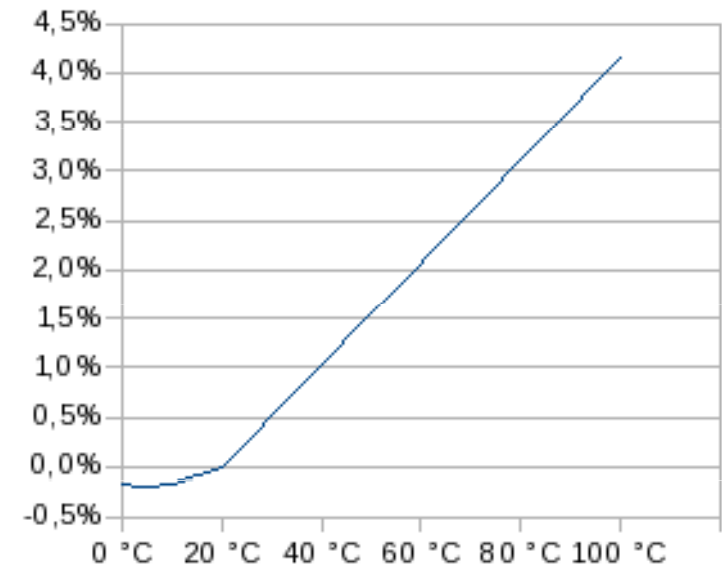


teplota	0 °C	4 °C	10 °C	20 °C	100 °C
hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	999,84	999,97	999,7	998,2	958,38
objem	998 l	998 l	998 l	1 000 l	1 042 l
zmena objemu	-0,2%	-0,2%	-0,2%	0,0%	4,2%

Hustota vody

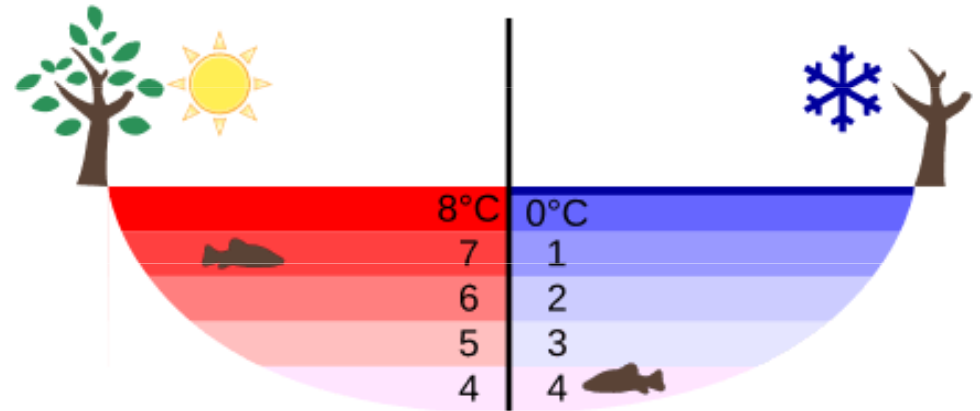


Zmena objemu

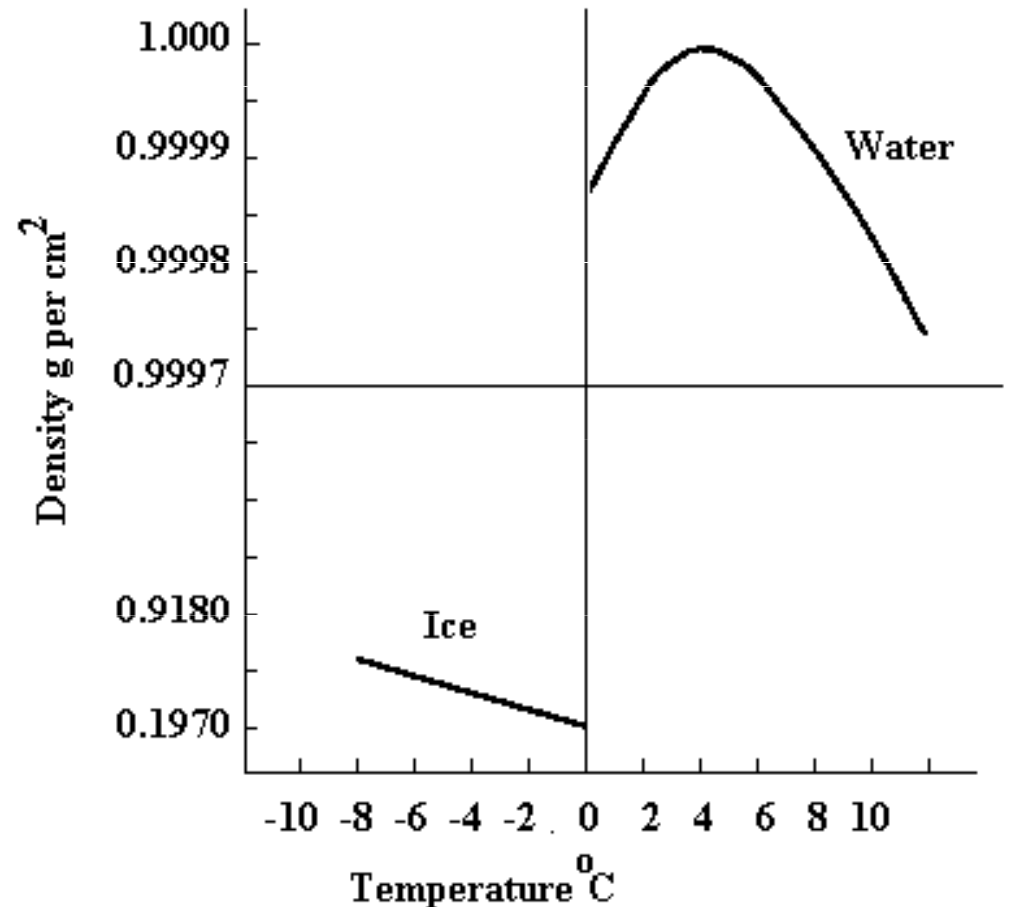


# Anomálie vody

Zahříváme-li vodu z 0°C na 4°C, zmenšuje se její objem a její hustota roste. Ve 4°C voda dosahuje max. hustoty 1000 kg na kubický metr. Teprve od teploty 4°C výše se objem vody zvětšuje a hustota se zmenšuje. Tato odlišná závislost teploty a hustoty vody v porovnání s ostatními kapalinami je anomálie vody.



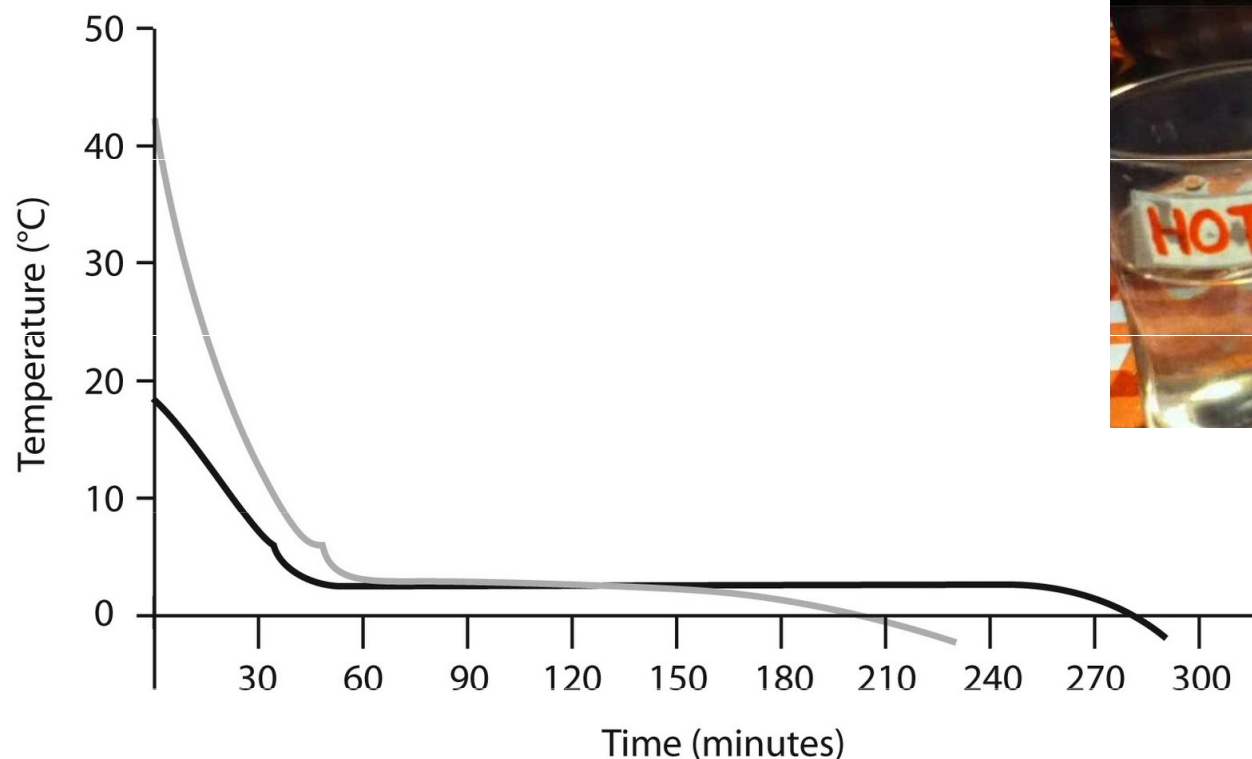
11.2.2 Density of ice and water depends on temperature



$$\rho = 1000 \left\{ 1 - \left[ \frac{T + 288.9414}{508929 (T + 68.129630)} \right] (T - 3.9863)^2 \right\}$$

# Mpembův jev

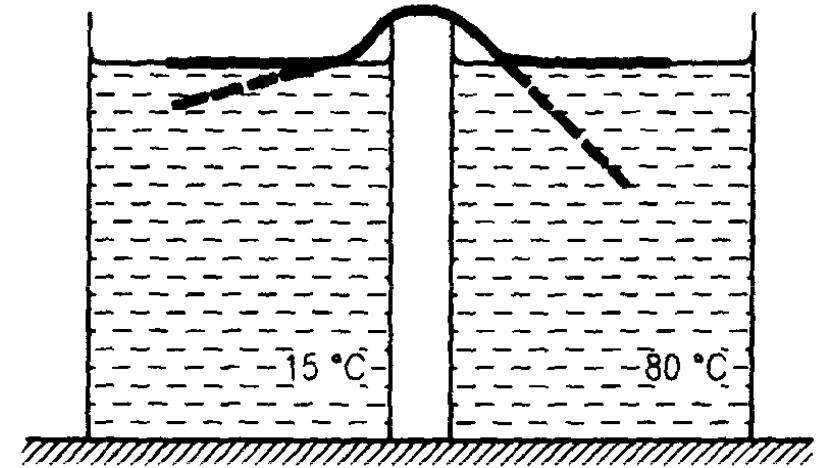
označuje experimentálně prokázanou, zdánlivě paradoxní, skutečnost, že horká voda (100 °C) může zmrznout dříve než voda studená (20 °C). Příčiny Mpembova jevu dosud nebyly uspokojivě objasněny.



K tomuto jevu však nemusí dojít vždy (např. v menším prostoru, např. mrazáku, může teplá voda v nádobě příliš ovlivnit teplotu celého prostředí).

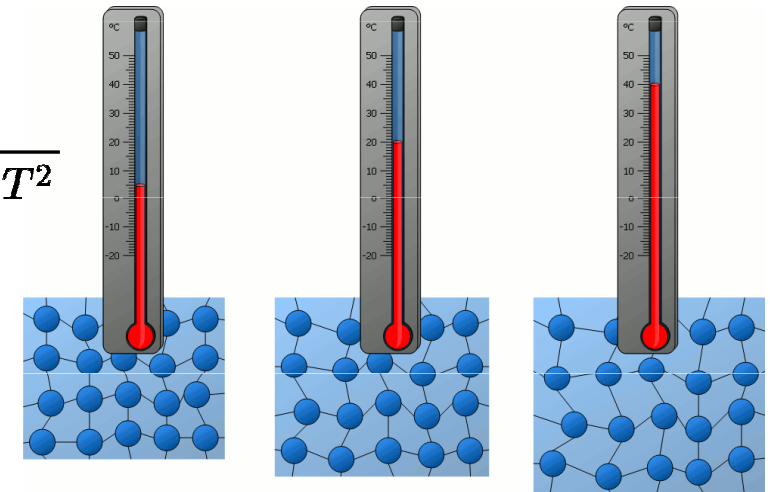
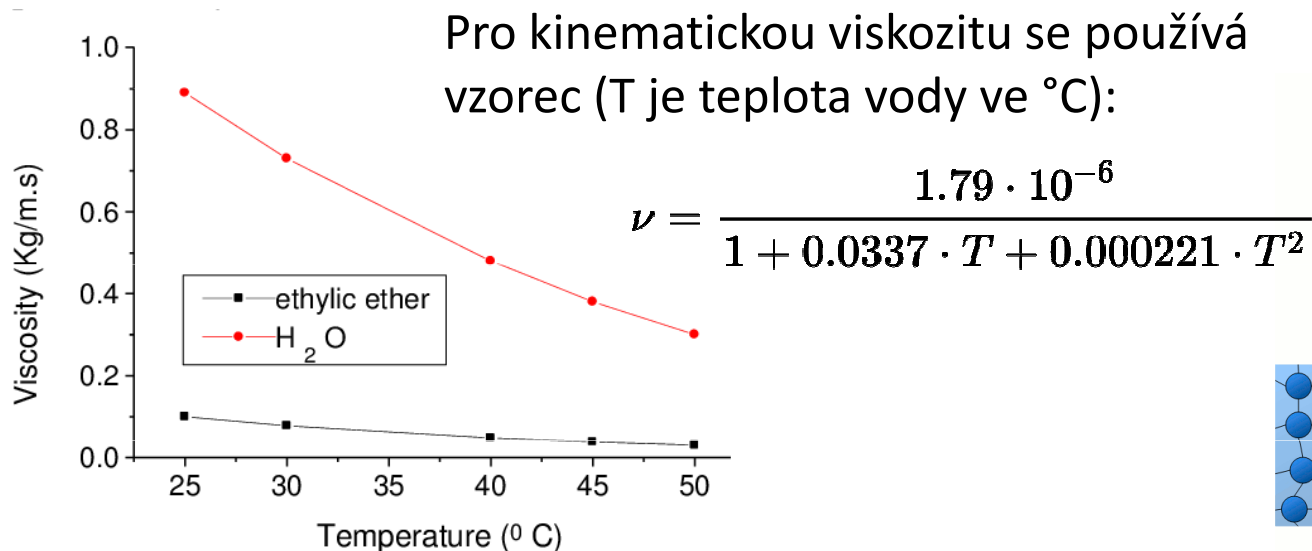
# Teplotní závislost povrchového napětí

s rostoucí teplotou povrchové napětí klesá, v důsledku snižování přitažlivých sil mezi molekulami.



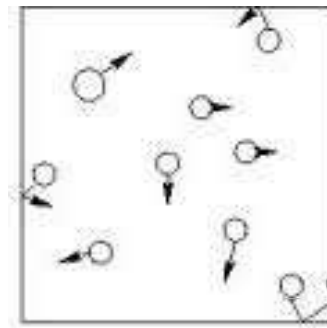
# Teplotní závislost viskozity kapalin

Viskozita kapalin s rostoucí teplotou klesá, v důsledku snižování přitažlivých sil mezi molekulami.

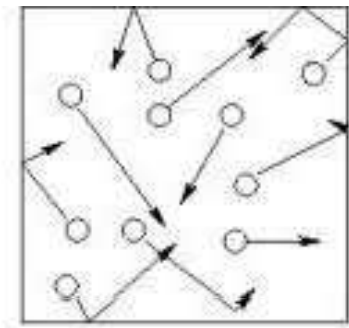


# Teplota a kinetická teorie plynů

Zvýšením teploty dojde ke zvýšení rychlosti molekul a zvýšení frekvence srážek (zkracuje se střední volná dráha) a počtu nárazů na stěnu nádoby (zvětšuje se tlak, resp. objem).

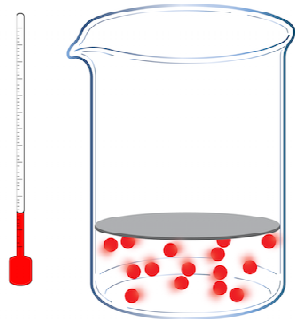


Cool gas, fewer and less energetic collisions

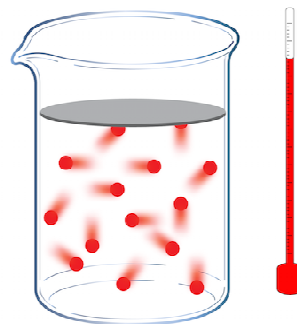


Hot gas, more and more energetic collision

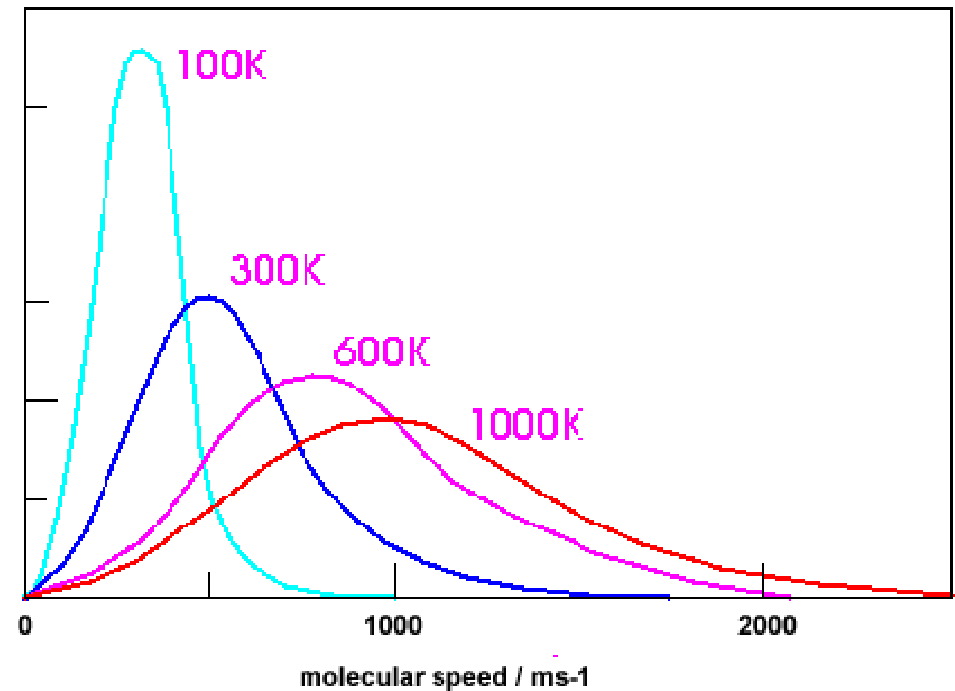
Low temperature



High temperature



number of particles



U plynů viskozita s rostoucí teplotou roste.

U plynů hustota s rostoucí teplotou klesá.

Sutherlandův vzorec 
$$\eta = A \frac{\sqrt{T}}{1 + \frac{C}{T}}$$

# Gay-Lussacův zákon

Při izobarickém ději se zvyšující se termodynamickou teplotou lineárně roste objem ideálního plynu.

**Koeficient teplotní roztažnosti**  $\alpha$  má pro různé plyny prakticky stejnou hodnotu a není závislý ani na teplotě ani na tlaku.

$$\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \sim 0.00375$$

$\alpha$  je přírůstek objemu vztažený na objemovou jednotku, způsobený nárůstem teploty o jeden stupeň.

Celkový objem plynu při teplotě  $t$  je

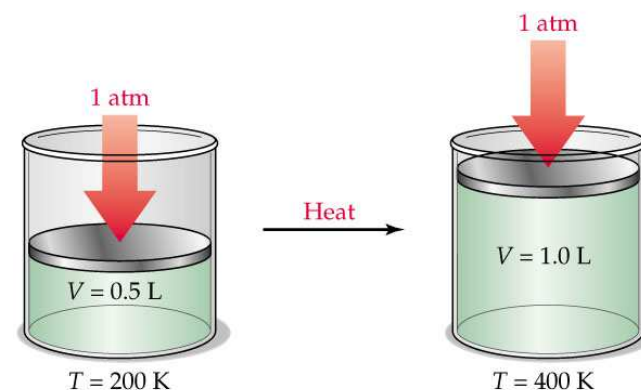
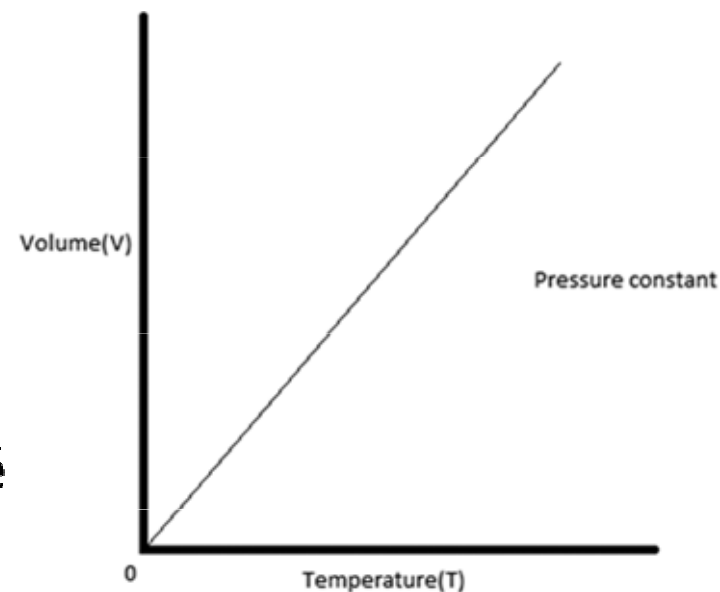
$$V_t = V_0 + \alpha V_0 t = V_0 (1 + \alpha t)$$

**Gay-Lussacův zákon** platí jen v oblasti velmi nízkých tlaků, je to zákon mezní (limitní):

$$\lim_{P \rightarrow 0} \frac{V}{V_0} = 1 + \alpha_0 t$$

$\alpha_0$  je limitní hodnota koeficientu teplotní roztažnosti  $\alpha$  pro tlak plynu blíží se nule,

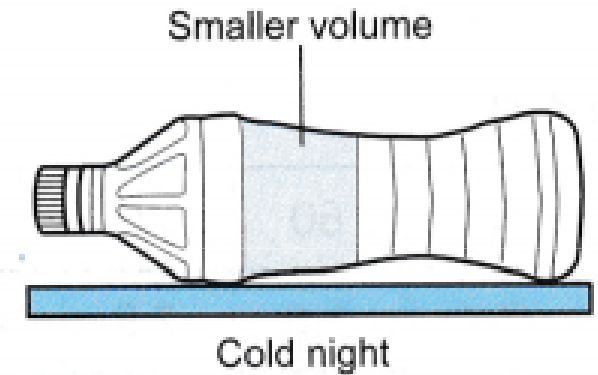
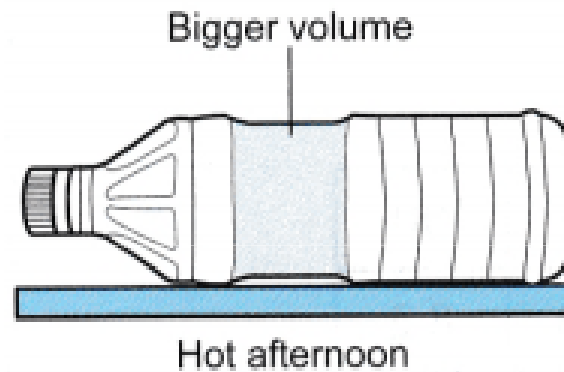
$$\underline{\alpha_0} = 0.0036610 = \underline{1/273.15}$$





## Příklad

Změna objemu **PET láhve** při různé teplotě se zhruba řídí Gay-Lussacovým zákonem.



V případě **skleněné láhve** dojde jen ke změně tlaku, což odpovídá Charlesovu zákonu.

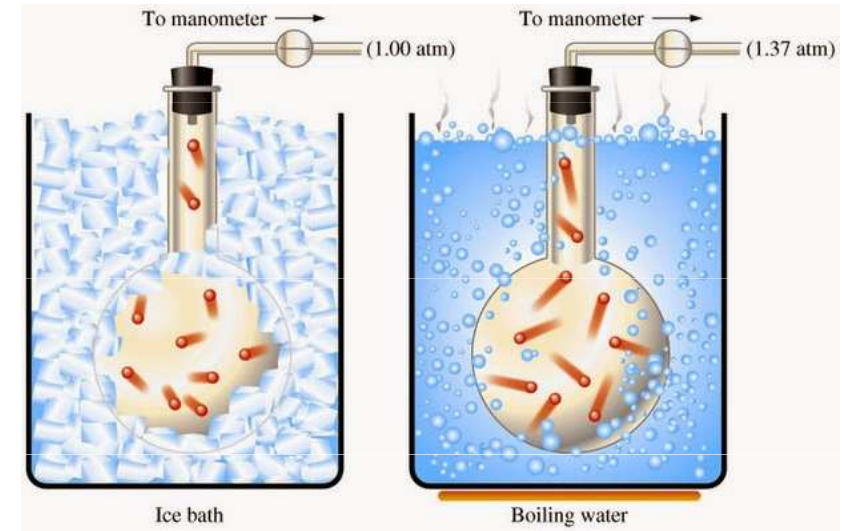
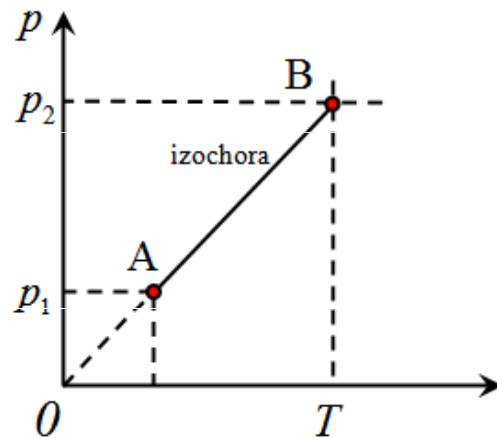
Při velkém zvýšení teploty se zvětší tlak plynu natolik, že tlaková síla překoná elastickou mez (u pružných materiálů, např. pneumatik, ...) resp. mez pevnosti (u pevných materiálů, např. tlakových lahví) nádoby a dojde k jejímu roztržení.



# Charlesův zákon

Při izochorickém ději v ideálním plynu o stálé hmotnosti je termodynamická teplota tohoto plynu přímo úměrná jeho tlaku.

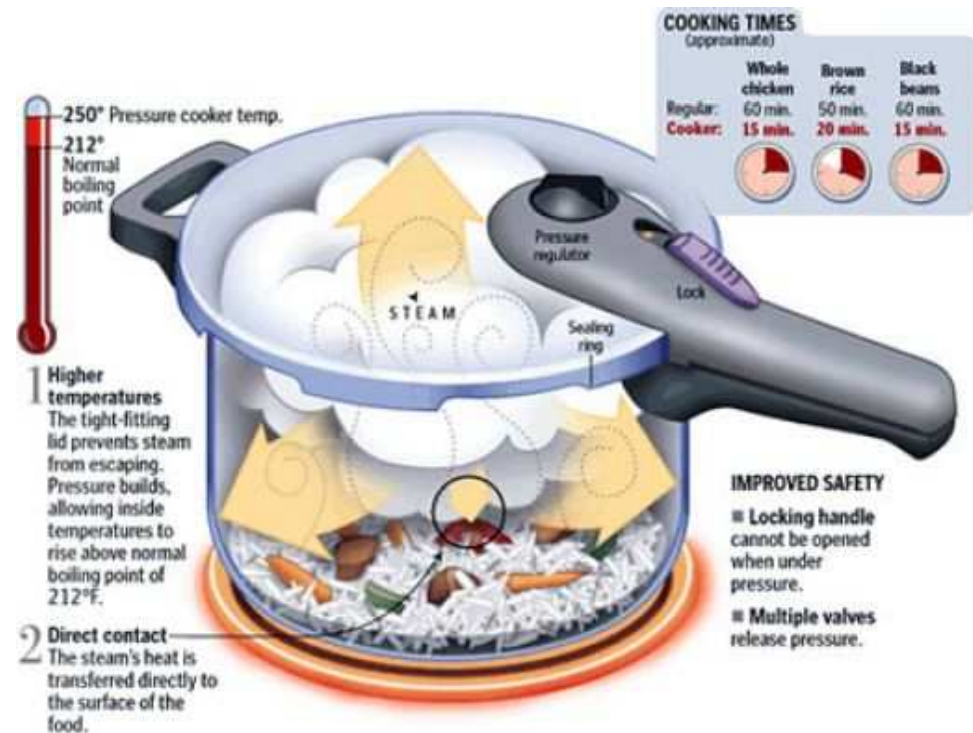
$$\frac{p}{T} = \text{konst}$$



**Autokláv** je přístroj-reaktor konstruovaný pro reakce probíhající za vysokého tlaku a teploty. V laboratořích se autokláv typicky používá ke sterilizaci materiálů v laboratorním skle, zejména médií. Samotný proces sterilizace je prováděn vlhkým teplým vzduchem a zvýšením tlaku.

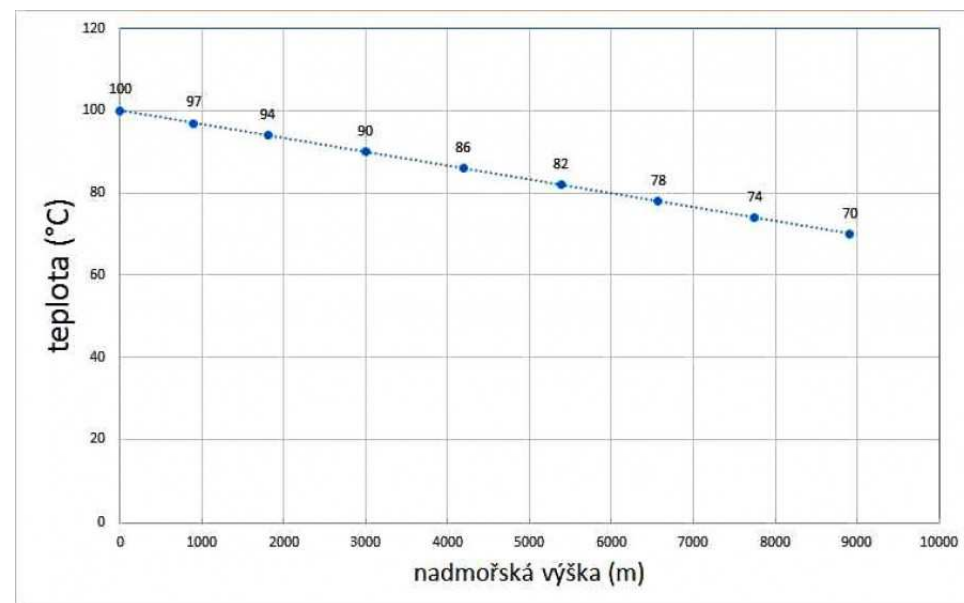


**Tlakový (Papinův) hrnec** je silnostěnný hrnec sloužící k vaření za vyššího tlaku (280 - 300 kPa), jímž se dosáhne vyšší teploty vaření (120 °C - 130 °C), a tím i rychlejšího uvaření pokrmu. Poklice, již je hrnec neprodyšně uzavřen, je opatřena pojistným ventilem, který propouští přebytečnou páru, a tak zamezuje nebezpečnému zvýšení tlaku, které by mohlo vést k roztržení hrnce a výbuchu.



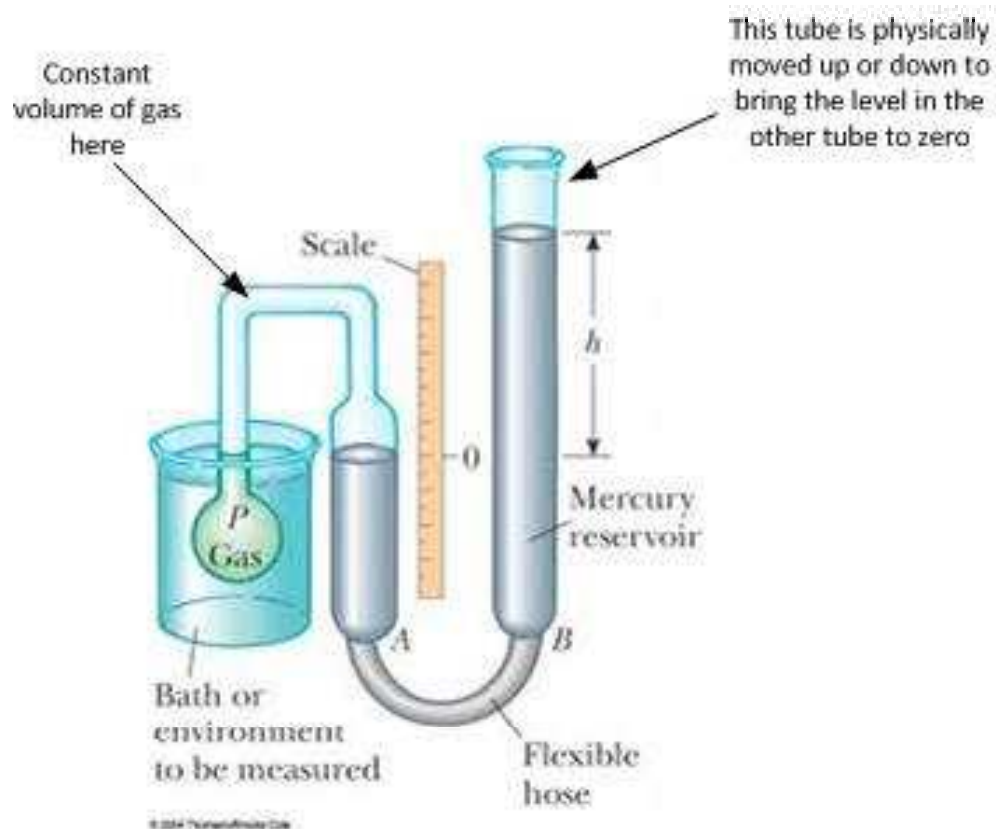
## Vaření ve vysokých nadmořských výškách

Atmosférický tlak a tím i teplota varu vody je závislý na nadmořské výšce. Např. voda na Mt. Everestu se vaří už při 70 °C. To znamená, že se jídlo vaří jen velmi pomalu a některé potraviny se „neuvaří“ vůbec.

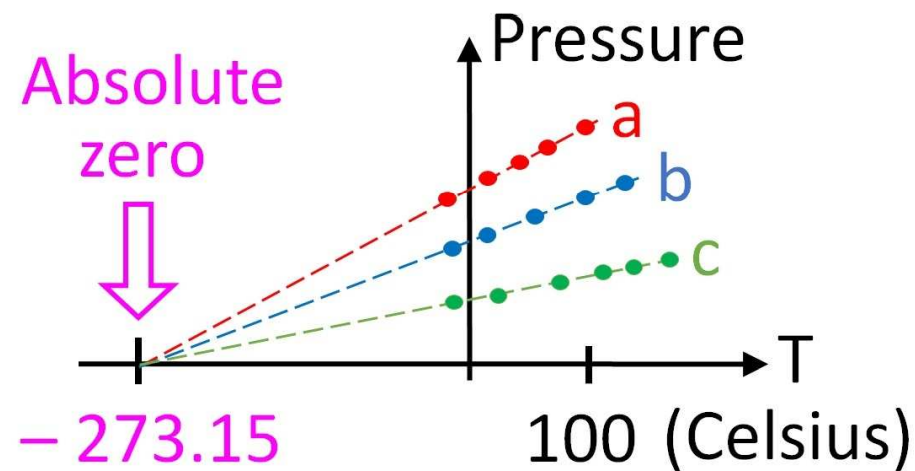


# Plynový teploměr

**Plynový teploměr** se skládá z nádoby naplněné plynem (např. vodíkem, heliem, dusíkem), která je spojena úzkou trubkou s otevřením kapalinovým manometrem. Manometr má jedno rameno pohyblivé ve svislém směru, aby se hladina plynu v pevném rameni mohla udržet stále na úrovni značky. Tím se zaručuje, že změny tlaku plynu změnou teploty probíhají za stálého objemu plynu.



Extrapolací dat pro různé (ideální) plyny lze odhadnout počáteční bod Kelvinovy stupnice (**absolutní nulu**).



$$T = t + 1/\alpha_0 = t + 273,15$$



## Příklad

Kovové uzávěry šroubovacích zavařovacích lahví lze snadněji odšroubovat pokud se zahřejí proudem teplé vody. Kov má větší teplotní součinitel roztažnosti než sklo. Po zahřátí se kov mírně roztáhne, což umožní snadnější otevření lahve. Při zahřátí lahve se uvnitř zvýší tlak a tím se sníží přitlačná síla na víčko.

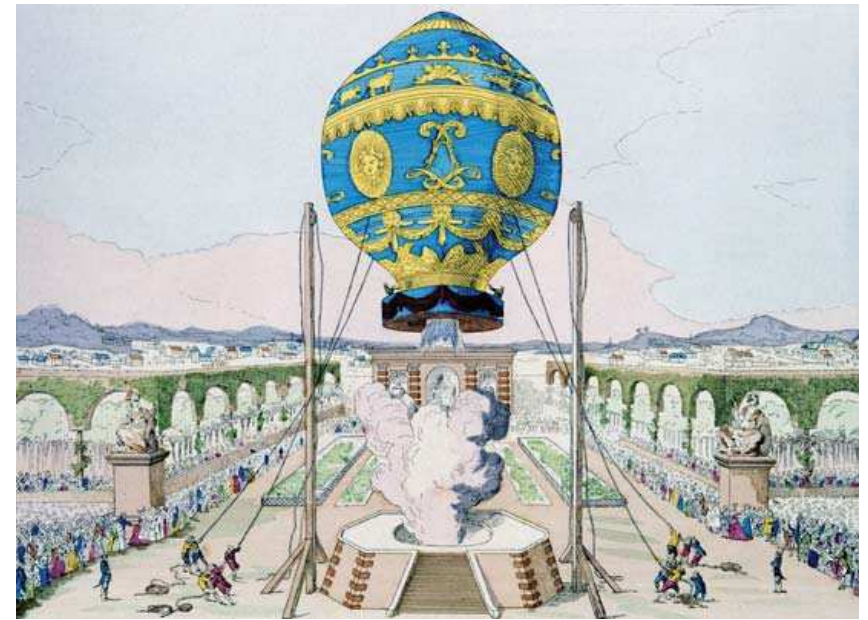


# Horkovzdušný balón (montgolfiéra)

Využívá vztlakové síly dané rozdílem hustot  
chladného a horkého vzduchu.

Vztah mezi teplotou a hustotou plynu je dán  
stavovou rovnicí

$$P = \frac{m}{M \cdot V} \cdot R \cdot T = \frac{\rho}{M} \cdot R \cdot T$$





## Příklad

Balon o objemu  $1000 \text{ m}^3$  je naplněn heliem na tlak  $62,4 \text{ kPa}$  a váží i s košem  $350 \text{ kg}$ . Jakou zátěž unese, je-li ve výšce  $3700 \text{ m}$  při teplotě okolí  $-11 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Molární hmotnost vzduchu je  $29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  a helia  $4 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

$$T = -11 \text{ }^\circ\text{C} = 262 \text{ K}$$

$$V = 1000 \text{ m}^3$$

$$m_b = 350 \text{ kg}$$

$$p = 62,4 \text{ kPa} = 62400 \text{ Pa}$$

$$M_v = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1} = 0,029 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$M_{\text{He}} = 4 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1} = 0,004 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$F_v = m_v \cdot g$$

$$F_g = (m_{\text{He}} + m_b + m_z) \cdot g$$

$$F_v = F_g$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = (m/M) / R \cdot T$$

$$p \cdot M = n \cdot R \cdot T = (m/V) / R \cdot T = \rho / R \cdot T$$

$$\rho_v = p \cdot M_v / R \cdot T = 62400 \cdot 0,029 / 8,314 \cdot 262 = 0,83 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$\rho_{\text{He}} = p \cdot M_{\text{He}} / R \cdot T = 62400 \cdot 0,004 / 8,314 \cdot 262 = 0,115 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$m_z = m_v - m_{\text{He}} - m_b = V \cdot (\rho_v - \rho_{\text{He}}) - m_b = 10^3 \cdot (0,83 - 0,115) - 350 = \underline{\underline{365 \text{ kg}}}$$

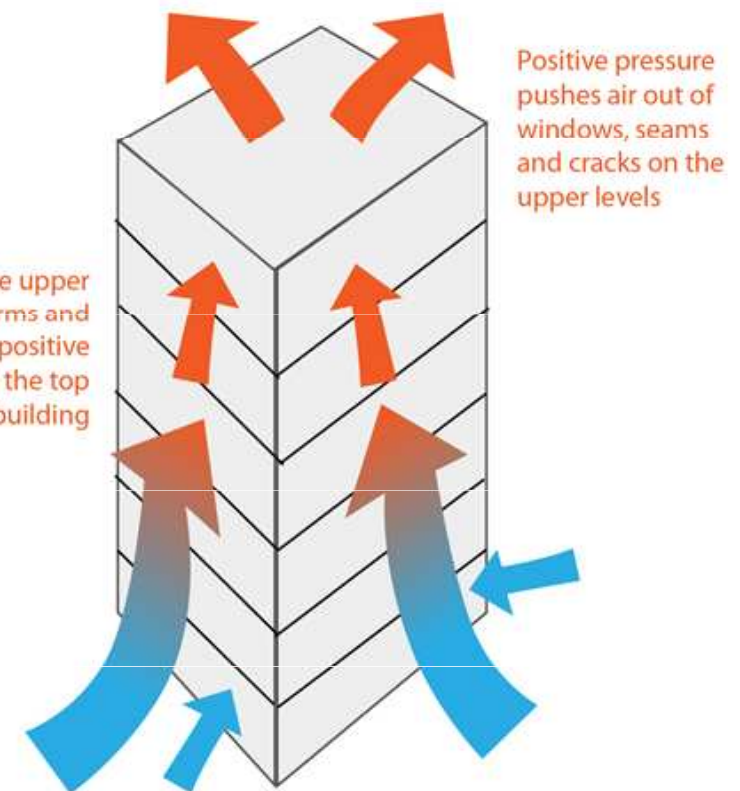


# Komínový efekt

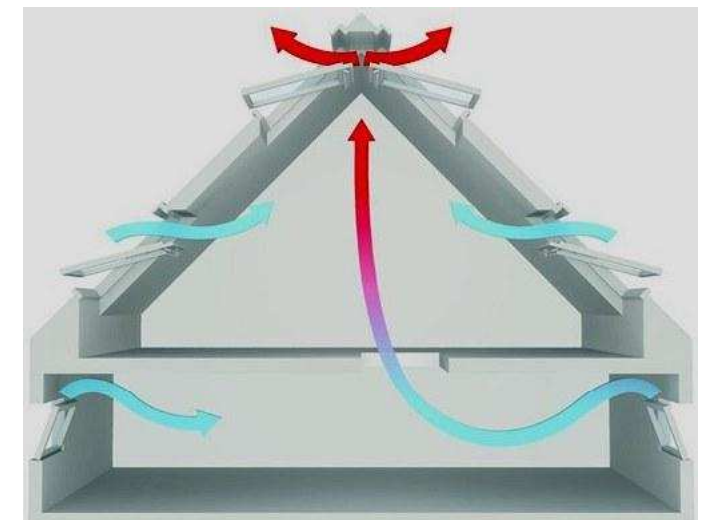
**Komínový efekt** je proudění (stoupání) teplého vzduchu svislou dutinou způsobený rozdílnou teplotou na obou koncích této dutiny. Vzduch opouštějící dutinu (komín) má nižší hustotu než chladnější vzduch okolního prostředí a stoupá proto vzhůru působením vztlaku. Teplý vzduch opouštějící dutinu v ní působí podtlak, který způsobuje nasávání teplého vzduchu dolním koncem dutiny. Čím vyšší je rozdíl teplot a výška konstrukce (např. komínu), tím vyšší je rozdíl hustoty vzduchu (vztlak) a výsledný komínový efekt.

Díky **komínovému efektu** dochází během topné sezóny v budovách (které nejsou nikdy dokonale uzavřeny) k cirkulaci vzduchu, kdy teplejší vzduch stoupá nahoru a chladnější vzduch proniká okny, dveřmi nebo průduchy či netěsnostmi dovnitř.

Air rises to the upper levels as it warms and increases positive pressure near the top of the building



Negative pressure on lower levels encourages infiltration of cold outdoor air through windows, doors, and openings



# Teplotní inverze

Za normálních okolností teplota vzduchu klesá se zvyšující se nadmořskou výškou (zemský povrch pohlcuje sluneční paprsky a atmosféru ohřívá). Lehčí teplý vzduch stoupá, zatímco studený proudí na jeho místo (**konvekce**).

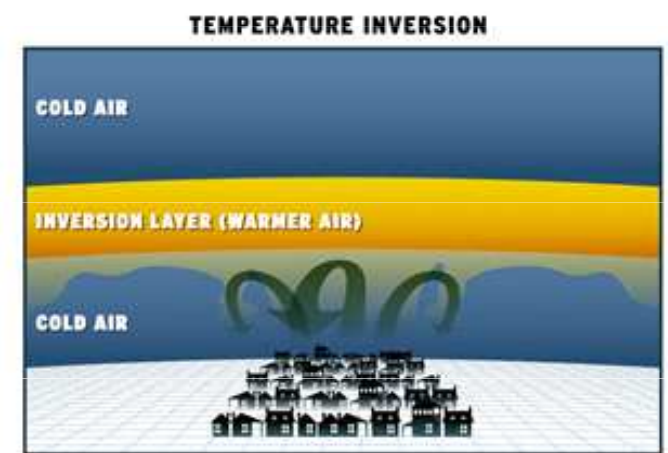
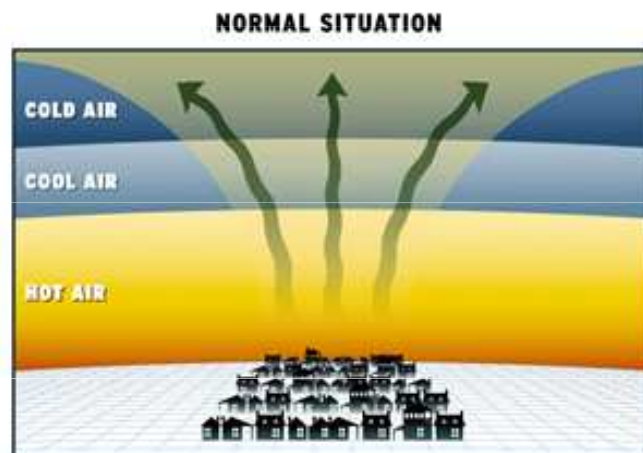
Porušení až otočení tohoto jevu (zpravidla v podzimních a zimních měsících) se říká **inverze teploty vzduchu**.

K **inverzi advekční** dochází zejména v zimě - vzduch se od země ochladí, zatímco ve výšce zůstává teplý.

V mírném pásmu se vytváří **inverze subsidenční**, kde studený vzduch klesá z vyšších vrstev do údolí, kde je uzavřen. Nad ním se mezitím tvoří oblačnost, v níž se pak často zachycují škodliviny a vzniká smog.

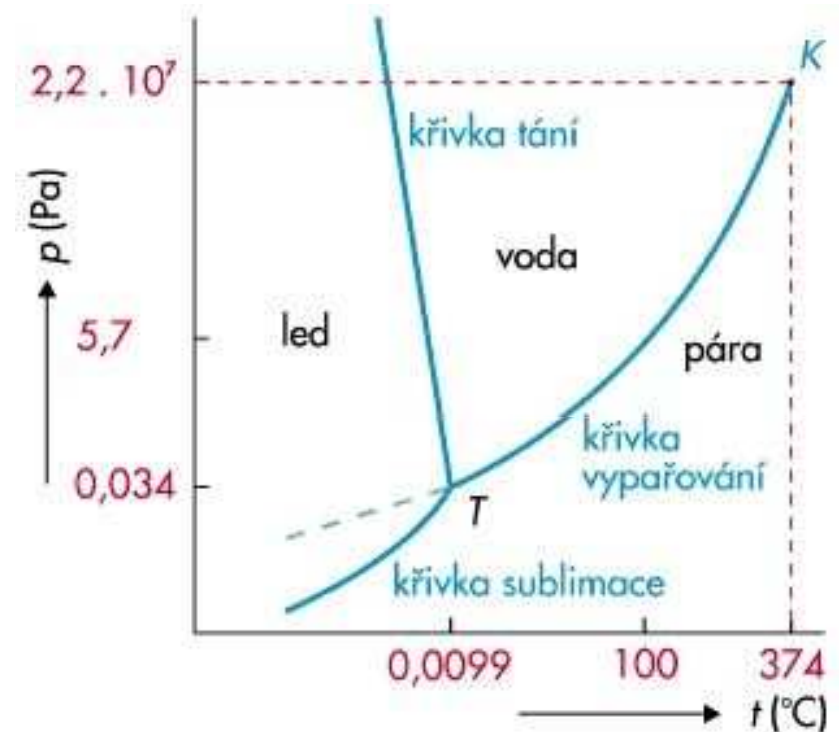
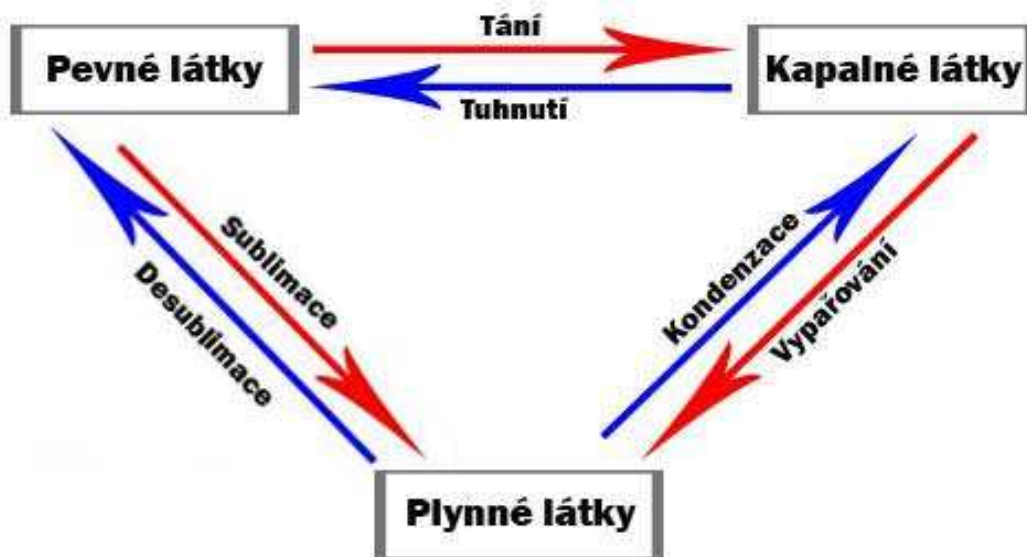
**Radiační inverze** je způsobena nočním chladnutím zemského povrchu. Přilehlá atmosféra rychle ztrácí teplotu, což v zimě zapříčiňuje přízemní mrazíky a v létě rosu.

**Turbulentní inverze** vzniká při nestandardním pohybu vzduchu, kdy dynamikou jeho proudění dochází k mísení jednotlivých vrstev. Často vznikají poblíž mořského pobřeží.



# Změna skupenství

Jedna látka se může vyskytovat jako plynná, kapalná nebo pevná. Tyto tři stavy téže látky nazýváme skupenství plynné, kapalně a pevné. Změnou skupenství rozumíme fyzikální děj, při němž se mění skupenství látky.



Tenzi par kapaliny lze pro danou teplotu vypočítat z **Antoineovy rovnice**

$$\log p = A - \frac{B}{C + T}$$

A, B, C jsou konstanty charakteristické pro danou kapalinu



# Příklad

Při jaké teplotě bude vřít voda ve Lhase, ležící v nadmořské výšce 3000 m. n. m.?  
Teplota vzduchu ve Lhase je 17 °C. Molární hmotnost vzduchu je 29 g.mol<sup>-1</sup>.

$$T = 17 \text{ °C} = 290 \text{ K}$$

$$M = 29 \text{ g.mol}^{-1} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$$

$$P_0 = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$h = 3\,000 \text{ m}$$

Konstanty Antoineovy rovnice pro vodu

$$A = 4,14259$$

$$B = 1716,96$$

$$C = 234,268$$

$$P_h = P_0 \cdot e^{-M \cdot g \cdot h / (k \cdot T)} \quad (\text{barometrický vzorec})$$

$$P_h = 101325 \cdot \exp(29 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 3000 / (8,314 \cdot 290)) = 71,12 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$$

$$\log(p) = A - B / (t + C) \quad (\text{Antoineova rovnice})$$

$$\log(71,12 \cdot 10^{-3}) = 4,14259 - 1716,96 / (t + 234,268)$$

$$t = \underline{90,26 \text{ °C}}$$



# Vlhkost vzduchu

**Vlhkost** je základní vlastnost vzduchu. Vlhkost vzduchu udává, jaké množství vody v plynném stavu (vodní páry) obsahuje dané množství vzduchu.

**Absolutní vlhkost vzduchu** vyjadřuje hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu. Vyjadřuje se nejčastěji v gramech vodní páry na metr krychlový vzduchu.

**Relativní vlhkost vzduchu** udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím par, které by měl vzduch o stejném tlaku a teplotě při plném nasycení. Udává se v procentech (%).

$$\phi = 100 \frac{m}{M} \quad \phi = 100 \frac{\Phi}{\Phi_n}$$

**Rosný bod** je teplota, při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami (relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %).

**Tlak (tenze) vodní páry** je parciální tlak vodní páry obsažené ve vzduchu [Pa]

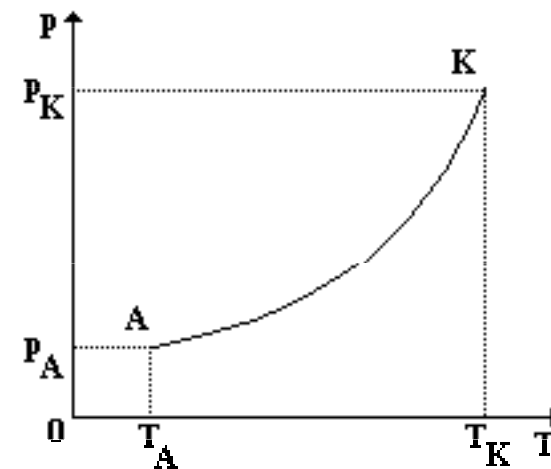
**Magnusův vzorec:**

$$E_s = E_{s,273,16} \cdot 10^{\left(\frac{8,5 \cdot t}{273,16+t}\right)} \quad E_s = E_{s,273,16} \cdot 10^{\left(\frac{9,7 \cdot t}{273,16+t}\right)}$$

*Tenze par nad povrchem vody*                      *Tenze par nad povrchem ledu*



**Sytá pára** (nasyčená pára) je pára, která je v termodynamické rovnováze s kapalinou o stejné teplotě a tlaku. Tlak nasyčené páry je závislý pouze na teplotě, a nikoli na objemu, který nasyčená pára zaujímá. Tlak nasyčené páry stoupá s teplotou. Sytá pára není ideální plyn.

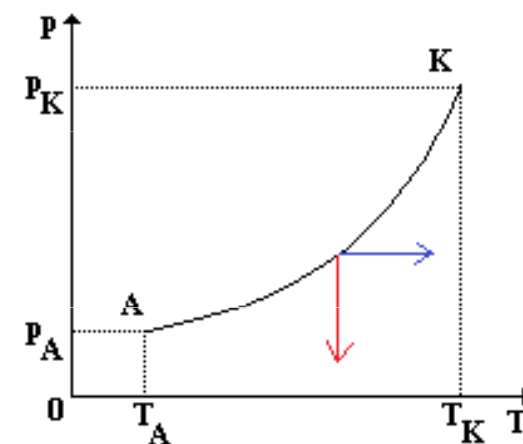


bod **K** ... kritický bod  
bod **A** - trojný bod

**Přehřátá pára** má nižší tlak a hustotu než sytá pára téže teploty. Přehřátá pára se svými vlastnostmi blíží spíše vlastnostem plynů, a to tím více, čím více se její stav liší od stavu syté páry. Pro přehřáté páry, jejichž stav je daleko od stavu sytých par platí přibližně stavová rovnice ideálního plynu.

Přehřátá pára vzniká

- zahříváním syté páry **bez přítomnosti kapaliny** při konstantním tlaku (**modrá šipka**)
- zvětšením objemu syté páry **bez přítomnosti kapaliny** při konstantní teplotě (**červená šipka**)



# Přenos (sdílení) tepla

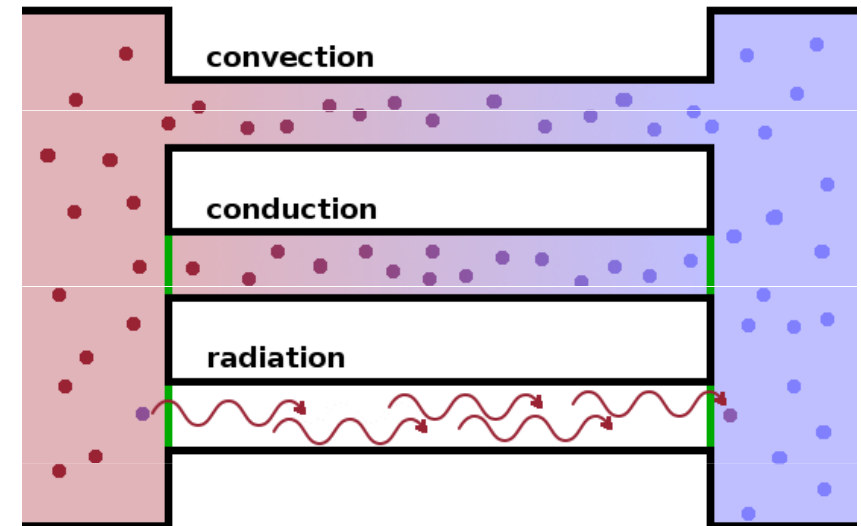
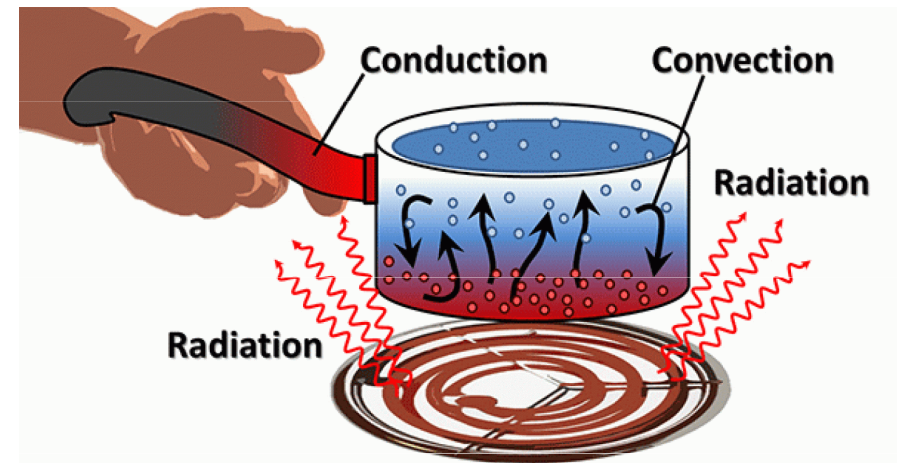
**Šíření tepla** (sdílení tepla) je jedním ze způsobů přenosu energie. Spočívá v tepelné výměně, což je termodynamický děj, při kterém dochází k výměně tepla mezi dvěma tělesy s různou teplotou. Tepelná výměna vždy probíhá tak, že teplejší těleso předává část své vnitřní energie chladnějšimu tělesu.

V **tepelných vodičích** se děje výměna rychleji, v **tepelných izolantech** – za stejných podmínek – pomaleji.

*konvekcí* (prouděním)

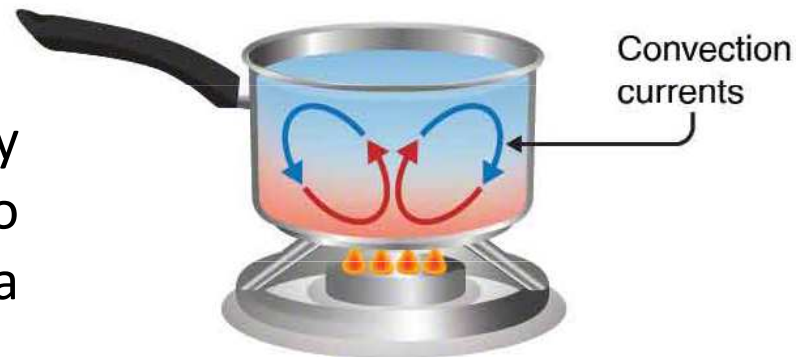
*kondukcí* (vedením)

*radiací* (zářením)



# Přenos tepla prouděním

= přenos tepelné energie prouděním tekutiny (kapaliny, plynu) z teplejších míst do chladnějších. V gravitačním poli teplejší tekutina stoupá vzhůru protože má menší hustotu.



Při konvekci dochází na rozdíl od radiace a kondukce kromě přenosu energie i k přenosu látky.

Množství tepla  $Q$ , které je za daný čas  $\tau$  (s) odvedeno z povrchu tělesa o ploše  $S$  ( $m^2$ ) do okolí o teplotě nižší o  $\Delta t$  (K) je dáno vztahem:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta t \cdot \tau$$

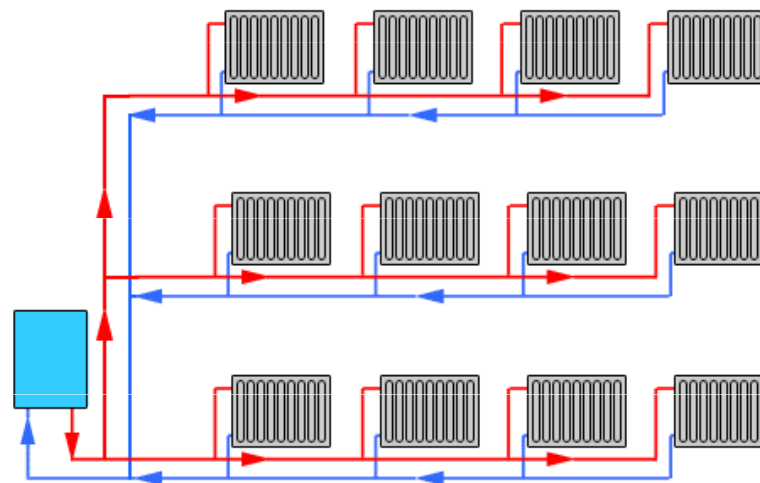
kde  $\alpha$  ( $W/K \cdot m^2$ ) je koeficient přestupu tepla rozhraním. Koeficient  $\alpha$  lze stanovit experimentálně.

**Např.**

## ***Ústřední topení***

V okruhu ústředního topení dochází k proudění vody bez čerpadla, pokud je kotel umístěn dole a radiátory nahoře.

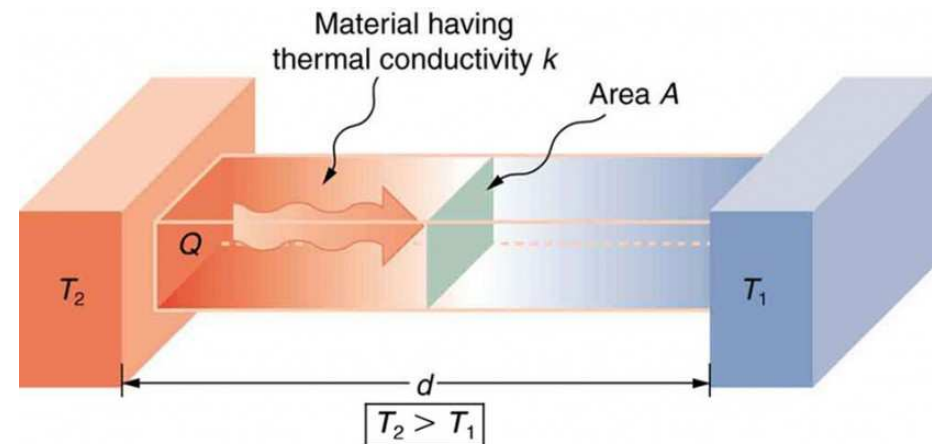
## ***Komínový efekt***



# Přenos tepla vedením

teplotní spád (gradient) (K/m, °C/m)

$$\frac{t_2 - t_1}{d}$$



Množství tepla  $Q$ , které za těchto podmínek projde libovolným kolmým průřezem  $S$  tyče za dobu  $\tau$ , je roven

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

Konstanta úměrnosti  $\lambda$  je **součinitel tepelné vodivosti** (tepelná vodivost).

Teplo procházející plochou určuje tzv. **tepelný tok**. Množství tepla  $Q$ , které projde plochou  $S$  za čas  $\tau$ , se nazývá **hustota tepelného toku** ( $q$ )

$$q = \frac{Q}{\tau S} \quad q = \lambda \frac{t_2 - t_1}{d} \quad q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad \frac{\partial q}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

**Fourierův zákon:** průběh teploty v rovinné desce je při ustáleném proudění tepla lineární.

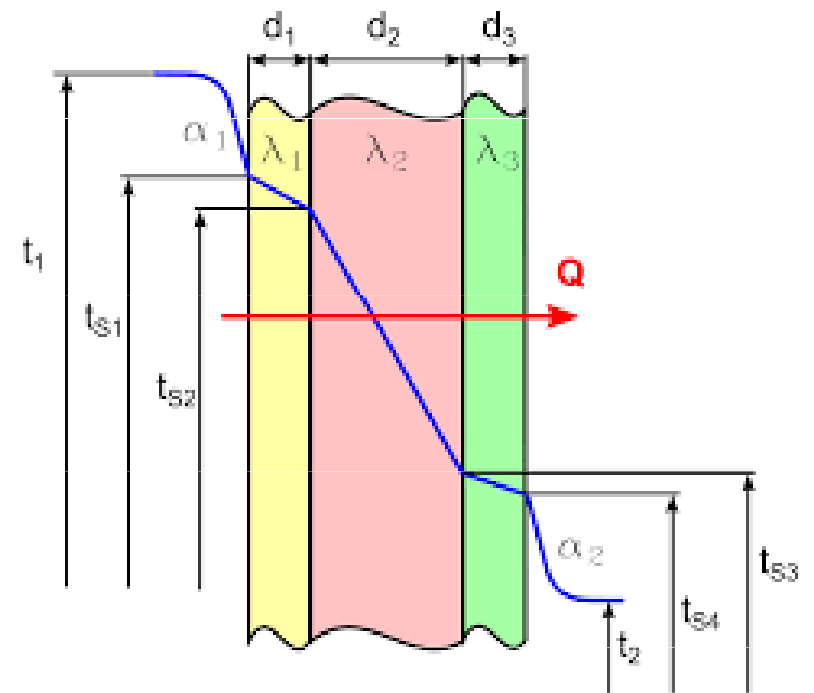
Předchozí vztahy lze využít při řešení problému průchodu tepla rozhraním.

Pokud se těleso (např. deska), kterým teplo prostupuje, skládá z  $n$  vrstev o různé tepelné vodivosti  $\lambda_i$  a tloušťce  $d_i$  pro  $i$ -tou vrstvou,  $i=1,2,\dots,n$ , pak za ustáleného stavu musí být hustota tepelného proudu ve všech vrstvách stejná

= tepelný odpor vrstvy



$$Q_{\tau} = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} S$$





# Přenos tepla vyzařováním (sáláním)

Tepelné záření je infračervené elektromagnetické záření. Na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním se může prostřednictvím sálání teplo přenášet také ve vakuu (bez zprostředkování přenosu látkovým prostředím).

**teplota tělesa** – množství vyzařené energie je popsáno *Planckovým vyzařovacím zákonem*.

**barva povrchu** – nejmenší množství tepla je vyzařováno stříbřitě lesklými povrchy, největší černými. Toho se využívá například při konstrukci termosek, kde jsou povrchy stříbřitě lesklé pro minimalizaci předávání tepla sáláním. Naopak chladiče kosmických lodí, které jsou černé pro maximalizaci vyzařené energie. Při teplotách nad 1000 °C je ale pro většinu materiálů již rozdíl zanedbatelný a s malou chybou lze počítat s tím, že se prakticky všechna tělesa chovají jako **absolutně černé těleso**.

**obsah plochy** – energie vyzařovaná sáláním je přímo úměrná obsahu povrchu vyzařujícího tělesa.

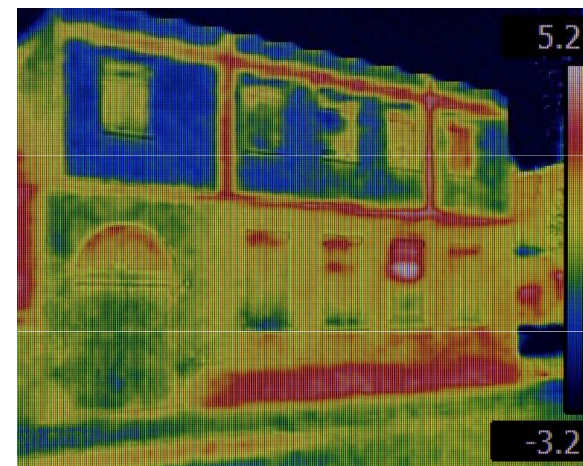
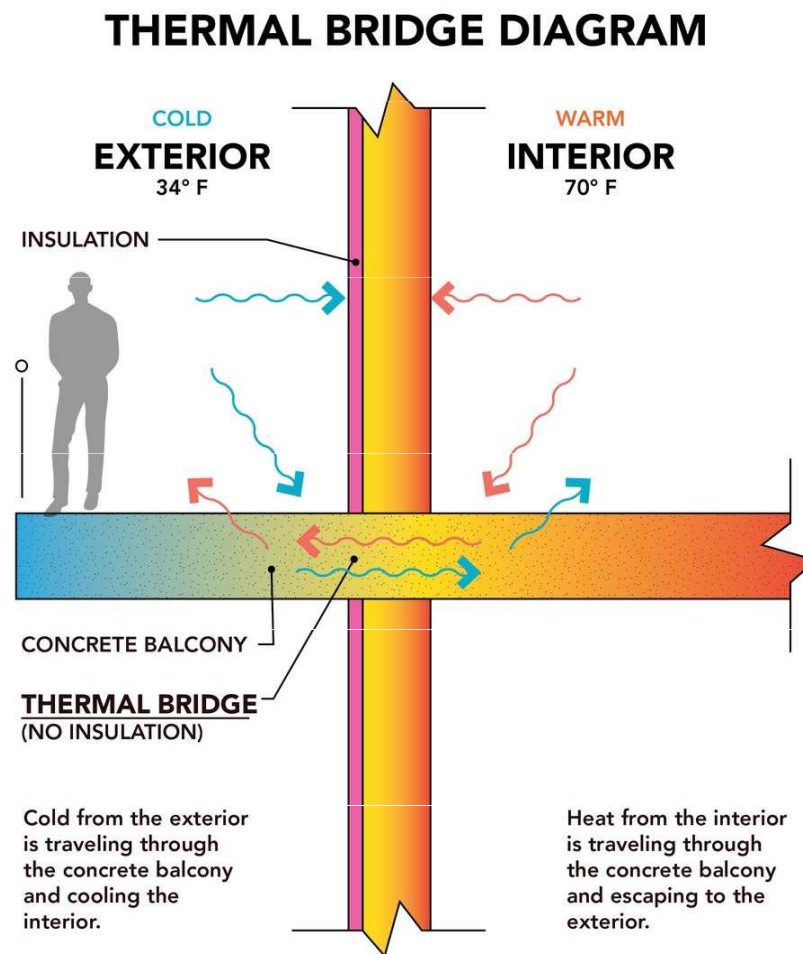
**Stefanův-Boltzmannův zákon:** intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa.

$$I = \text{konst.} \cdot T^4$$

# Tepelné mosty

**Tepelný most** (tepelná vazba) je místo v konstrukci, kde konstrukcí domu uniká více tepla než v ostatních místech tepelné obálky objektu. Dochází k větším tepelným tokům než v jeho okolí. Projevuje se chladnějším povrchem.

Typická jsou například napojení dvou různých konstrukcí (otvorové výplně – okna, dveře) nebo také změny v geometrii konstrukce (např. rohy). Dále pak prvky, které procházejí vrstvou tepelné izolace (např. kotvení pergol). Jakýkoliv prostup vrstvou tepelné izolace totiž ve výsledku snižuje její efekt. Zvláště pokud se jedná o materiál velmi vodivý. Taková konstrukce může fungovat i jako chladič.

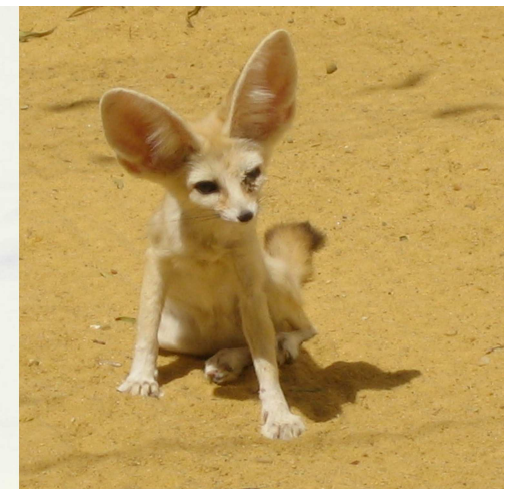
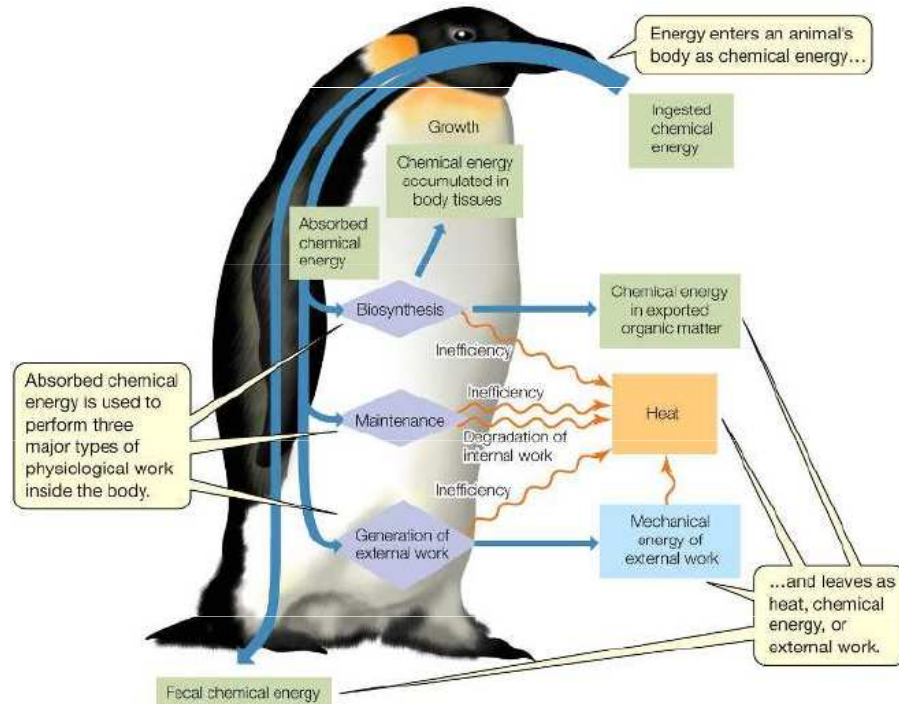
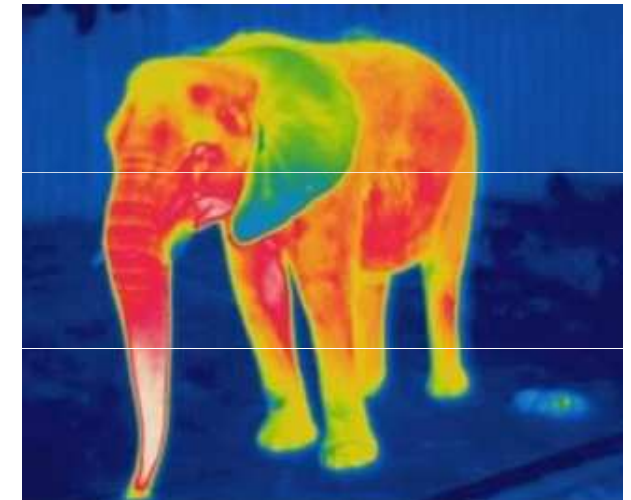


# Termoregulace u živočichů

Teplo vzniká v těle především jako vedlejší efekt metabolických procesů a důsledek svalové práce.

Odvod tepla

Odpařování vody



# Termodinamika



# Energie

Energie může mít různé formy. Celková energie systému je dána součtem všech jednotlivých druhů energií.

Podle působící síly se rozlišuje

## **Mechanická energie**

*Kinetická (pohybová) energie*

*Potenciální (polohová) energie*

Gravitační potenciální energie

Potenciální energie pružnosti

Tlaková potenciální energie

## **Elektrická energie**

## **Magnetická energie**

## **Energie záření**

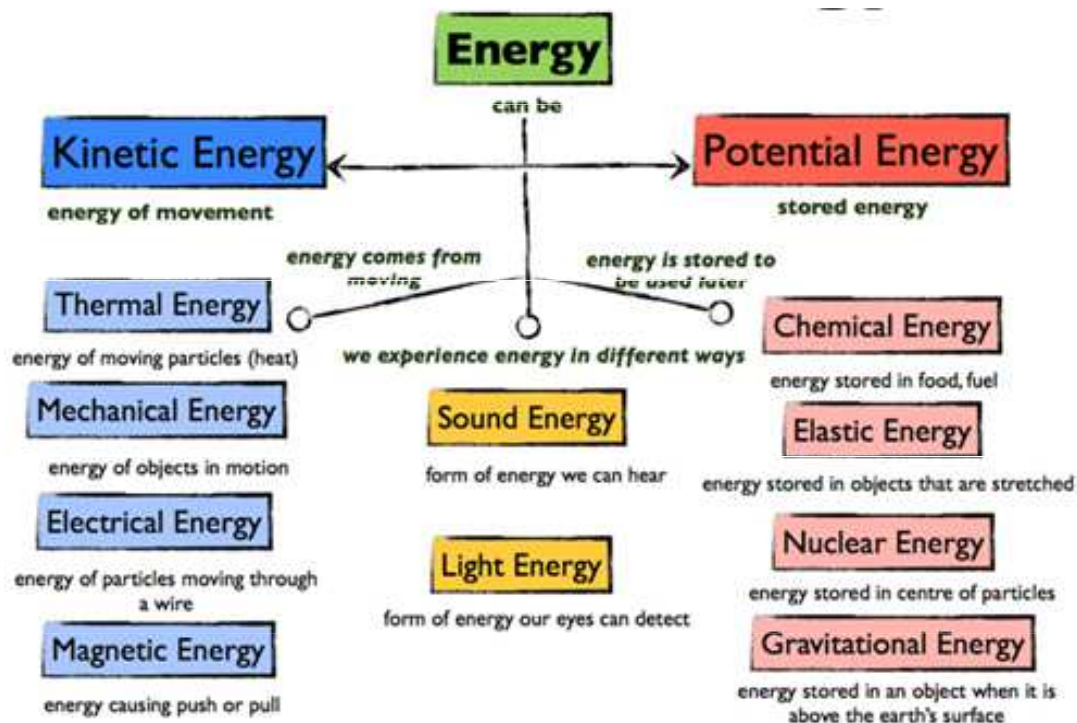
## **Energie vlnění**

## **Vnitřní energie**

*Tepelná energie (teplo)*

Jaderná energie

Chemická energie (energie chemické vazby, vazebná energie)





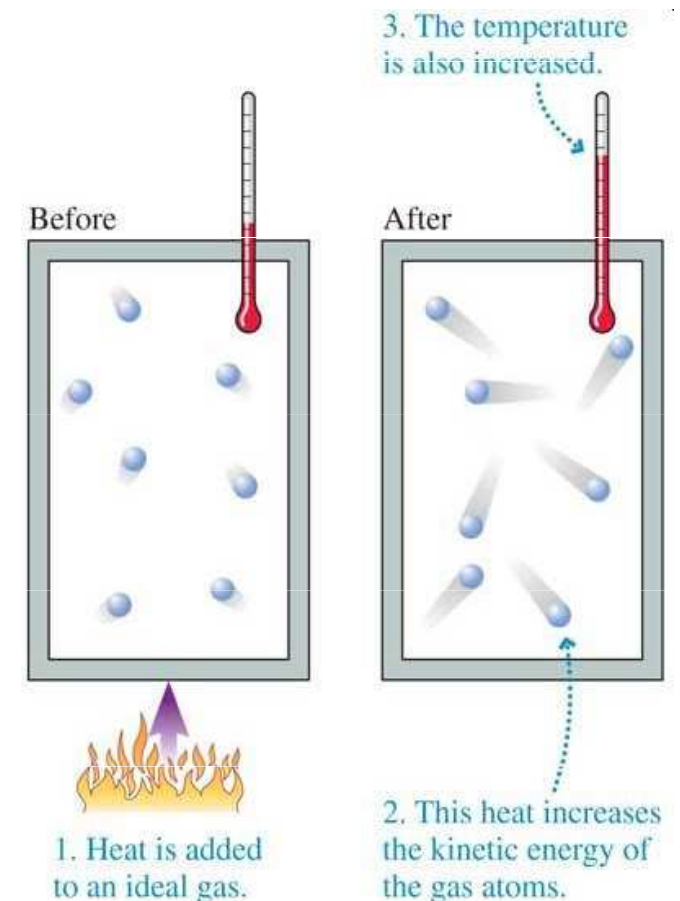
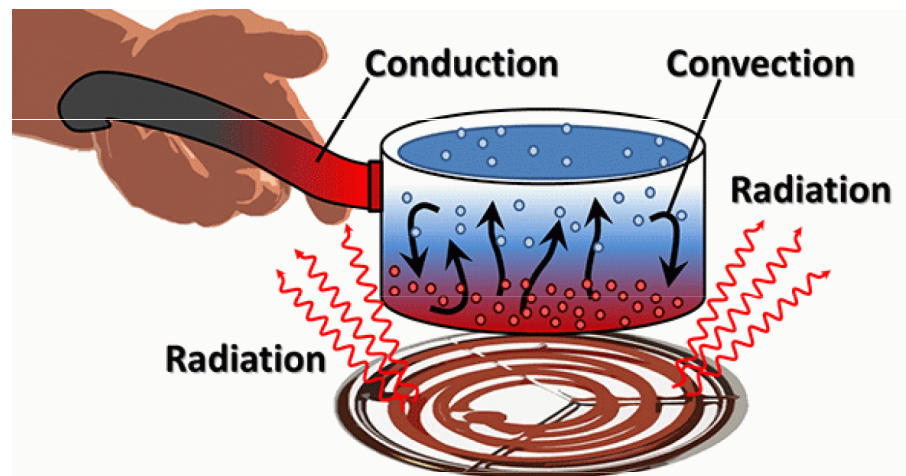
# Teplo

Dochází-li k výměně energie na základě teplotního rozdílu mezi systémem a okolím (např. předáváním kinetické energie neuspořádaného pohybu molekul), nazýváme tuto změnu energie vyměněným teplem.

Teplo závisí v obecném případě nejen na počátečním a konečném stavu, ale též na cestě oba stavy spojující. Nemá tedy totální diferenciál. Teplo předávané systémem do okolí má zápornou hodnotu a teplo přijaté z okolí do systému je kladné.

## Sdílení tepla

*konvekci*  
(prouděním)  
*kondukci*  
(vedením)  
*radiaci*  
(zářením)



**Tepelný ekvivalent mechanické práce:** počet jednotek mechanické práce nebo energie odpovídající tepelné jednotce 4,1858 J (= 1 cal).

# Přeměny ostatních forem energie na teplo

Přeměna energie na teplo bývá nazývána **disipace energie**.

## Elektrická energie

### *Odporový ohřev*

Vodič se průchodem proudu zahřívá a uvolňuje teplo (Joulovo teplo).

$$E = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t$$

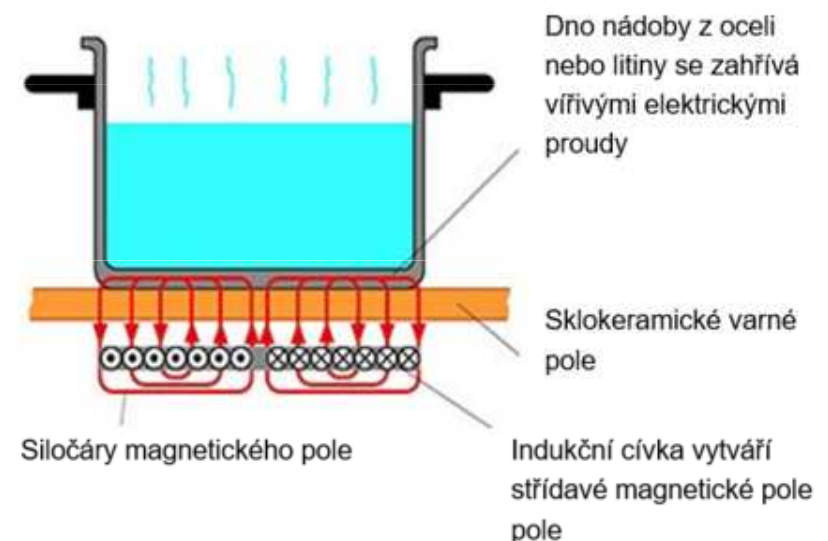
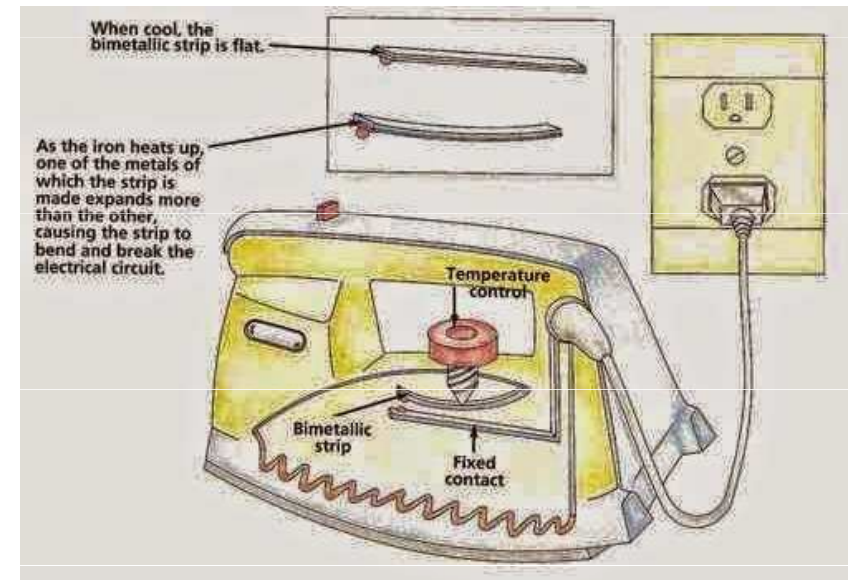
E - Joulovo teplo, U – napětí, I – proud, R - odpor vodiče, t - čas.

**Příklady:** žehlička, rychlovarná konvice, elektrický vaříč, elektrická pec, žárovka, ...

### *Indukční ohřev*

zahřívání probíhá pomocí indukovaných vířivých proudů.

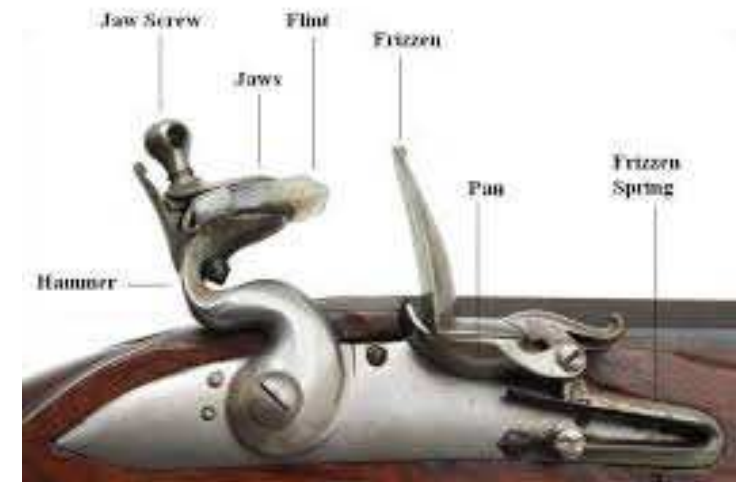
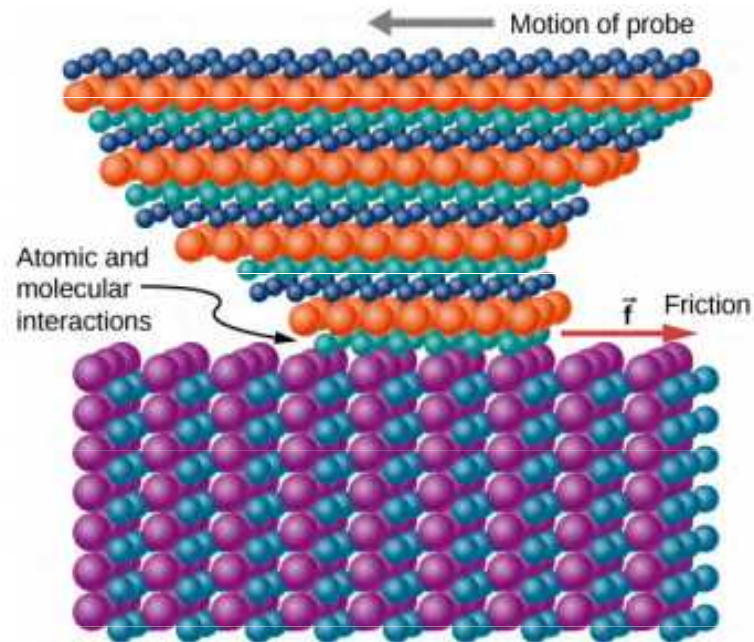
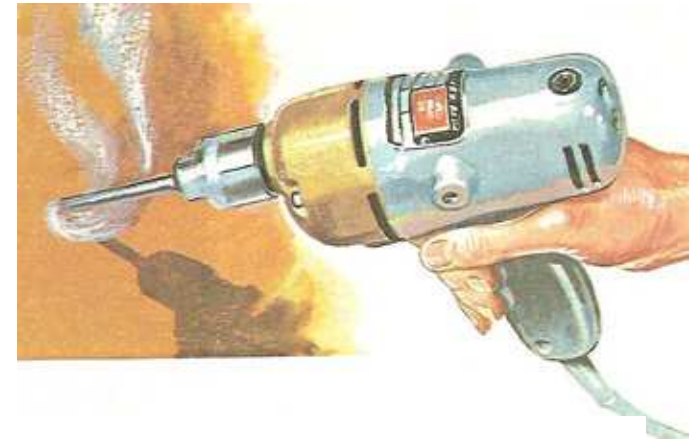
**Příklady:** indukční elektrický vaříč + hrnec, indukční elektrická pec, ...



# Přeměny ostatních forem energie na teplo

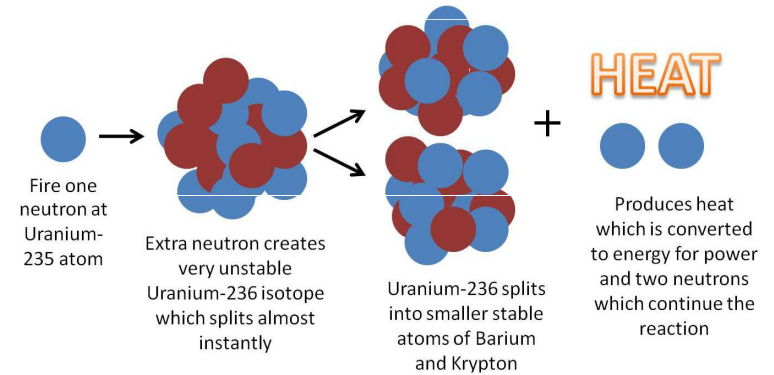
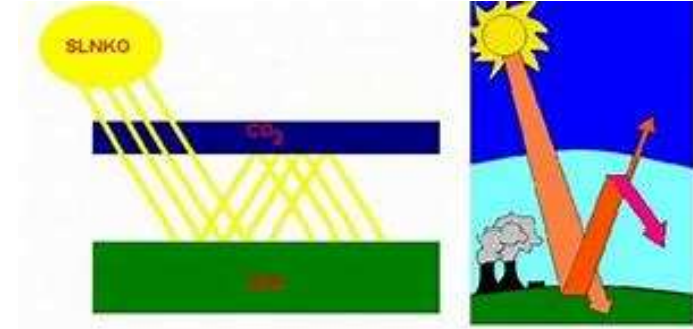
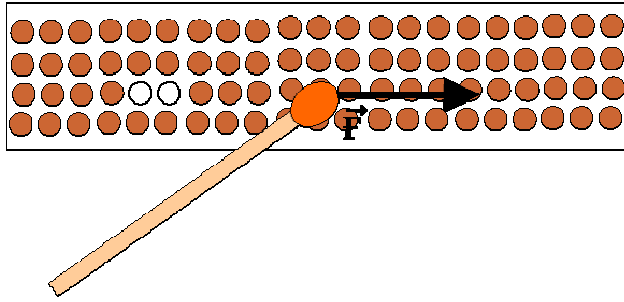
## Mechanická energie

k přeměně mechanické práce na teplo dochází prostřednictvím tření.





Koncem zápalky, na kterém je hořlavá směs rychle třeme o škrtdlo a vzniká teplo. Když je teplo, které vzniká při tření dostatečně velké, hořlavá směs vzplane. Dnes je nejběžnější teplota pro vznícení směsi okolo 100°C.



Energie záření  
Energie jaderná  
Energie chemická (exotermní reakce)



## Příklad:

Vlak o hmotnosti 500 t, jedoucí rychlostí  $72 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , byl brzděním zastaven za dobu 20 s. Jaké teplo vzniklo při brzdění za předpokladu, že veškerá pohybová energie se změnila v teplo?

## Řešení:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 20^2 \text{ J} = 10^8 \text{ J} = 0,1 \text{ GJ}$$

Vzniklé teplo nezávisí na čase, po který brzdění probíhalo.





# Tepelné kapacity

**Tepelná kapacita** je fyzikální veličina, která vyjadřuje *množství tepla, kterým se těleso ohřeje o jednotkový teplotní rozdíl* (v SI 1 kelvin). Protože teplo není stavová veličina, je nutné u tepelné kapacity specifikovat i tepelný děj, při kterém k přenosu tepla a ke změně teploty dochází, zpravidla pomocí veličin které se při daném tepelném ději zachovávají, ale předávané teplo na nich obecně závisí (např. tepelná kapacita při konstantním objemu, při konstantním tlaku, při konstantní magnetické indukci apod.).

**Měrná tepelná kapacita** (měrné teplo) je tepelná kapacita jednotkové hmotnosti látky (v SI jednoho kilogramu). Tepelnou kapacitu tělesa o hmotnosti  $m$  lze tedy vyjádřit ve tvaru  $C = m \cdot c$ , kde  $c$  je měrná tepelná kapacita.

**Molární tepelná kapacita** je tepelná kapacita vztažená na jednotku látkového množství (v SI 1 mol). Tepelnou kapacitu tělesa o látkovém množství  $n$  lze tedy vyjádřit ve tvaru  $C = n \cdot c_m$ , kde  $c_m$  je molární tepelná kapacita.

## Kalorimetrická rovnice

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

$$Q = n \cdot c_m \cdot \Delta t$$

## Příklad



Př.: Za jak dlouho se v rychlovarné konvici o příkonu 2000W ohřeje 1l vody z teploty 20°C na teplotu varu?

Předpokládáme, že se veškerá el. energie spotřebovaná konvicí přemění na teplo, které přijme voda:

Voda

Vypočteme teplo potřebné k ohřátí vody z teploty 20°C na 100°C.

$$m = 1\text{kg}$$

$$t_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$c = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$Q = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1)$$

$$Q = 4,18 \cdot 1 \cdot (100 - 20)$$

$$Q = 334,4\text{kJ}$$

Rychlovarná konvice

Známe výkon a práci, kterou musí varná konvice vykonat je stejná jako teplo potřebné k ohřátí vody. Vypočteme čas potřebný k ohřátí vody.

$$P = 2000\text{W}$$

$$W = 334,4\text{kJ} = 334400\text{J}$$

$$t = ?$$

$$W = P \cdot t \quad |:P$$

$$t = \frac{W}{P}$$

$$t = \frac{334400}{2000}$$

$$t = 167,2\text{s}$$

$$t = 2\text{ min } 47\text{ s}$$

Do vzorce pro výpočet el. práce musíme dosadit v základních jednotkách!

Měrná resp. molární tepelná kapacita jsou funkcemi teploty. Pro daný rozsah teplot se proto používají **střední měrná tepelná kapacita**, resp. **střední molární tepelná kapacita**.

$$C_{p_{mh}} \equiv \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p dt}{T_2 - T_1}$$

Smísíme-li látku o měrné tepelné kapacitě  $c_1$ , hmotnosti  $m_1$  a teplotě  $t_1$  s jinou látkou o měrné tepelné kapacitě  $c_2$ , hmotnosti  $m_2$  a teplotě  $t_2$  platí

$$m_1 \cdot c_1 \cdot t_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot t_2 = t_s \cdot (m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2)$$

### **Příklad:**

Do kalící olejové lázně o hmotnosti 35 kg, teplotě 25 °C a měrném teple oleje 1675 J.kg<sup>-1</sup>.deg<sup>-1</sup> se vloží ohřátý výkovek o hmotnosti 5 kg a měrném teple 628 J.kg<sup>-1</sup>.deg<sup>-1</sup>. Po vyrovnání teplot stoupne teplota olejové lázně na 60 °C. Jaká byla původní teplota výkovku?

$$t_x = (60 \cdot (35 \cdot 1675 + 5 \cdot 628) - 35 \cdot 1675 \cdot 25) / (5 \cdot 628) = 713,7 \text{ °C}$$

Teplota výkovku před ponořením do lázně byla 713,7 °C.

# Tepelná kapacita plynu při stálém objemu a stálém tlaku

**Izobarická tepelná kapacita** (tepelná kapacita při konstantním tlaku): parciální derivace tepla za konstantního tlaku je rovna parciální derivaci stavové veličiny – entalpie.

$$\Delta H = n \cdot c_{mp} \cdot \Delta t \quad c_{mp} = \frac{1}{n} \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{\partial H_m}{\partial T} \right)_p$$

**Izochorická tepelná kapacita** (tepelná kapacita při konstantním objemu): parciální derivace tepla za konstantního objemu je rovna parciální derivaci stavové veličiny – vnitřní energie za konstantního objemu.

$$\Delta U = n \cdot c_{mV} \cdot \Delta t \quad c_{mV} = \frac{1}{n} \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_V = \left( \frac{\partial U_m}{\partial T} \right)_V$$

$$c_{mp} - c_{mV} = -T \frac{\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V^2}{\left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_T}$$

Pro ideální plyn platí **Mayerův vzorec**  $c_{mp} - c_{mV} = R$   
 Pro reálné plyny je rozdíl o něco větší

CV	VERSUS	CP
CV is the amount of heat energy that a substance absorbs or releases with the change in temperature where a volume change does not occur		CP is the amount of heat energy that a substance absorbs or releases with the change in temperature where a pressure change does not occur
CV = (dU / dT)		CP = (dH / dT)
Volume is constant		Pressure is constant
Related to the internal energy of a system		Related to the enthalpy of a system

**Ekvipartiční teorém:** Energie molekuly je rozdělena stejnoměrně mezi všechny platné stupně volnosti molekuly, přičemž na každý platný stupeň volnosti připadá energie

$$u_1 = \frac{1}{2} k T$$

Počet platných stupňů volnosti se rovná počtu nezávislých parametrů, které určují energii soustavy.

$$KE_{avg} = \frac{3}{2} kT \quad \text{per molecule}$$

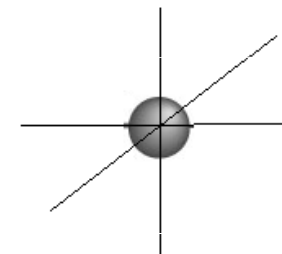
$$KE_{avg} = \frac{3}{2} RT \quad \text{per mole}$$

$k$  = Boltzmann constant =  $R/N_A$

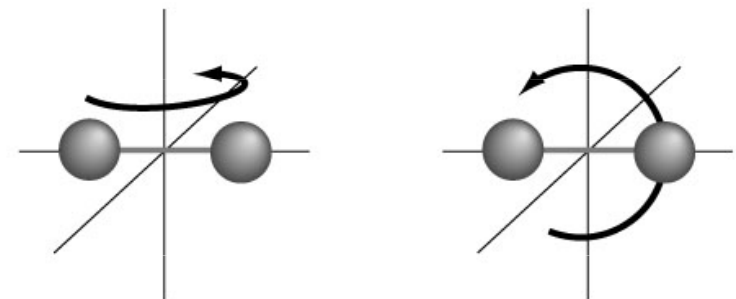
$$k = 1.38066 \times 10^{-23} \text{ J / K}$$

$R$  = universal gas constant =  $kN_A$

$$R = 8.3145 \text{ J / mol K}$$







Translational Motion



Rotational Motion



Vibrational Motion

Type of molecule	$N$	Degrees of freedom	Modes
Monatomic, e.g. Ne 	1	3	3 translational 0 rotational 0 vibrational
Diatomic, e.g. HCl 	2	6	3 translational 2 rotational 1 vibrational
Triatomic linear, e.g. CO <sub>2</sub> 	3	9	3 translational 2 rotational 4 vibrational
Triatomic non-linear, e.g. H <sub>2</sub> O 	3	9	3 translational 3 rotational 3 vibrational



# Tepelná kapacita plynů

Z kinetické teorie plynů a podle ekvipartičního teorému platí pro 1 mol plynu

**Ideální plyn, monoatomární plyny a páry kovů** – 3 stupně volnosti translačního pohybu

$$C_{mv} = 3/2 R$$

$$C_{mp} = 3/2R + R = 5/2 R$$

$$K = C_{mp}/C_{mv} = 5/3$$

**Dvouatomové plyny** - 3 stupně volnosti translačního pohybu + 2 stupně volnosti rotačního pohybu

$$C_{mv} = 5/2 R$$

$$C_{mp} = 5/2R + R = 7/2 R$$

$$K = C_{mp}/C_{mv} = 7/5$$

**Víceatomové plyny** - 3 stupně volnosti translačního pohybu + 3 stupně volnosti rotačního pohybu

$$C_{mv} = 6/2 R = 3 R$$

$$C_{mp} = 6/2R + R = 8/2 R = 4 R$$

$$K = C_{mp}/C_{mv} = 4/3$$

# Tepelná kapacita plynů

Na každý stupeň volnosti pohybu molekul připadá na jeden mol energie  $\frac{1}{2} R \cdot T$ . Každý stupeň volnosti přispívá k molární tepelné kapacitě  $C_{mv}$  hodnotou  $R/2$ . Odtud pro  $m$  stupňů volnosti

$$C_{mv} = mR/2$$

$$C_{mp} = mR/2 + R = (m+2)R/2$$

$$\kappa = C_{mp}/C_{mv} = (m+2)/m$$

Degrees of freedom

3



**Monoatomic**

$$C_v = \frac{3}{2}R = 12.5 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Helium 12.5  
Argon 12.6

5



**Diatomic**

$$C_v = \frac{5}{2}R = 20.8 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Nitrogen (N<sub>2</sub>) 20.7  
Oxygen (O<sub>2</sub>) 20.8

6



**Polyatomic**

$$C_v = \frac{6}{2}R = 24.9 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Ammonia (NH<sub>3</sub>) 29.0  
Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) 29.7

Gas	$C_v$ (J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> )	$C_p$	$C_p - C_v$	$\gamma$
<b>Monatomic gases</b>				
He	12.5	20.8	8.33	1.67
Ar	12.5	20.8	8.33	1.67
Ne	12.7	20.8	8.12	1.64
Kr	12.3	20.8	8.49	1.69
<b>Diatomic gases</b>				
H <sub>2</sub>	20.4	28.8	8.33	1.41
N <sub>2</sub>	20.8	29.1	8.33	1.40
O <sub>2</sub>	21.1	29.4	8.33	1.40
CO	21.0	29.3	8.33	1.40
Cl <sub>2</sub>	25.7	34.7	8.96	1.35
<b>Polyatomic gases</b>				
CO <sub>2</sub>	28.5	37.0	8.50	1.30
SO <sub>2</sub>	32.4	40.4	9.00	1.29
H <sub>2</sub> O	27.0	35.4	8.37	1.30

# Tepelná kapacita plynů – závislost na teplotě

Pro ideální plyn jsou hodnoty  $C_{mv}$  a  $C_{mp}$  konstantní, obecně jsou závislé na teplotě. Tato závislost se vyjadřuje pomocí mnohočlenů s celistvými mocninami teploty:

$$C_{mp}(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1})$$

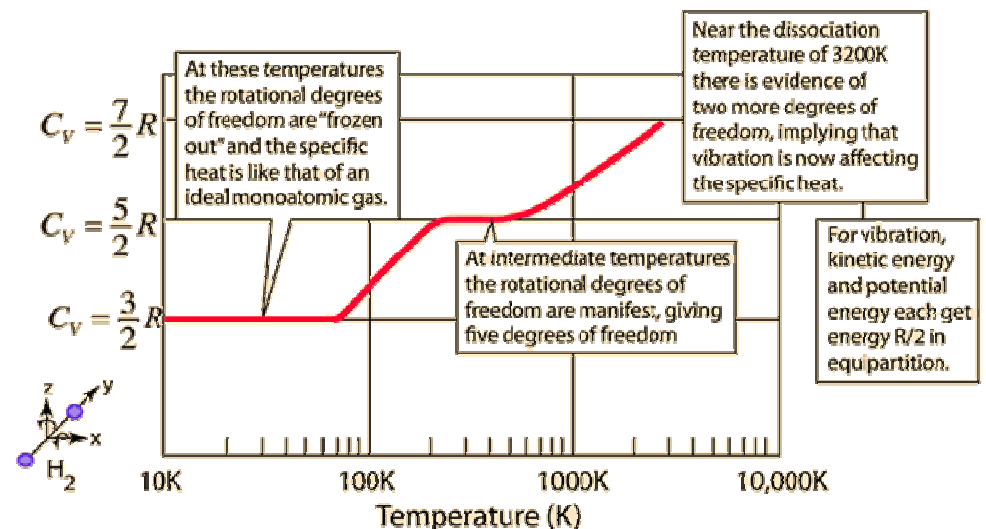
$$C_{mp}(T) = a + bT + cT^{-2} \quad (\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1})$$

$$C_{mp}(T) = a + bT + cT^2 + dT^{-1} + eT^{-2} \quad (\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1})$$

konstanty a, b, c, ... jsou tabelovány.

Výpočet příslušného tepla se provádí integrací rovnic v mezích  $T_1 - T_2$ .

Gas	a	b	c	d
SO <sub>2</sub>	38.91	$3.904 \times 10^{-2}$	$-3.105 \times 10^{-5}$	$8.606 \times 10^{-9}$
SO <sub>3</sub>	48.50	$9.188 \times 10^{-2}$	$-8.540 \times 10^{-5}$	$32.40 \times 10^{-9}$
O <sub>2</sub>	29.10	$1.158 \times 10^{-2}$	$-0.6076 \times 10^{-5}$	$1.311 \times 10^{-9}$
N <sub>2</sub>	29.00	$0.2199 \times 10^{-2}$	$-0.5723 \times 10^{-5}$	$-2.871 \times 10^{-9}$



## C: molar specific heat of Various Gases

Gas constant:  $R = 8.315 \text{ J/mol.K}$

Molar Specific Heat (J/mol · K) <sup>a</sup>				
Gas	$C_P$	$C_V$	$C_P - C_V$	$\gamma = C_P/C_V$
<b>Monatomic Gases</b>				
He	20.8	12.5	8.33	1.67
Ar	20.8	12.5	8.33	1.67
Ne	20.8	12.7	8.12	1.64
Kr	20.8	12.3	8.49	1.69
<b>Diatomic Gases</b>				
H <sub>2</sub>	28.8	20.4	8.33	1.41
N <sub>2</sub>	29.1	20.8	8.33	1.40
O <sub>2</sub>	29.4	21.1	8.33	1.40
CO	29.3	21.0	8.33	1.40
Cl <sub>2</sub>	34.7	25.7	8.96	1.35
<b>Polyatomic Gases</b>				
CO <sub>2</sub>	37.0	28.5	8.50	1.30
SO <sub>2</sub>	40.4	31.4	9.00	1.29
H <sub>2</sub> O	35.4	27.0	8.37	1.30
CH <sub>4</sub>	35.5	27.1	8.41	1.31

$$C_V = \frac{3}{2}R$$

$$C_V = \frac{5}{2}R$$

$$C_V \approx \frac{7}{2}R$$

# Tepelná kapacita pevných látek

**Dulongovo – Petitovo pravidlo:** molární tepelné kapacity pevných prvků jsou přibližně rovny hodnotě  $26 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

Pravidlo platí jen přibližně. Za laboratorní teploty se hodnota  $C_{mp}$  pevných prvků pohybuje v intervalu  $25 - 29 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$  (zejm. těžké kovy). Výjimkou jsou prvky C, B a Si jejichž molární tepelné kapacity jsou nižší a hodnoty  $26 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$  dosahují jen za vysokých teplot (nad  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

**Neumannovo – Koppovo pravidlo:** molární tepelné kapacity pevných sloučenin se rovnají stechiometrickému součtu molárních tepelných kapacit pevných prvků z nichž se skládají. Pokud se molekula skládá z  $n$  atomů její hodnota  $C_{mp}$  by se měla rovnat  $26n \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ . Pravidlo je spíše orientační, chyba může činit až 10 %.

Při laboratorní teplotě nutno brát do sumace tyto hodnoty:

prvek	C	H	B	N	O	F	ostatní	Pb	I	K
Inkrement molární tepelné kapacity ( $\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ )	1.8	2.3	2.7	4.0	4.0	5.0	6.3	6.4	6.6	7.31

U sloučenin obsahujících krystalovou vodu se za každou molekulu vody započítává 9.85 (odpovídá hodnotě  $C_{mp}$  ledu).



## Příklad:

Výpočet molární tepelné kapacity ( $\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ ) pevných látek podle Neumann – Koppova pravidla:

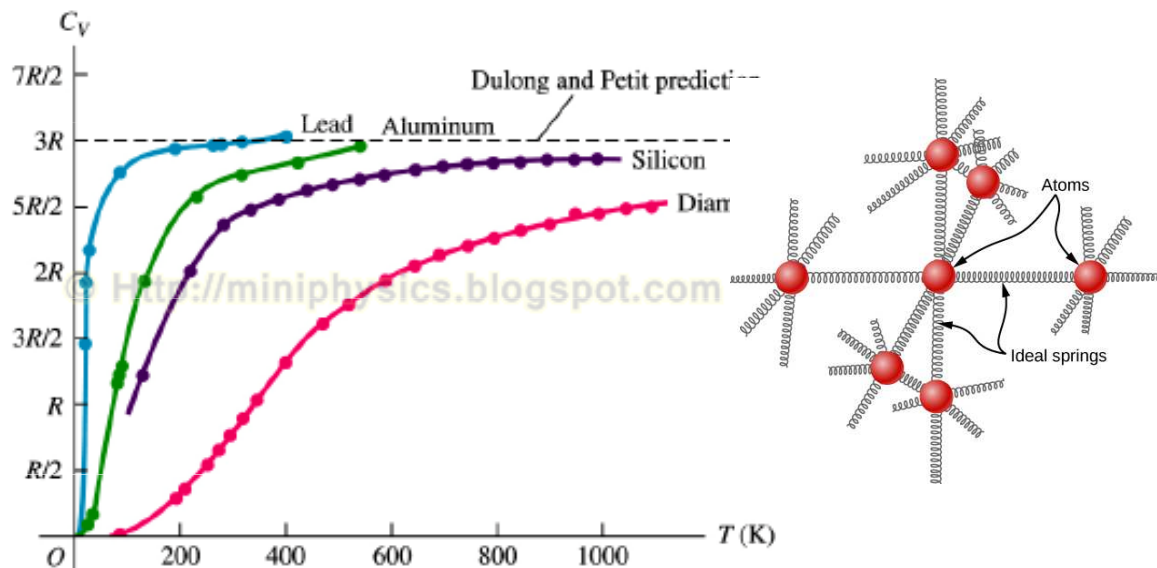
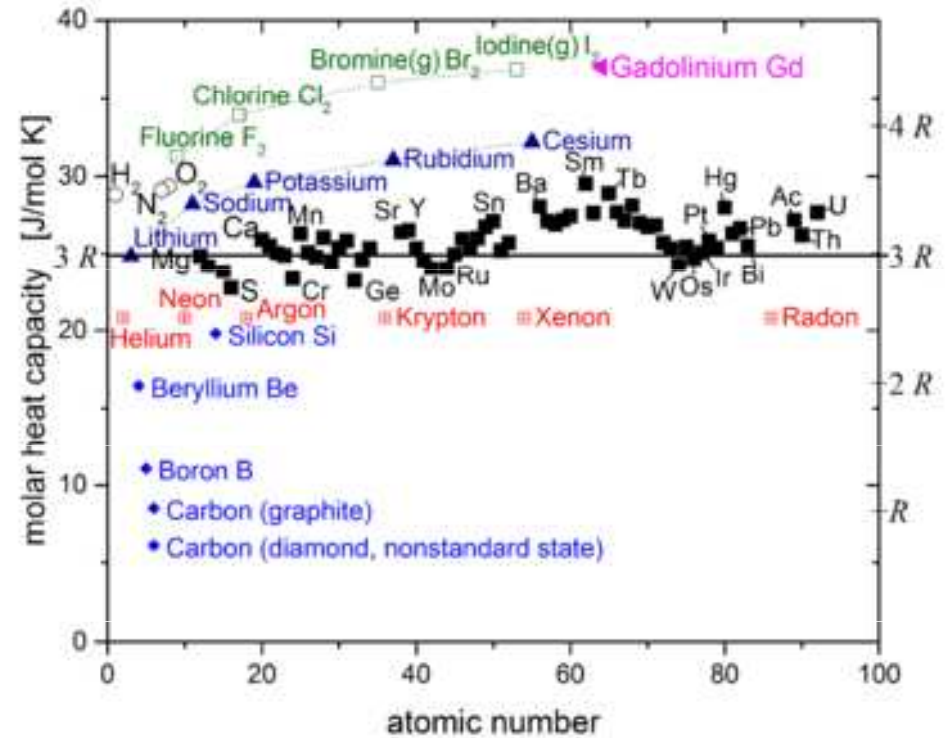
Sloučenina	$C_{mp}$ experiment	$C_{mp}$ vypočteno
$\text{CaCO}_3$	20.44	19.8
$\text{PbI}_2$	19.6	19.6
$\text{KNO}_3$	24.12	23.31
$\text{PbCO}_3$	21.6	20.2

# Tepelná kapacita krystalů

V krystalické mřížce nemohou částice vykonávat rotační ani translační pohyb, zůstávají pouze 3 stupně volnosti kmitavého pohybu ve směru 3 souřadnicových os (= prostorový oscilátor). Podle **ekvipartičního principu** by se molární tepelná kapacita pevných látek měla rovnat

$$C_{mp} = 3 R = 25 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}.$$

Tato hodnota je obvykle dosažena až za vysokých teplot.



Comparison of the Dulong-Petit law to experiment values for one mole of substance

	77 K (JK <sup>-1</sup> )	273 K (JK <sup>-1</sup> )
classical value	24.9	24.9
copper	12.5	24.3
aluminium	9.1	23.8
gold	19.1	25.2
lead	23.6	26.7
iron	8.1	24.8
sodium	20.4	27.6
silicon	5.8	21.8

## Tepelné kapacity krystalů – kvantová teorie

Při dostatečně nízkých teplotách vykazují prakticky všechny pevné prvky odchylky od Dulong – Petotova pravidla. Pravidlo je tedy speciálním případem obecnějšího zákona (limitní zákon pro vysoké teploty).

**Einsteinova teorie:** všechny prostorové oscilátory kmitají se stejnou frekvencí, charakteristickou pro daný prvek.

$$C_V = 3Nk \left( \frac{\varepsilon}{kT} \right)^2 \frac{e^{\varepsilon/kT}}{(e^{\varepsilon/kT} - 1)^2} \quad \varepsilon = h \cdot \nu$$

Einsteinův model predikuje dobře tepelné kapacity spíše pro vyšší teploty, limitně se blíží Dulong–Petitově pravidlu.

$$\lim_{T \rightarrow \infty} C_V = 3Nk$$

**Debyeova teorie:** prostorové oscilátory kmitají v oboru frekvencí od nuly do určité maximální hodnoty.

$$C_V = 9Nk \left[ \frac{T}{T_D} \right]^3 \int_0^{T_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad x = \frac{h\nu_s n}{2LkT} \quad x_{\max} = \frac{h\nu_s n_{\max}}{2LkT} = \frac{h\nu_s}{2kT} \left( \frac{6N}{\pi V} \right)^{1/3} = \frac{T_D}{T}$$

$T_D$  je Debyeova teplota (tabelována)

Pro výpočet teplotních závislostí tepelných kapacit prvků je nejvhodnější Debyeova funkce, Einsteinova funkce poskytuje nižší hodnoty, zejména v oblasti nízkých teplot. Nicméně Einsteinova teorie je vhodná pro výpočet vibračních příspěvků tepelných kapacit plynů a také u pevných látek při popisu závislosti  $C_{nv}$  na  $T$  u sloučenin.

Hodnoty Einsteinovy i Debyeovy funkce jsou tabelovány.

Pro úsek hodnot kolem absolutní nuly je podle Debyeovy teorie tepelná kapacita úměrná třetí mocnině teploty:

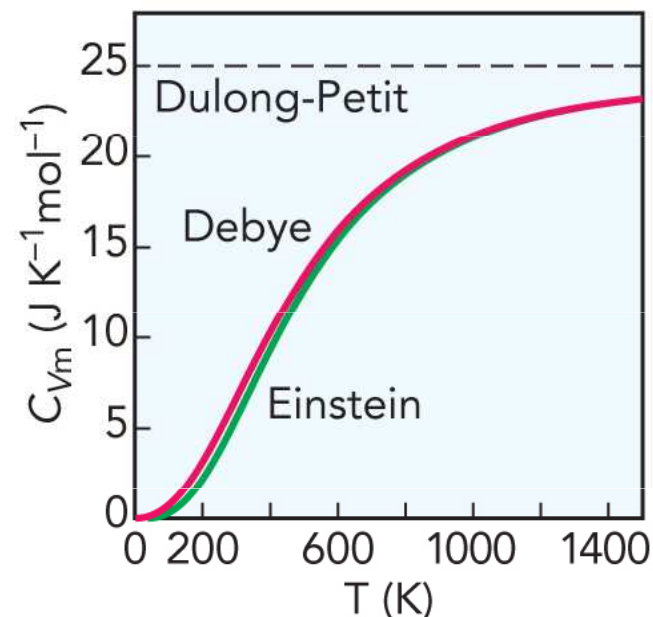
$$C_{mv} = a \cdot T^3$$

To odpovídá experimentálně potvrzenému **kubickému zákonu**.

### **Molární tepelné kapacity pevných sloučenin**

Pohyb  $n$ -atomové molekuly jako celku zahrnuje celkem  $3n$  lineárních oscilátorů, z toho 3 zahrnují oscilace molekuly jako celku a  $3(n-1)$  pohyb atomů v molekule.

Oscilace molekuly jako celku lépe popisuje Debyeova funkce, kmity atomů v molekule lépe popisuje funkce Einsteinova.



# Tepelná kapacita kapalin

Tepelná kapacita kapalin se zpravidla s teplotou mění jen málo. Tato závislost se rovněž vyjadřuje pomocí mnohočlenů s celistvými mocninami teploty.

**Joule - Koppovo** pravidlo platí i pro kapaliny, hodnoty atomových tepel jsou vyšší než pro pevné látky v důsledku vyššího počtu stupňů volnosti v kapalině:

prvek	C	H	B	N	O	F	Ostatní těžké prvky
Inkrement molární tepelné kapacity ( $J.K^{-1}.mol^{-1}$ )	3.0	5.0	4.8	4.5	6.0	7.0	8.0

Voda má větší měrnou tepelnou kapacitu ve skupenství kapalném než ve skupenství pevném nebo plynném.

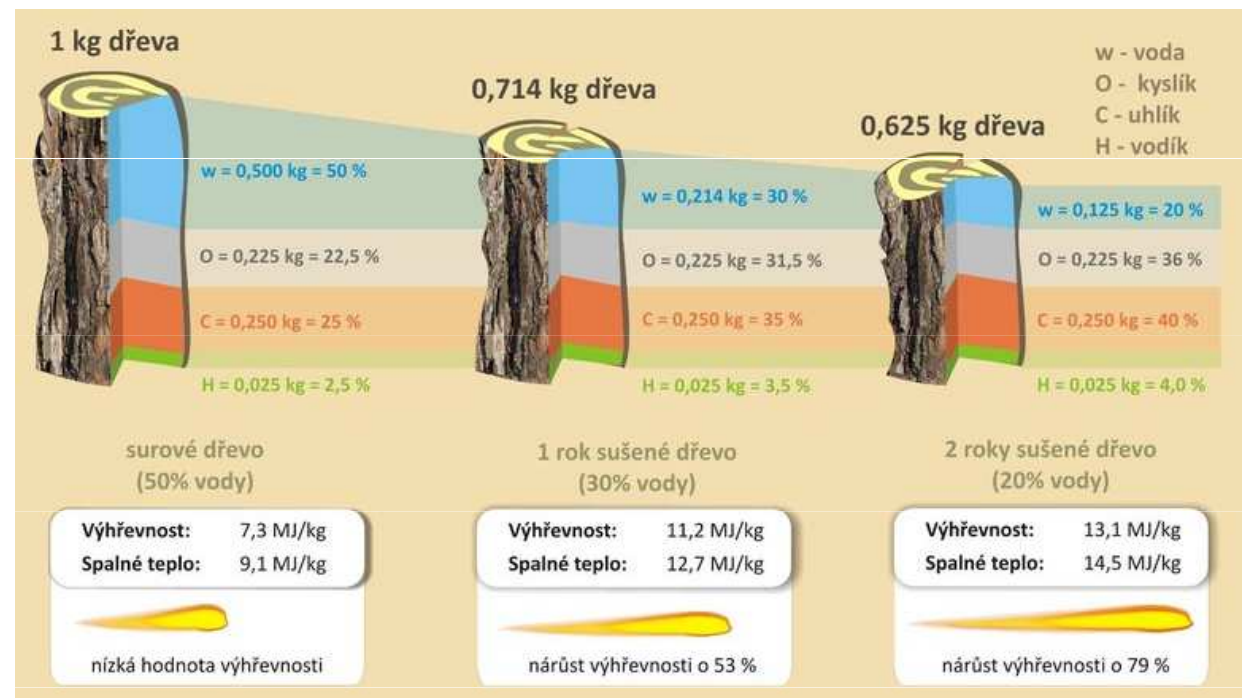
MATERIAL	SPECIFIC HEAT (Joules/gram • °C)
Liquid water	4.18
Solid water (ice)	2.11
Water vapor	2.00



# Spalné teplo a výhřevnost v energetice

**Spalné teplo** je takové množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství paliva (J/kg, resp. J/mol nebo J/m<sup>3</sup>). Předpokládá se, že voda, uvolněná spalováním, zkondenzuje a energii chemické reakce není třeba redukovat o její skupenské teplo. Tím se spalné teplo liší od výhřevnosti, kde se předpokládá na konci reakce voda v plynném skupenství. Proto je hodnota spalného tepla vždy větší nebo rovna hodnotě výhřevnosti. Rovnost nastává, když spalováním nevzniká voda.

**Výhřevnost** je vlastnost paliva, která udává, kolik energie se uvolní úplným spálením jedné jednotky (obvykle 1 kg). Proti spalnému teplu není v hodnotě zahrnuto měrné skupenské teplo páry, obsažené ve spalinách (předpokládá se, že její teplo je nevyužitelné a uniká v plynném stavu se spalinami).



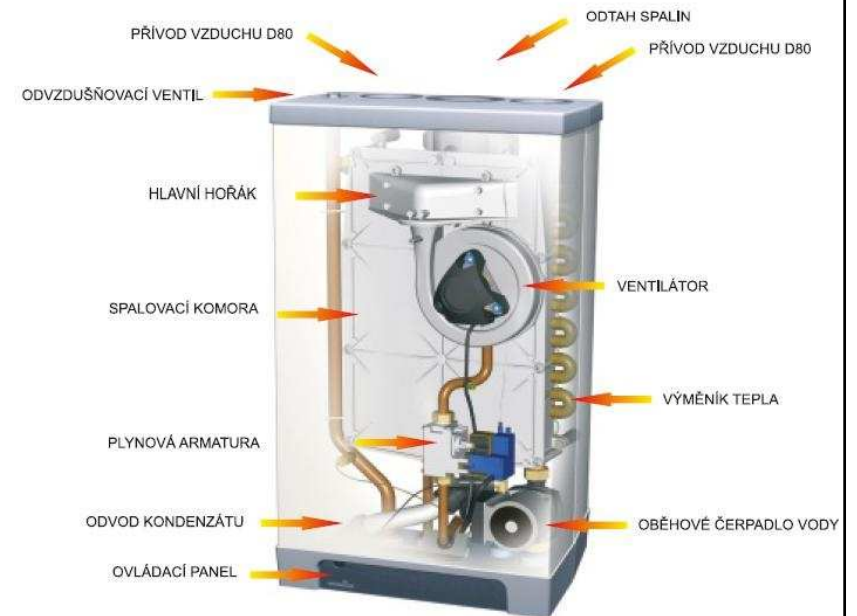
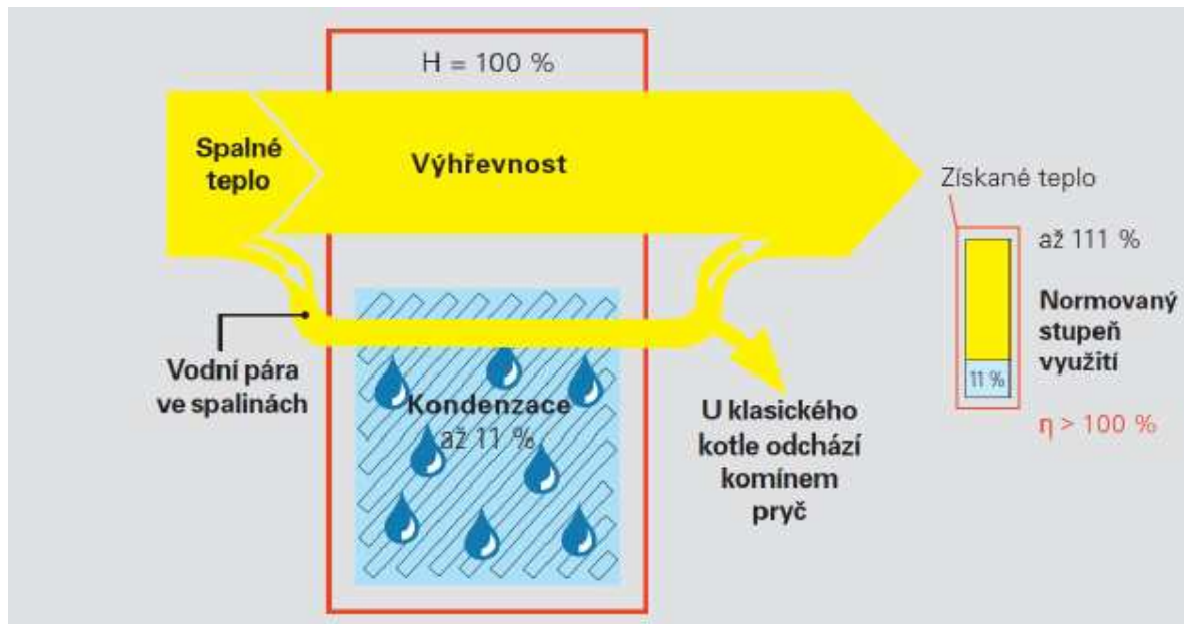
<b>Pevná paliva</b>	<b>Výhřevnost [MJ/kg]</b>
HU tříděné Sokolov	14,17
HU tříděné Most	17,18
ČU energetické Kladno	22,61
ČU energetické Ostrava	29,21
Koks otopový	27,49
Brikety	23,05
Dřevěné brikety	16,21
Dřevo palivové	14,62
Sláma obilná	15,50
Papír	14,11
Komunální odpad	9,12

<b>Kapalná paliva</b>	<b>Výhřevnost [MJ/kg]</b>
Těžký topný olej	40,61
Lehký topný olej	42,30
Motorová nafta	42,61
Autobenzín	43,59

<b>Plynná paliva</b>	<b>Výhřevnost [MJ/m<sup>3</sup>]</b>
Zemní plyn	33,48
Propan-Butan	46,40
Bioplyn	22,50
Koksárenský plyn	15,62
Svítiplyn	14,50

# Kondenzační kotel

Princip **kondenzačního kotle** spočívá v tom, že zužitkuje také teplo, které u běžné topné techniky zůstává bez užitku. Kondenzační kotel odebírá téměř dokonale teplo obsažené ve spalinách a přeměňuje ho dodatečně na topné teplo.



## Příklad

Určete hmotnost uhlí potřebného k zahřátí ocelového bloku o hmotnosti 10 000 kg z teploty 20 °C na kovací teplotu 1100 °C. Účinnost pece je 30%. Výhřevnost uhlí je 30 MJ/kg a měrná tepelná kapacita oceli 452 J/kg.

### Řešení:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = 10000 \cdot 452 \cdot (1100 - 20) = 4\,881,6 \text{ MJ}$$

$$E = Q / 0.3 = 16\,272 \text{ MJ}$$

$$m = E / 30 = 542,4 \text{ kg}$$

Na zahřátí ocelového bloku se spotřebuje 542,4 kg uhlí.

# Práce

Formy výměny energie, při nichž zpravidla dochází k silovému působení mezi systémem a okolím, nazýváme **prací**. V mechanice je definována jako energie potřebná na přemístění tělesa z jedné polohy do druhé po zvolené dráze.

Práce je způsob výměny energie při němž se působením síly posouvá nebo otáčí nějaký soubor částic určitým směrem.

Práce závisí v obecném případě nejen na počátečním a konečném stavu, ale též na cestě oba stavy spojující. Nemá tedy totální diferenciál, infinitezimální změna se značí symbolem  $\delta W$  (neúplný diferenciál). Práce předávaná systémem do okolí má zápornou hodnotu a práce přijatá z okolí do systému kladnou.

Podle interakce mezi soustavou a okolím rozeznáváme různé druhy práce:

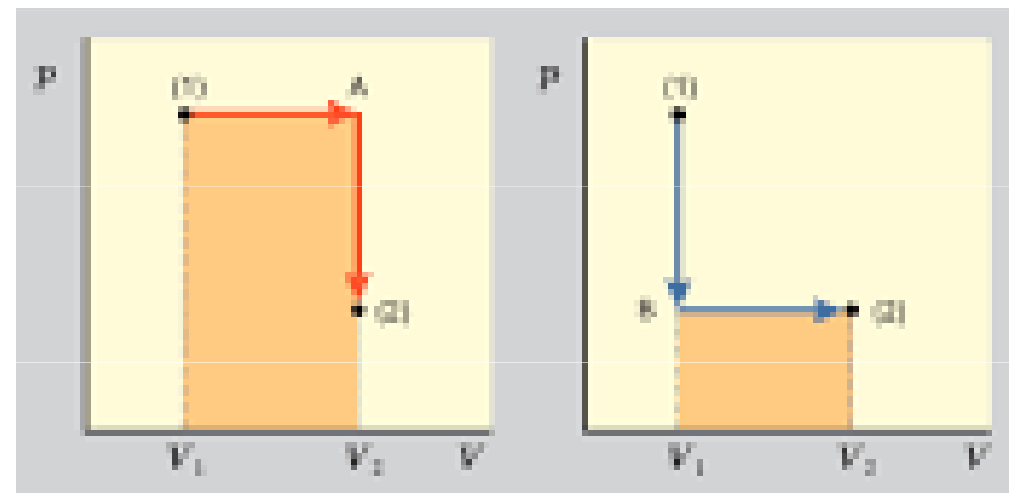
Mechanickou

Objemovou

Povrchovou

Elektrickou

Magnetickou





# Vnitřní energie

**Mechanická (vnější energie)** = zahrnuje kinetickou energii soustavy jako celku (např. se soustava pohybuje vůči okolí) a potenciální energii soustavy v různých vnějších polích (např. gravitačním). Do hodnoty vnitřní energie tedy *není zahrnuta* kinetická a potenciální energie systému jako celku, který se pohybuje v určitém prostoru.

**Vnitřní energie** = extenzivní stavová veličina charakterizující celkový obsah energie soustavy za definovaných podmínek. Je sumou všech energií uvnitř soustavy: kinetické energie tepelného pohybu částic (atomů a molekul), potenciální energie jejich vzájemné polohy a energie excitace a záření uvnitř systému.

$$dU = \delta Q + \delta W$$

$\delta Q$  a  $\delta W$  nejsou totální diferenciály, symbol  $\delta$  pouze infinitezimální změnu (neúplný diferenciál). Po integraci

$$U = Q + W$$

Celkovou hodnotu vnitřní energie  $U$  nedokážeme určit, sledovat lze pouze její změny (přírůstek nebo úbytek) na základě I. věty termodynamiky. Změna vnitřní energie izolovaného systému je nulová.

Vnitřní energie reálné látky závisí na teplotě, tlaku a velikosti soustavy (extenzivní veličina).

## Příklad

Kočka lezoucí na strom zvyšuje díky práci svalů svoji potenciální energii danou tíhovým polem Země, a při skoku na zem zvyšuje svoji energii kinetickou a její potenciální energie klesá. Oba tyto druhy energie tvoří **mechnickou energii**.

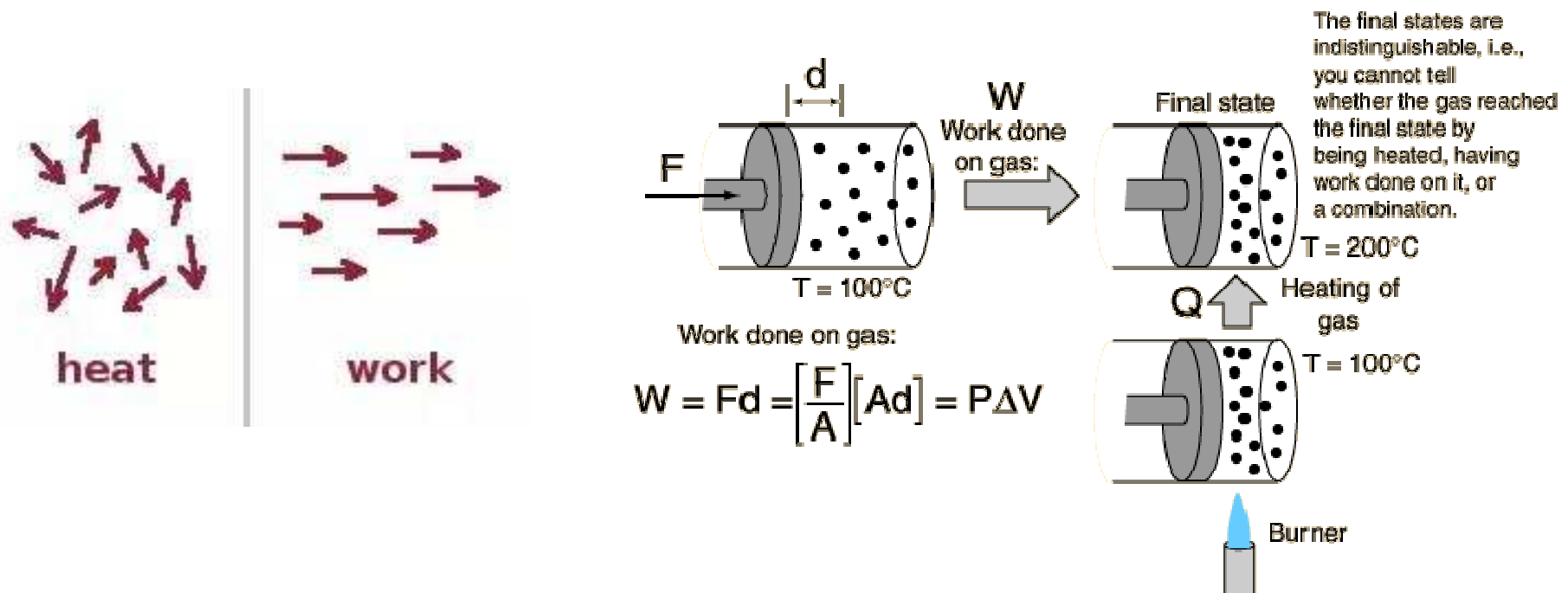
Kočka ale také může být najezená či vyhladovělá, může jí být zima nebo teplo a tyto vlastnosti stejně jako přeměna energie ve svalovou práci souvisí s **energií vnitřní**.



Při změně stavu soustavy se mění i její **vnitřní energie**, která se může zvětšit dodáním energie zvenčí (z okolí) nebo zmenšit předáním energie okolí (formou tepla nebo práce).

Změna vnitřní energie pro danou změnu stavu je vždy stejná bez ohledu na cestu (způsob) tohoto přechodu (závisí jen na počátečním a konečném stavu, její diferenciál je totálním diferenciálem).

Na rozdíl od vnitřní energie teplo ani práce nejsou stavové veličiny (nejsou funkcí stavu, jsou funkcí cesty termodynamického procesu, jejich diferenciál není totálním diferenciálem).



Práce a teplo jsou dvě různé formy přenosu energie mezi systémem a okolím.

# I. věta termodynamiky a zákon zachování energie

## Zákon zachování energie:

Množství energie v izolované soustavě je konstantní.

Celková energie izolované soustavy zůstává při všech dějích konstantní.

**První věta termodynamická** je rozšířením zákona zachování energie na disipativní systémy, tj. systémy vyměňující s okolím teplo. Jestliže např. systém převzal z okolí teplo  $Q$  ( $Q > 0$ ), pak dle povahy děje přeměnil tuto energii buď jen na vzrůst vnitřní energie systému, nebo jenom na práci ( $W < 0$ ) nebo v určitém poměru na obě.

Existuje stavová funkce zvaná vnitřní energie  $U$ , pro jejíž totální diferenciál  $dU$  platí

$$dU = đQ + đW$$

po integraci

$$\Delta U = Q + W$$

*Změna vnitřní energie soustavy se rovná součtu tepla a práce, které se vymění mezi soustavou a okolím.*

# Izochorické ohřívání a ochlazování látky

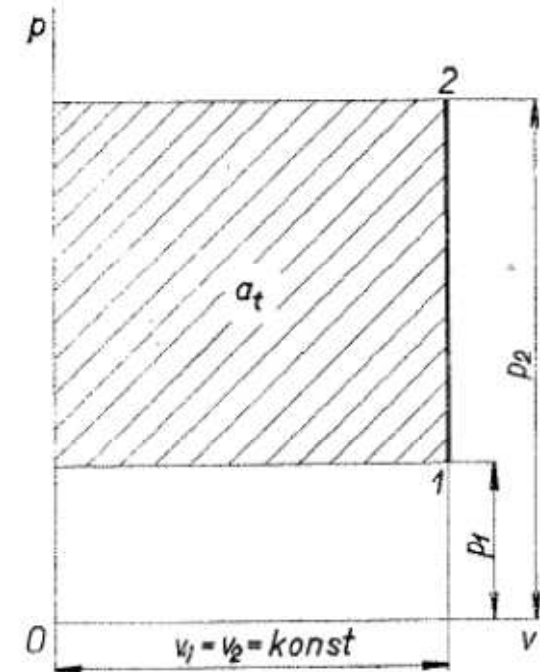
**Izochorický děj** probíhá za konstantního objemu soustavy. S okolím se tudíž nevyměňuje žádná energie ve formě objemová práce.

$$\Delta U = Q + W = Q - p \cdot \Delta V$$

$$\Delta V = 0$$

$$W = 0$$

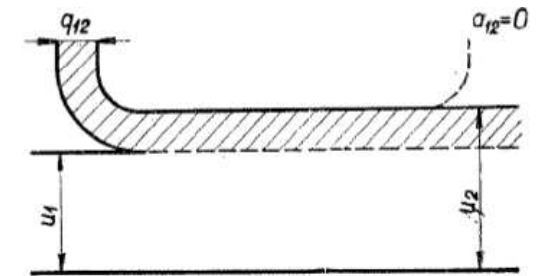
$$\Delta U = Q$$



Obr. 16. Izochorická změna v  $p-v$  diagramu

Teplo vyměněné mezi soustavou a okolím je rovno změně vnitřní energie soustavy.

Veškeré teplo dodané soustavě za konstantního objemu je využito k jejímu ohřevu.



Obr. 17. Energetická bilance izochorické změny



# Izobarické ohřívání a ochlazování látky

Při izobarickém ději je konstantní tlak. Objemová práce ideálního plynu:

$$\Delta U = Q + W$$

$$W = -p \cdot \Delta V$$

$$\Delta U = Q - p \cdot \Delta V$$

odtud

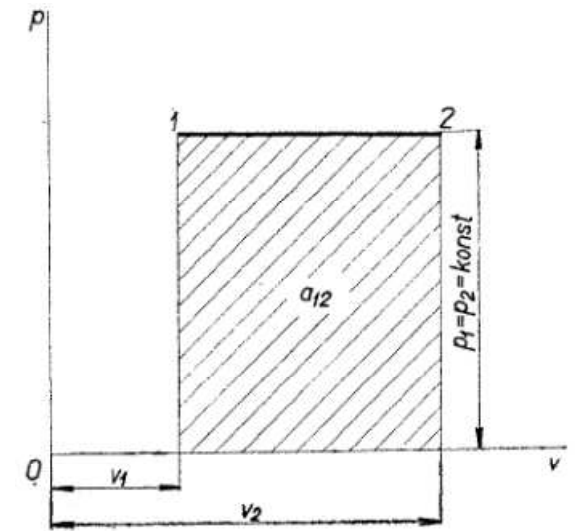
$$U_2 - U_1 = Q - p \cdot (V_2 - V_1)$$

$$(U_2 + p \cdot V_2) - (U_1 + p \cdot V_1) = Q$$

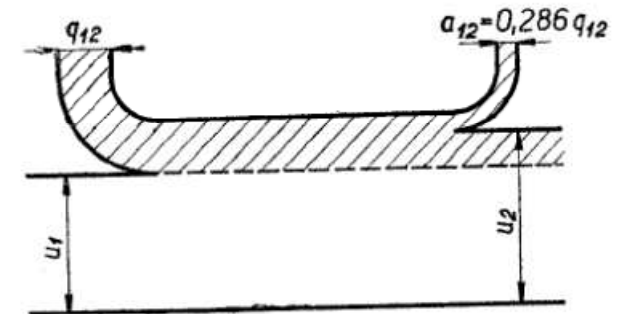
$$\Delta H = H_2 - H_1 = Q$$

$$\Delta H = \Delta U + p \cdot \Delta V$$

Teplo pohlcené při izobarickém ději se rovná zvýšení **enthalpie**.

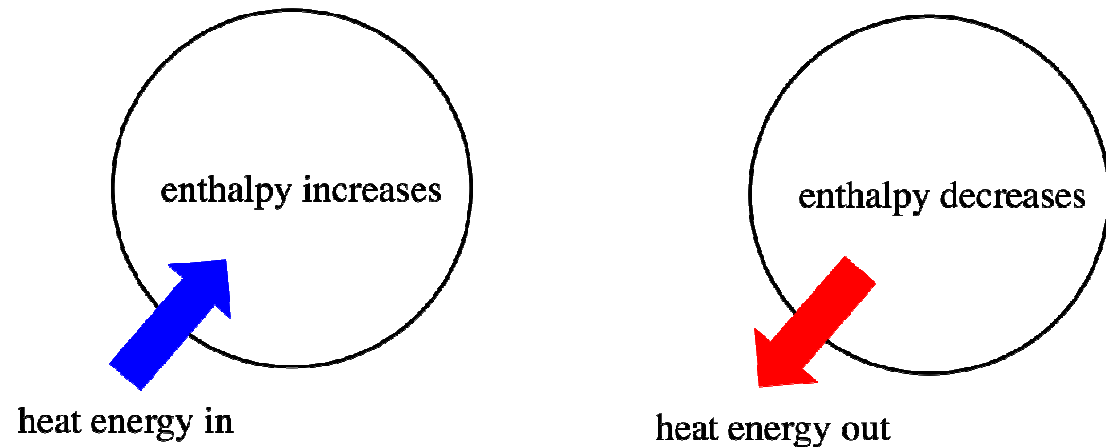


Obr. 18. Izobarická změna v  $p-v$  diagramu



Obr. 19. Energetická bilance izobarické změny

## Enthalpie



Enthalpie (izobarické teplo) je definováno

$$H = U + P \cdot V$$

je extenzivní stavová veličina, jejíž absolutní hodnotu nelze určit (podobně jako u vnitřní energie), sledovat lze pouze její změny (přírůstek nebo úbytek). Protože při izobarickém ději jsou  $U$  i  $P$  stavové veličiny, je stavovou veličinou i  $H$ . Její změna nezávisí na cestě a její diferenciál je **totálním diferenciálem**.

Diferenciální tvar rovnice pro změnu vnitřní energie při izobarickém ději je

$$dU = dH - p \cdot dV$$

$$\Delta U = \Delta H - p \cdot \Delta V$$

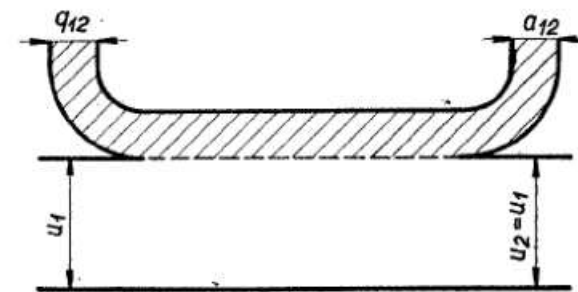
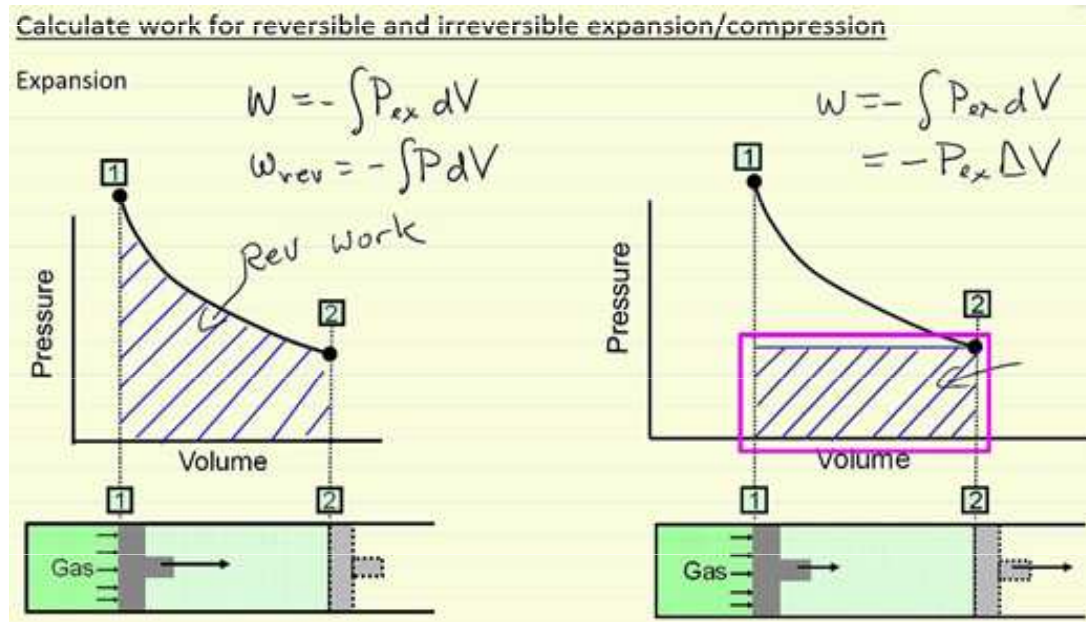
# Izotermická komprese a expanze plynu

Izotermický děj probíhá při konstantní teplotě. Pro ideální plyn je vnitřní energie soustavy určena jen pohybovou energií molekul (ekvipartiční teorém), která je dána výlučně teplotou, nikoliv tlakem. Proto je změna vnitřní energie při izotermickém ději s ideálním plynem nulová.

$$\Delta U = Q + W = 0$$

$$Q = -W$$

Vykonaná práce se rovná teplotu přijatému soustavou. Přijatá práce se rovná teplotu odevzdanému soustavou.



Obr. 21. Energetická bilance izotermické změny

# Adiabatická (isoentropická) expanze a komprese plynu

Adiabatický děj probíhá v tepelně izolovaných soustavách. Energie se vyměňuje s okolím jen formou práce.

$$Q = 0$$

$$\Delta U = W$$

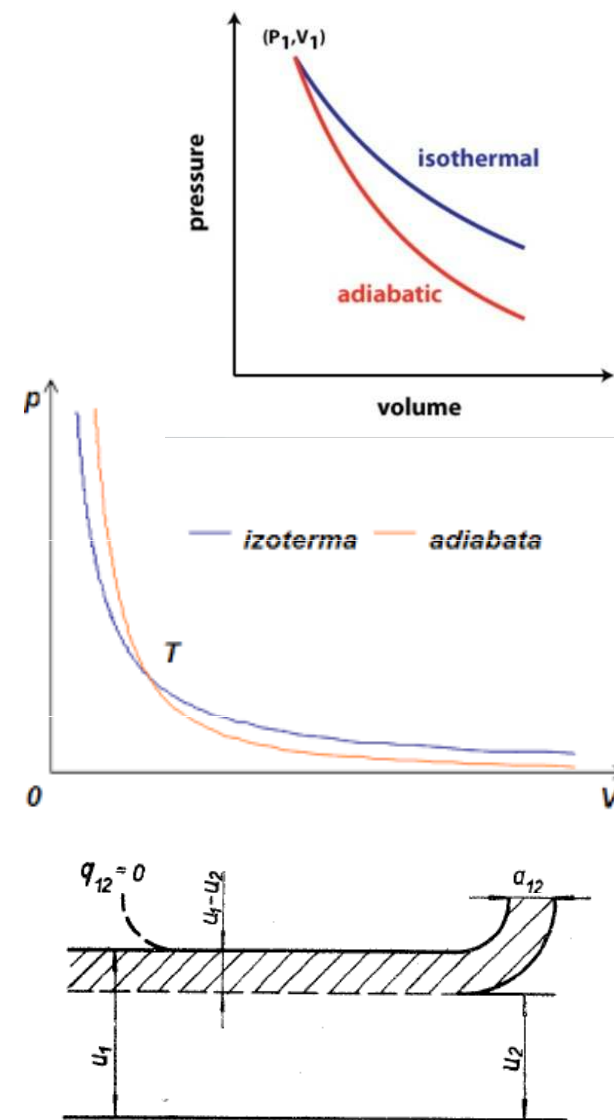
Pro výpočet konečného stavu plynu, kterou zpravidla neznáme, je u **vratného** adiabatického děje

$$p_1 V_1^\kappa = p_2 V_2^\kappa$$

$\kappa = c_p/c_v$  je poměr molárních tepelných kapacit pro daný plyn (Poissonova konstanta).

U **nevratného** adiabatického děje neplatí Poissonovy rovnice. Výpočty vychází z kalorimetrické rovnice

Při adiabatickém ději se nemění stavová veličina **entropie** = isoentropický děj.

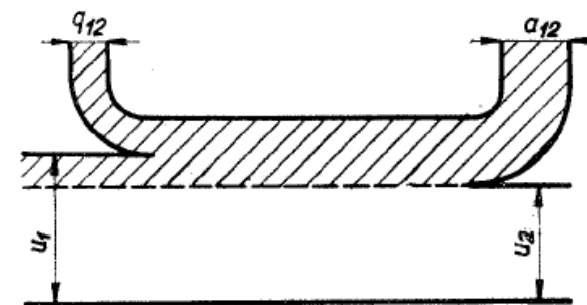
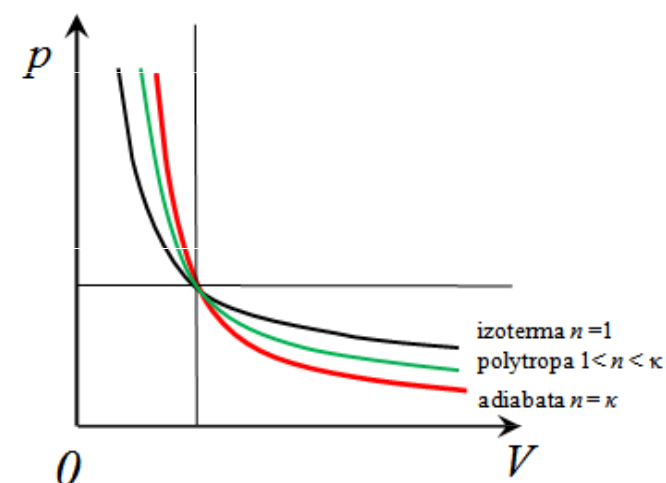
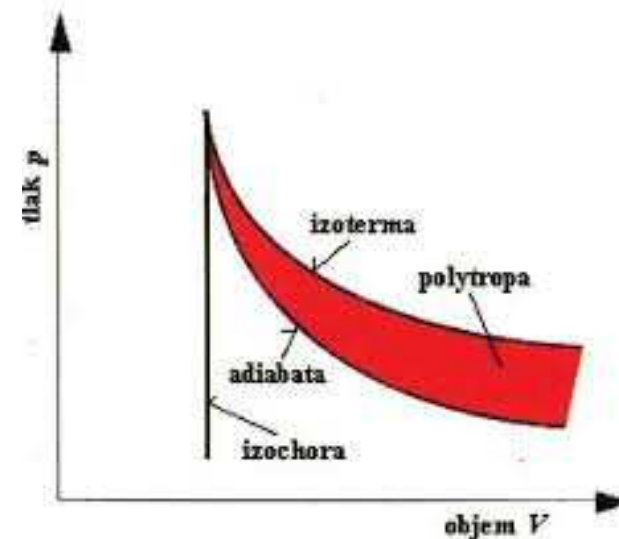


Obr. 25. Energetická bilance adiabatické změny

# Polytropická expanze a komprese plynu

**Polytropický děj** je termodynamický proces, který více odpovídá reálným dějům, než klasické jednoduché procesy jako např. děj izotermický nebo adiabatický. Lze jej definovat tak, že **tepelná kapacita** (uzavřené) soustavy je při něm konstantní. Při polytropickém ději se obecně mění všechny stavové veličiny (odtud název).

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad n = \text{konst}$$



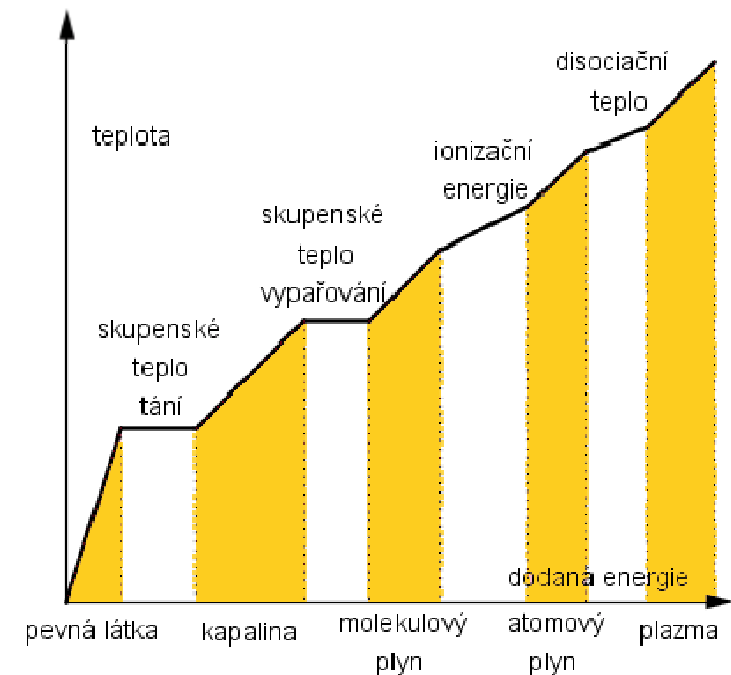
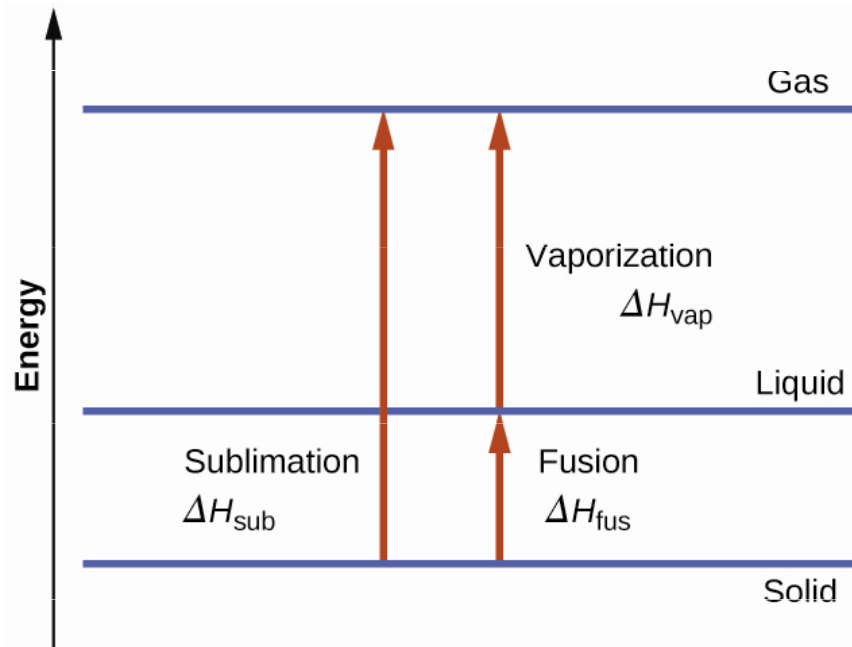
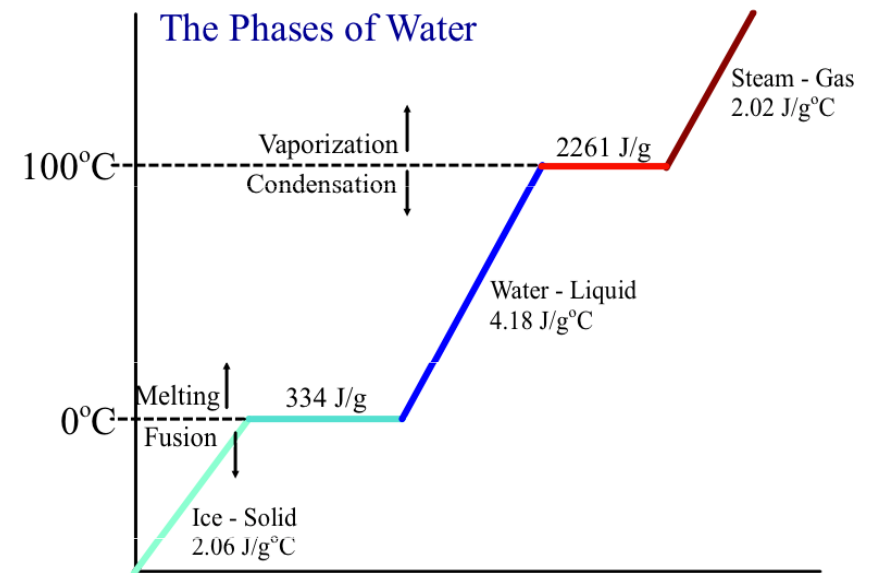
Obr. 26. Energetická bilance polytropické změny

Process	Equations			
	Internal energy $\Delta U$	Work ( $\dot{W}$ )	Heat ( $\dot{Q}$ )	Equation of state ( $PV = mRT$ )
<b>Isothermal Process</b> $T = C$	Zero	$P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$	W	$P_1 V_1 = P_2 V_2$
<b>Isochoric Process</b> $V = C$	$\Delta U$	Zero	$\Delta U$	$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$
<b>Adiabatic Process</b> $PV^\gamma = C$ $S = C$	-W	$\frac{(P_1 V_1 - P_2 V_2)}{\gamma - 1}$ $\frac{(P_2 V_2 - P_1 V_1)}{1 - \gamma}$	Zero	$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$
<b>Isobaric Process</b> $P = C$	$\Delta U$	$P(V_2 - V_1)$ $R(T_2 - T_1)$	$\Delta H$	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$
<b>Polytropic process</b> $PV^n = C$	$\Delta U$	$\frac{(P_1 V_1 - P_2 V_2)}{n - 1}$ $\frac{R(T_1 - T_2)}{n - 1}$	$W + \Delta U$ $\left(\frac{\gamma - n}{\gamma - 1}\right) \frac{R}{1 - n} (T_2 - T_1)$	$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}$



# Termodynamika fázových přeměn – molární tepla

**Fázový přechod** je fyzikální pojem, označující skokovou změnu makroskopických vlastností termodynamického systému (fáze) při změně nějaké termodynamické proměnné (např. teploty).



## Příklad

Jakou rychlostí se musí pohybovat olověný projektil o hmotnosti 1 g vystřelený proti stěně, aby při nárazu na stěnu roztál? Teplota tání olova je 327 °C, enthalpie tání olova je 25 J.g<sup>-1</sup>, měrná tepelná kapacita za normálního tlaku je 0,12 J.K<sup>-1</sup>.g<sup>-1</sup>, teplota projektilu je 20 °C. Zahřátí stěny lze zanedbat.

$$T_1 = 20 \text{ °C}$$

$$T_2 = 327 \text{ °C}$$

$$\Delta H_t = 25 \text{ J.g}^{-1}$$

$$c_p = 0,12 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$$

$$v = ?$$

Kinetická energie projektilu

$$E_k = \frac{1}{2}.m.v^2$$

Teplo nezbytné k zahřátí projektilu

$$\Delta H = m.c_p.\Delta T + \Delta H_t = 61,84 \text{ J}$$

$$E_k = \Delta H$$

$$\frac{1}{2}.m.v^2 = m.c_p.\Delta T + \Delta H_t$$

$$v = \underline{351,7 \text{ m.s}^{-1}}$$

Kulka by se musela pohybovat nadzvukovou rychlostí.

**Příklad:** Hliníkový žebřík o hmotnosti 10 kg se vlivem vysoké teploty při požáru zahřeje z teploty 25 °C na 700 °C. Kolik tepla se spotřebuje na zahřátí?

Teplota tání hliníku je 639 °C. Žebřík se roztaví (fázový přechod s → l).

$$\Delta H_{\text{tání}} = 10480 \text{ J/mol.}$$

$$C_{p(s)} = 20.68 + 12.39 \cdot 10^{-3} T \text{ J/mol}$$

$$C_{p(l)} = 29.3 \text{ J/mol}$$

$$Ar_{\text{Al}} = 26.98$$

$$T_1 = 25 + 273 = 298 \text{ K}$$

$$T_{\text{tání}} = 639 + 273 = 912 \text{ K}$$

$$T_2 = 700 + 273 = 973 \text{ K}$$

$$\Delta H = C_{p(s)} \cdot (T_{\text{tání}} - T_1) + \Delta H_{\text{tání}} + C_{p(l)} \cdot (T_2 - T_{\text{tání}})$$

$$\Delta H = 20.68 \cdot (912 - 298) + 12.39 \cdot 10^{-3} (912 - 298)^2 + 10480 + 26.98 \cdot (973 - 912) = 34170 \text{ J/mol.}$$

$$Q = 10 \cdot 34170 / 26.98 = \underline{12665 \text{ kJ}}$$

# Výpočet výparného tepla kapalin

## Trouton's Rule

$$\frac{\Delta_{vap} H_m}{T} = \Delta_{vap} S_m \approx 88 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

### Troutonovo – Pictetovo pravidlo

Hodnota entropie vypařování je pro většinu kapalin v rozmezí 85-88 J/mol.K.

$T_b$  = bod varu kapaliny

$$\Delta S_{vap} = \frac{\Delta H_{vap}}{T_b}$$

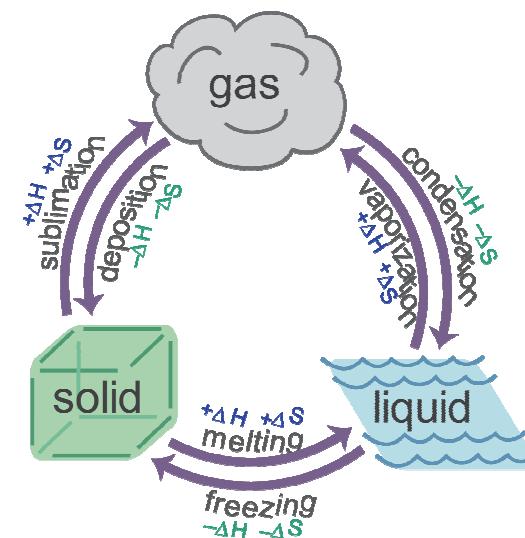
### Clausius – Clapeyronova rovnice

Clausius – Clapeyronova rovnice v diferenciálním tvaru a rovnice pro tenzi par (**Antoineova** nebo **Calingaertova - Davisova**).

$$\Delta H_{výp} = R \cdot T_v^2 \cdot \ln(10) \cdot B / (t + C)^2$$

TABLE 5.1 Enthalpies and Entropies of Vaporization and Fusion

Substance	Liquid $\rightleftharpoons$ Vapor			Solid $\rightleftharpoons$ Liquid		
	$T_b$ K	$\Delta_{vap} H_m$ kJ mol <sup>-1</sup>	$\Delta_{vap} S_m$ J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>	$T_m$ K	$\Delta_{fus} H_m$ kJ mol <sup>-1</sup>	$\Delta_{fus} S_m$ J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
He	4.20	0.084	19.66	3.45	0.021	6.28
H <sub>2</sub>	20.38	0.904	44.35	13.95	0.117	8.37
N <sub>2</sub>	77.33	1.777	72.13	63.14	0.720	11.38
O <sub>2</sub>	90.18	6.820	75.60	54.39	0.444	8.16
H <sub>2</sub> O	373.15	40.656	108.951	273.15	6.009	22.096
SO <sub>2</sub>	263.13	24.916	94.68	197.48	7.401	37.45
CH <sub>4</sub>	111.16	8.180	73.26	190.67	.941	10.38
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	184.52	14.715	79.75	89.88	2.858	31.80
CH <sub>3</sub> OH	337.85	35.27	104.39	175.25	3.167	18.07
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	351.65	38.58	109.70	158.55	5.021	31.67
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	272.65	22.40	82.13	134.80	4.661	34.572
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	353.25	30.76	87.07	278.68	10.590	35.296
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>						
(toluene)	383.77	33.48	87.19			
CH <sub>3</sub> COOH	391.45	24.35	61.92	289.76	11.72	40.42



## Příklad: *Stabilita alotropických modifikací*

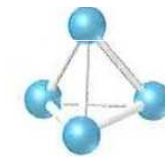
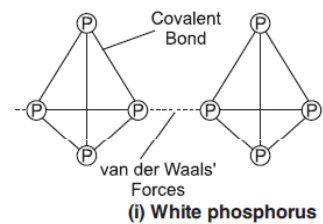
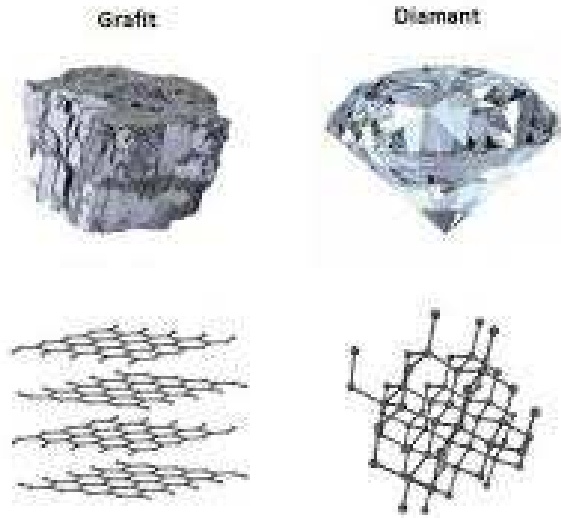
Stálé modifikaci je za standardních podmínek přiřazena nulová entalpie.

C (diamant)  $\rightarrow$  C (grafit)

$$\Delta H_{298} = -1883 \text{ kJ/mol}$$

P (bílý)  $\rightarrow$  P (červený)

$$\Delta H_{298} = -17,57 \text{ kJ/mol}$$



White phosphorus



Red phosphorus



Přeměna diamantu na grafit může probíhat (termodynamická nestálost), je však neměřitelně pomalá (kinetická stálost).

# Objemová práce

**Objemová práce** = mechanická práce při níž se mění objem soustavy. Zmenšování objemu soustavy je **kompresa** (práci koná okolí), zvětšování objemu soustavy je **expanze** (práci koná soustava).

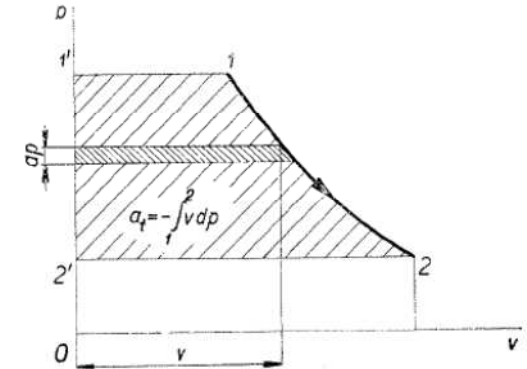
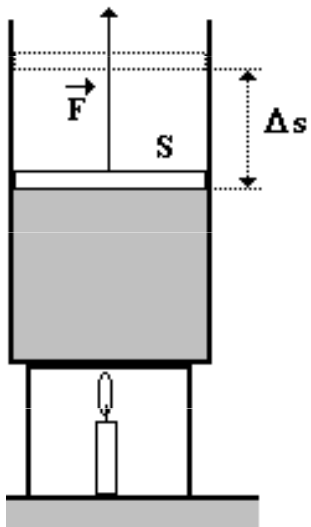
Objemová práce konaná soustavou při izobarickém ději je

$$W = -F \cdot \Delta s = -P \cdot S \cdot \Delta s = -p \cdot \Delta V$$

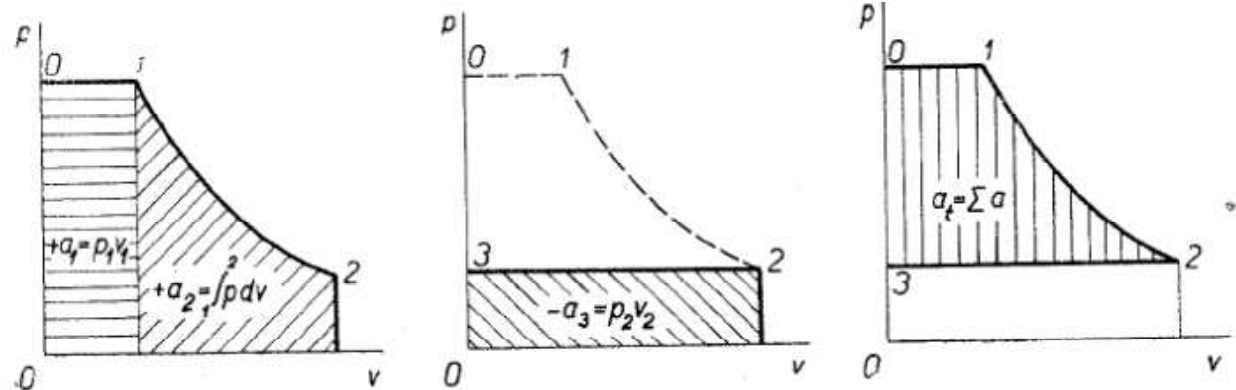
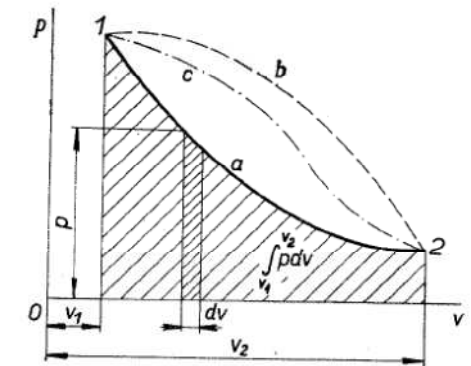
(záporné znaménko definitivně znamená, že práci koná soustava, nezávisle na tom zda jde o kompresi nebo expanzi)

Absolutní práce

Technická práce



Obr. 11. Technická práce



Obr. 12. Souvislost technické a absolutní práce



# Tepelný stroj

Tepelný stroj je stroj, který pracuje na základě prvního termodynamického zákona, podle něhož je možné vzájemně přeměnit teplo na vnitřní energii anebo práci. Tepelný stroj musí zároveň respektovat druhý termodynamický zákon, podle kterého není možné vykonávat přeměnu energií úplně.

**tepelné motory:** teplo dodávané ze zásobníku s vyšší teplotou se přeměňuje na práci při vzniku zůstatkového tepla, které je potřeba dovést do zásobníku s nižší teplotou. Pracovní cyklus takového stroje v p-V diagramu probíhá ve směru hodinových ručiček.

**chladičí stroje** nebo **tepelná čerpadla:** přivedená mechanická práce se spotřebovává na přenos tepla ze zásobníku s nižší teplotou do zásobníku s vyšší teplotou. Pracovní cyklus takového stroje v p-V diagramu probíhá proti směru hodinových ručiček.

Účinnost tepelného stroje ve výkon stroje dělený jeho příkonem:

$$\eta \leq \eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

**Cyklus tepelného stroje:** stroj odebere teplo teplejšímu zásobníku. Část tohoto tepla se přemění na práci, zbytek se předá chladnějšímu zásobníku.

Tepelný motor	$\eta_{\max}$	$\eta$
parní stroj lokomotivy	0,35	0,09 - 0,15
parní turbína	0,60	0,25 - 0,35
plynová turbína	0,55	0,22 - 0,37
čtyřdobý zážehový motor	0,65	0,20 - 0,33
vznětový motor	0,73	0,30 - 0,42
raketový motor	0,75	0,50



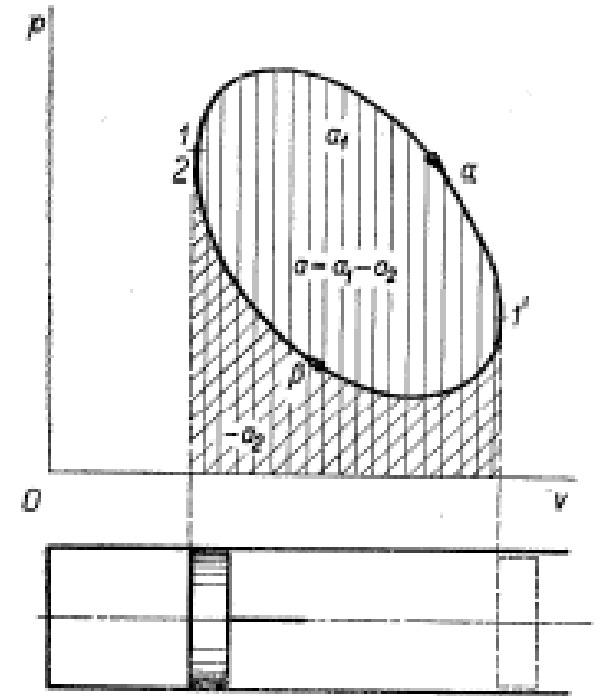
# I. věta termodynamiky a kruhový děj

**Kruhovým (cyklickým) dějem** nazýváme takový děj, při kterém je konečný stav systému totožný s výchozím. Změny **stavových veličin** jsou při kruhovém ději nulové. **Teplo** a **práce** nejsou stavovými veličinami a proto nejsou při kruhovém ději nulové.

Formulace I. věty termodynamické:

*Nelze realizovat uzavřenou a izolovanou soustavu jejíž energie by vlivem nějakého děje probíhajícího uvnitř soustavy rostla, tj. nelze vyrobit perpetuum mobile prvního druhu.*

Z I. věty termodynamické plyne nemožnost konstrukce perpetua mobile prvního druhu, tj. cyklicky pracujícího stroje, kde by vykonaná práce byla větší než přijaté teplo. Pro cyklický děj platí  $U = 0$  (počáteční a koncový stav je stejný), a tedy  $Q + W = 0$  (cyklický děj)



Obr. 29. Kruhový proces v  $p-v$  diagramu

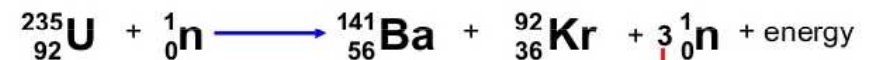
# Příklad

Nechť je naším systémem kostka ledu o hmotnosti 1 g a výchozím stavem teplota  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tlak 100 kPa. V systému proběhl sled dějů: kostka byla ohřáta na teplotu  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při které roztála. Kapalná voda byla při této teplotě elektrolyzována. Vzniklá směs vodíku a kyslíku byla expandována na tlak 200 Pa a zapálena. Vodní pára vzniklá reakcí měla po skončení reakce teplotu  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Byla ochlazena na teplotu  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a stlačena na 100 kPa. V průběhu stlačování došlo k desublimaci (sněžení) a systém se vrátil do původního termodynamického stavu. Proběhl kruhový děj.

Formulace I. věty termodynamiky předpokládá konstantní hmotnost systému – z tohoto důvodu do takto formulovaného principu nezapadají **jaderné reakce**.



## NUCLEAR FISSION EQUATION



$$\begin{aligned}\text{Mass defect} &= \text{mass before} - \text{mass after} \\ &= [235.04 + 1.01] - [140.91 + 91.93 + 3(1.01)] \\ &= 0.18 \text{ a.m.u} \\ &= 0.18 \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 2.988 \times 10^{-28} \text{ kg}\end{aligned}$$

$$E = mc^2$$

$$\begin{aligned}&= 2.988 \times 10^{-28} \times (3.0 \times 10^8)^2 \\ &= 2.69 \times 10^{-11} \text{ J} \\ &= 1.68 \times 10^8 \text{ eV}\end{aligned}$$

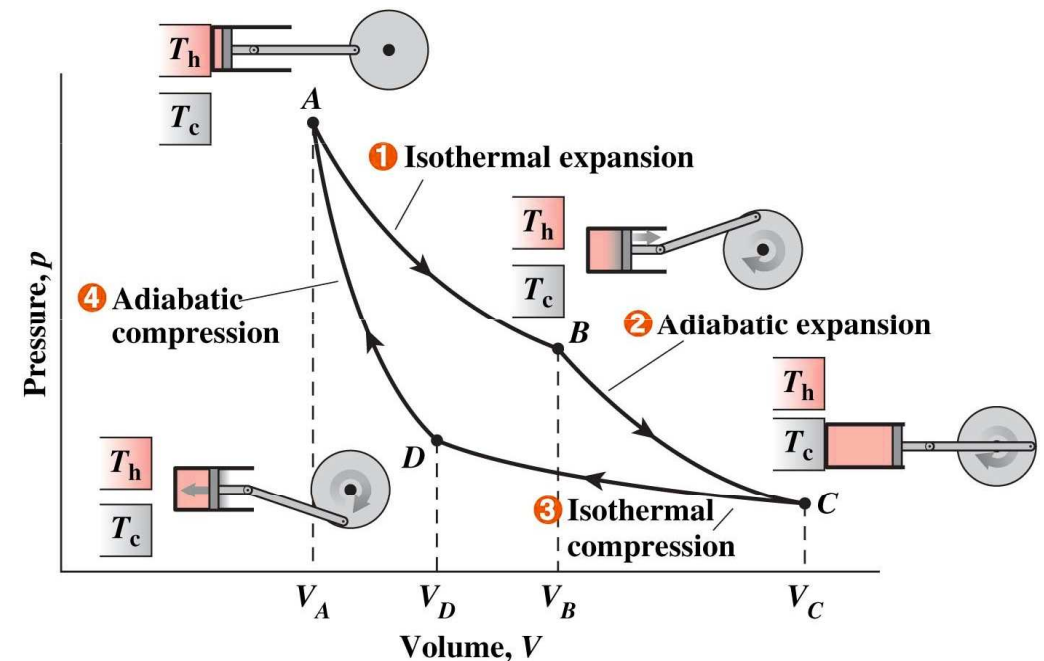
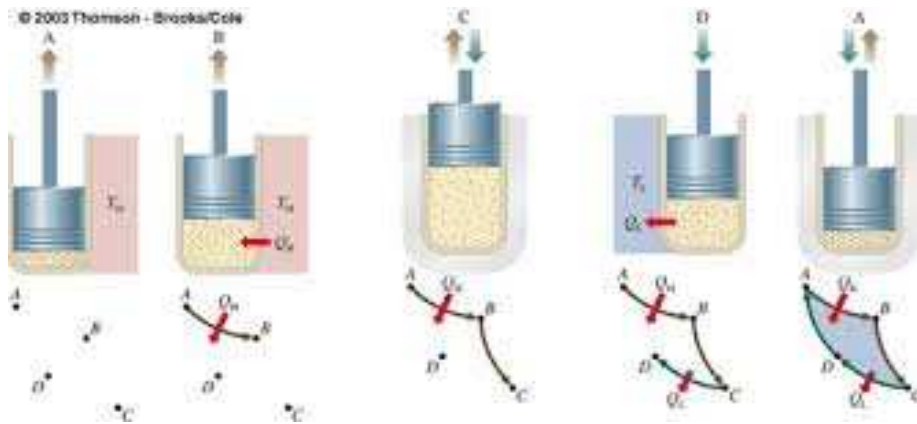
# Carnotův cyklus

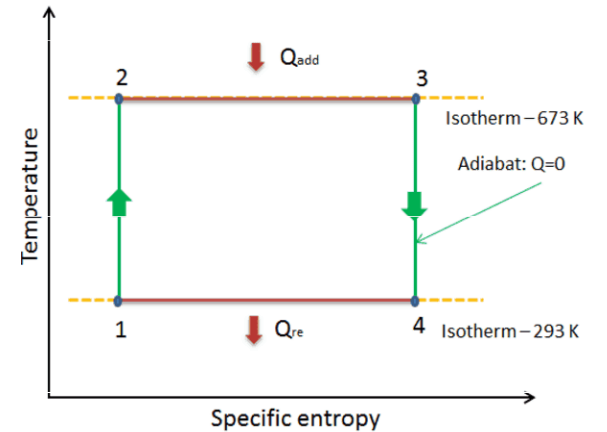
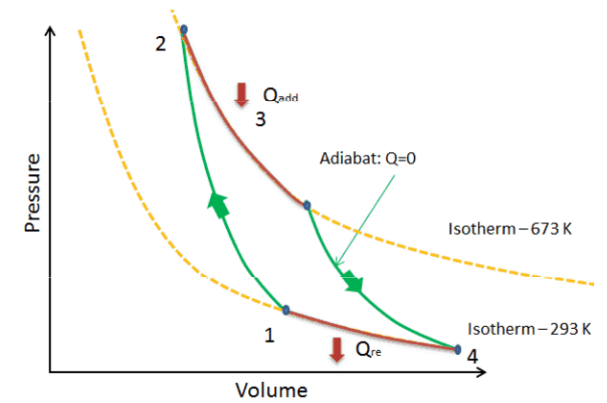
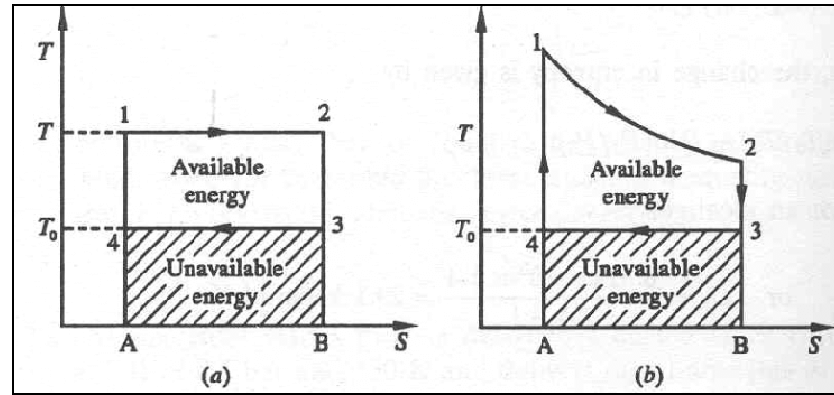
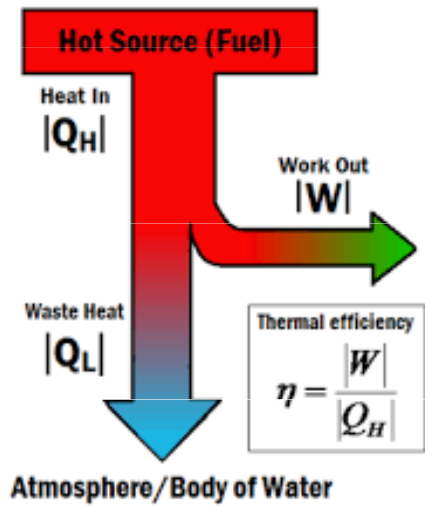
**Carnotův stroj** je hypotetické zařízení odebírající teplo z teplejšího zásobníku o teplotě  $T_h$ , konající práci a odevzdávající teplo chladnějšímu zásobníku o teplotě  $T_c < T_h$ . Předpokládá se, že zásobníky mají tak velkou kapacitu, že se jejich teploty při odebírání a dodávání tepla nemění. Náplň stroje je ideální plyn, jehož izochorická tepelná kapacita nezávisí na teplotě.

V Carnotově stroji probíhá cyklický děj, jenž je tvořen čtyřmi dílčími vratnými ději:

- 1 - 2: izotermická vratná expanze,
- 2 - 3: adiabatická vratná expanze,
- 3 - 4: izotermická vratná komprese,
- 4 - 1: adiabatická vratná komprese.

Velikost práce v Carnotově cyklu odpovídá velikosti uzavřené plochy v P-V diagramu.





## Účinnost Carnotova stroje

$$\eta = \frac{-W}{Q_2} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

**Carnotův teorém (věta):** *největší možná účinnost tepelného stroje nezávisí na jeho náplni ale jen na teplotách tepelných zásobníků.*

Účinnost tepelného stroje lze zvyšovat rozdílem teplot obou zásobníků. 100% účinnost lze dosáhnout pokud by chladnější lázeň měla teplotu absolutní nuly.

## Příklad

Jaká musí být teplota kotle, aby při teplotě okolí 293 K byla účinnost vratného tepelného stroje 0,5?

$$\eta = 0,5$$

$$T_1 = 293 \text{ K}$$

$$T_2 = ?$$

$$\eta = 1 - T_1/T_2$$

$$0,5 = 1 - 293/T_2$$

$$T_2 = 568 \text{ K} = \underline{295 \text{ }^\circ\text{C}}$$



## II. věta termodynamiky

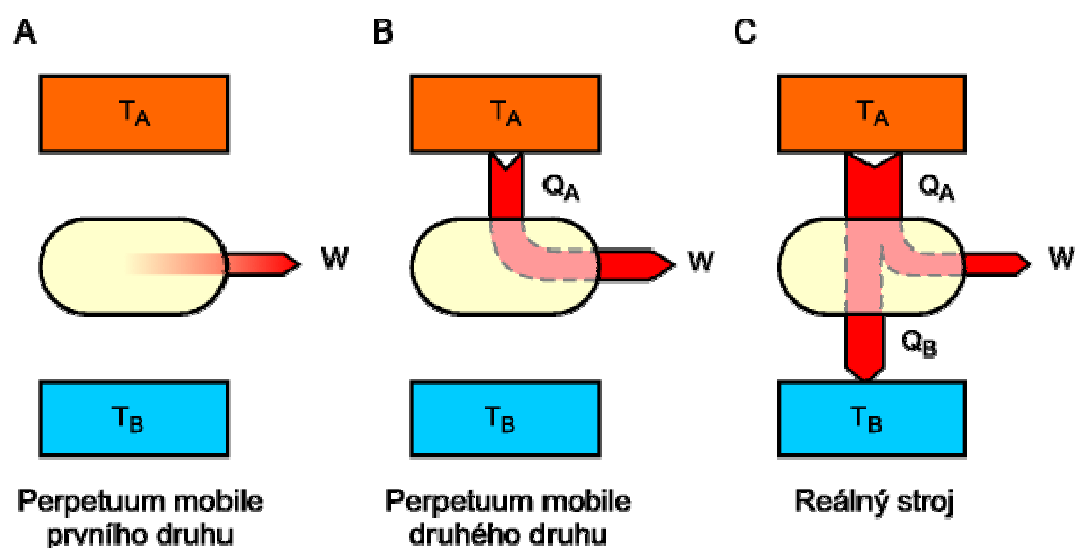
Umožňuje určovat uskutečnitelnost a směr děje.

*Teplo nemůže samovolně přecházet z tělesa chladnějšího na těleso teplejší*  
(Clausius 1850)

*Nelze sestrojít periodicky pracující stroj, který by pouze odebíral z tepelného zásobníku teplo a měnil ho na rovnocennou práci* (nelze sestrojít perpetuum mobile druhého druhu) (Kelvin 1851 a Planck 1891)

Perpetuum mobile I. druhu: vyrábí energii z ničeho.

Perpetuum mobile II. druhu: odebírá energii z okolí.



# Entropie a nevratné děje

Při **vratných dějích** se entropie soustavy a okolí navzájem kompenzují, jejich součet je nula.

Při **nevratných dějích** se entropie soustavy a okolí navzájem nekompenzují, jejich součet je větší než nula.

Při **kruhovém ději** (vratném i nevratném) je změna entropie soustavy nulová.

Protože samovolně probíhají pouze nevratné děje, lze změnu entropie považovat za **kritérium samovolnosti** děje.

## Typické nevratné děje:

Expanze plynu do vakua a škrčení plynu (viz Joule-Thomsonův jev)

Mísení plynů volnou difuzí

Předávání (sdílení) tepla

Tření

## Pracovní cykly tepelných strojů

Pracovní cyklus tepelného stroje (tepelný oběh) je série postupných změn stavu pracovní látky, které začínají a končí ve stejném stavu. Existuje více modelových pracovních cyklů tepelného stroje, speciální postavení mezi nimi má **Carnotův cyklus**. Pro teoretické výpočty technických aplikací se používají i jiné modely tepelných cyklů.

V oblasti *pístových spalovacích motorů* se pracuje s:

Ottovým cyklem

Dieselovým cyklem

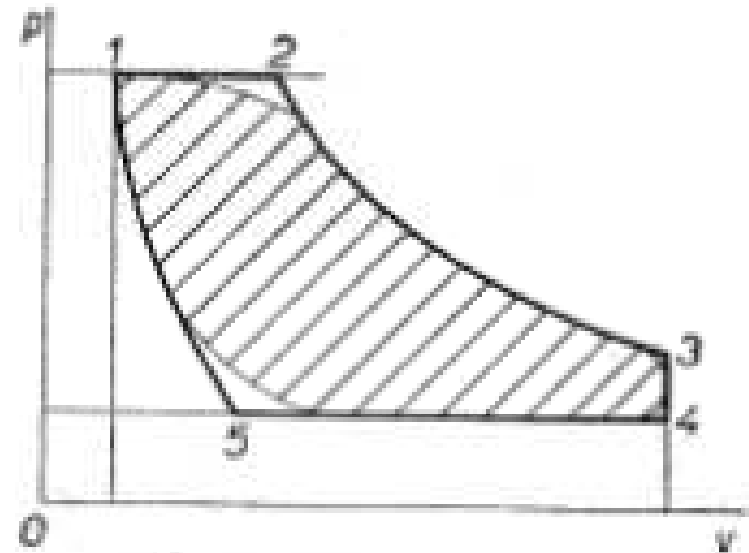
Seiligerovým cyklem

V oblasti *plynových turbín* se pracuje s:

Humpreyovým cyklem

Erikson-Braytonovým cyklem

Joule-Braytonovým cyklem

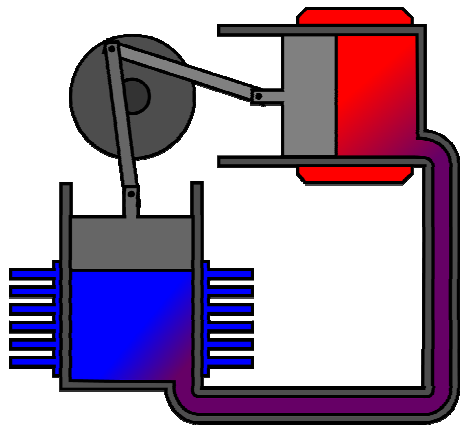


Obr. 31. Cyklus parního stroje

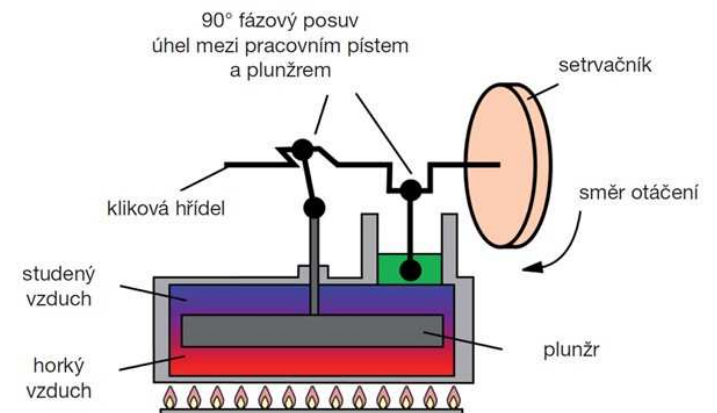
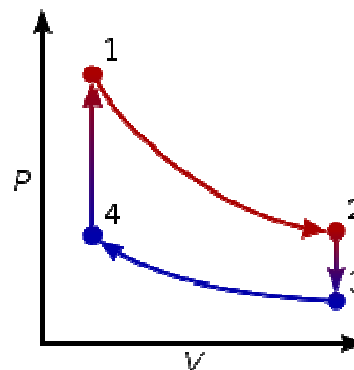
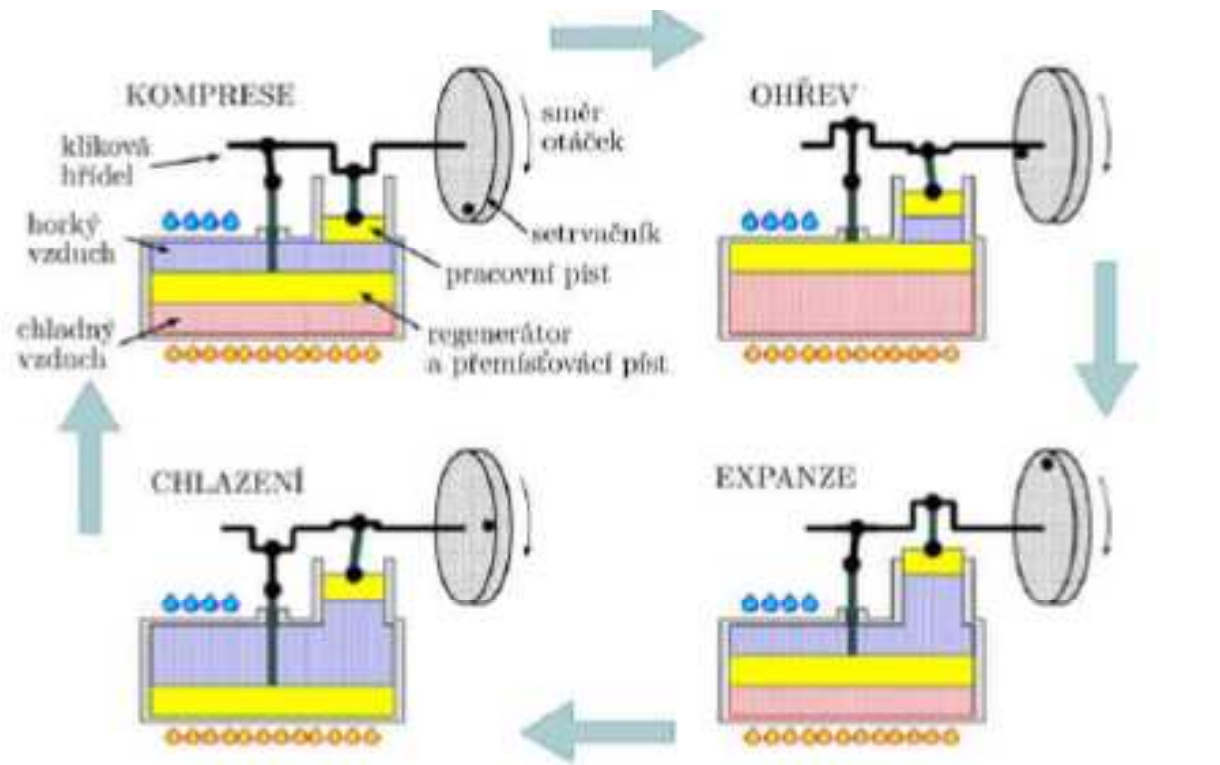
Tepelný stroj pracující v **Carnotově cyklu** je *ideální stroj*.

# Stirlingův motor

Pracovní plyn je stlačován v chladnější části stroje a expanduje v teplejší části stroje za vzniku práce.

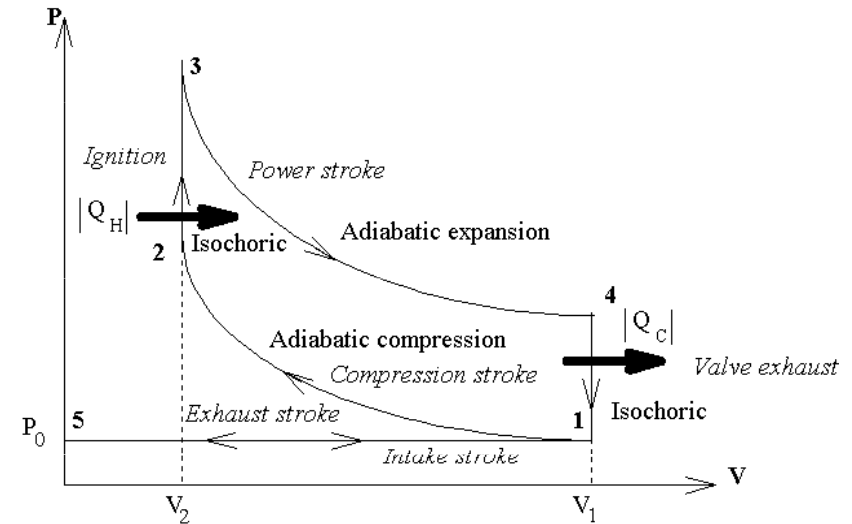


- 1-2 Izotermická expanze.
- 2-3 Isochorické chlazení
- 3-4 Izotermická komprese
- 4-1 Isochorické zahřátí



# Ottův cyklus (zážehový motor)

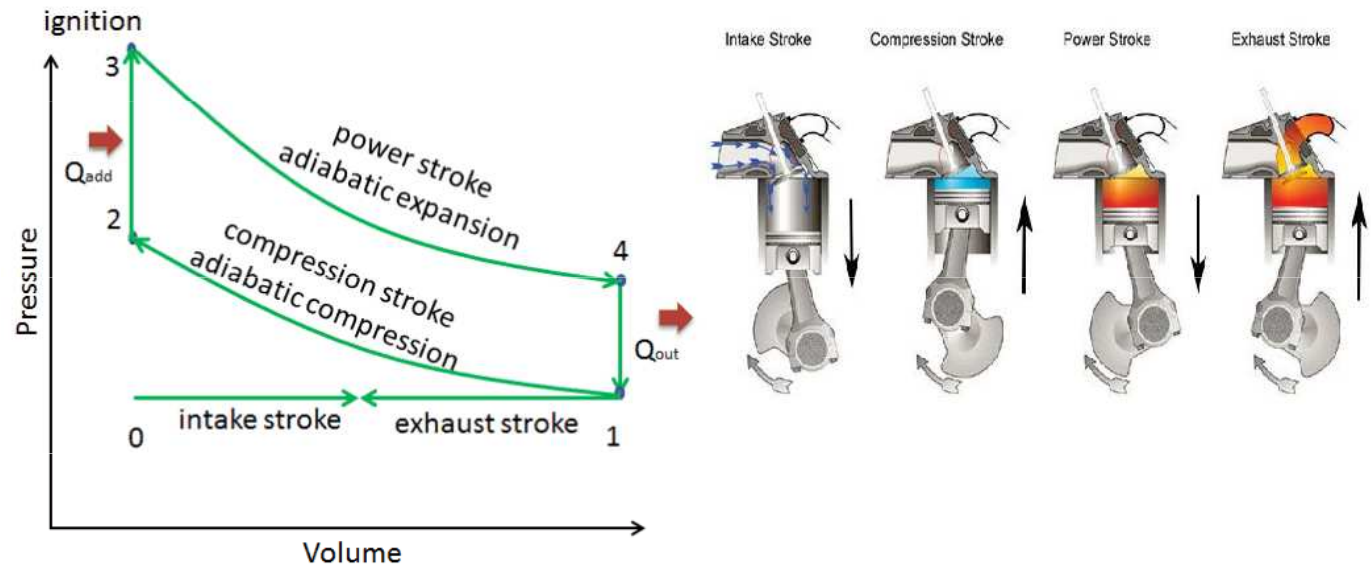
Ottův cyklus je ideální tepelný oběh sestávající z vratných změn. Ottův cyklus popisuje práci tepelného stroje, kde přívod a odvod tepla se uskutečňuje ve velmi krátkém čase - beze změny pohybu pístu. Takové přiblížení lze použít pouze pro zážehové motory, kde je rychlost spalování (přívod tepla) dostatečně vysoká. Odvod tepla je realizován výměnou náplně, což zhruba odpovídá předpokladům modelu.



- 1 až 2 - adiabatická komprese
- 2 až 3 - izochorický přívod tepla
- 3 až 4 - adiabatická expanze
- 4 až 1 - izochorický odvod tepla

Účinnost Ottova cyklu závisí pouze na **kompresním poměru**  $\epsilon$  tj. poměru objemu ve stavech 1 a 4 k objemu ve stavech 2 a 3 a na exponentu adiabaty (Poissonova konstanta)

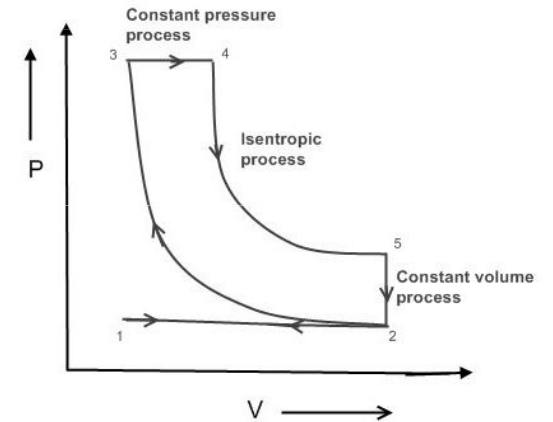
$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}$$



# Dieselův cyklus (vznětový motor)

**Dieselův cyklus** je ideální tepelný oběh sestávající z vratných změn. Dieselův cyklus popisuje práci tepelného stroje, kde přívod tepla probíhá plynule během expanze a odvod tepla se uskuteční ve velmi krátkém čase – beze změny pohybu pístu. Takové přiblížení je možno použít pro vznětové motory při plném zatížení, kde se větší část spalování (přívod tepla) koná během expanze. Odvod tepla je realizován výměnou náplně.

Diesel Cycle P-V Diagram



Účinnost Dieselova cyklu závisí na:

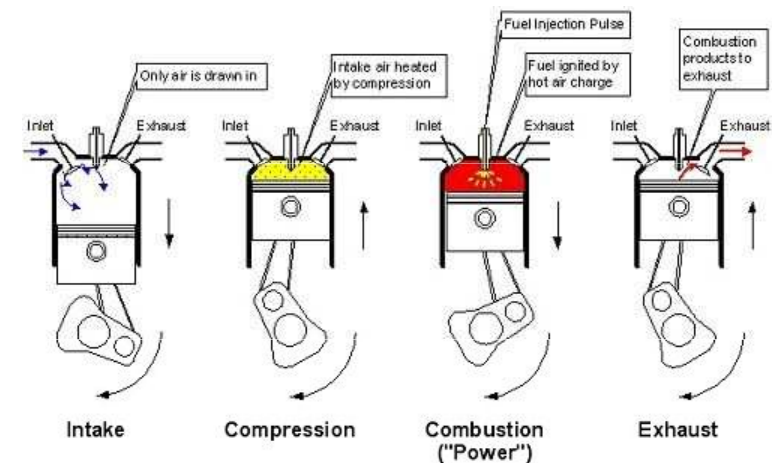
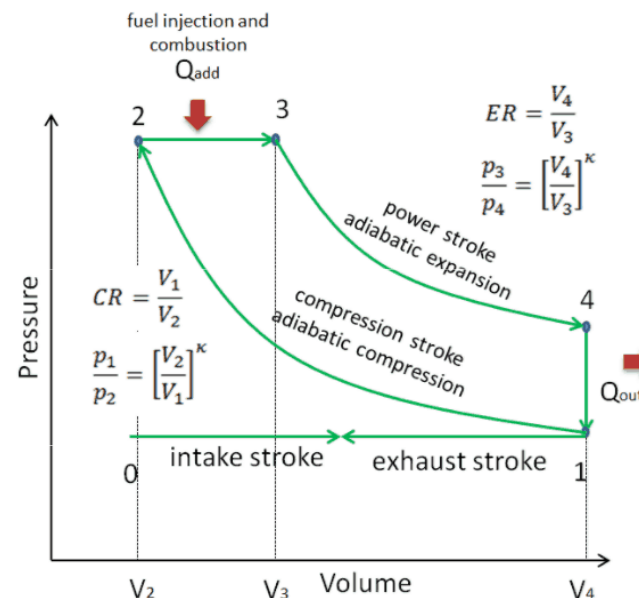
kompresním poměru, tj. poměru objemu ve stavu 1-4 k objemu ve stavu 2-3 ( $\epsilon$ )

exponentu adiabaty – Poissonově konstantě ( $k$ )

množství přivedeného tepla, tj. poměru objemu ve stavu 3 k objemu ve stavu 2 ( $\rho$ )

$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k \cdot (\rho - 1)}$$

- 1 až 2 – adiabatická komprese
- 2 až 3 – izobarický přívod tepla
- 3 až 4 – adiabatická expanze
- 4 až 1 – izochorický odvod tepla





# Entropie a nevratné děje

Při **vratných dějích** se entropie soustavy a okolí navzájem kompenzují, jejich součet je nula.

Při **nevratných dějích** se entropie soustavy a okolí navzájem nekompenzují, jejich součet je větší než nula.

Při **kruhovém ději** (vratném i nevratném) je změna entropie soustavy nulová.

Protože samovolně probíhají pouze nevratné děje, lze změnu entropie považovat za **kritérium samovolnosti** děje.

## Typické nevratné děje:

Expanze plynu do vakua a škrčení plynu (viz Joule-Thomsonův jev)

Mísení plynů volnou difuzí

Předávání (sdílení) tepla

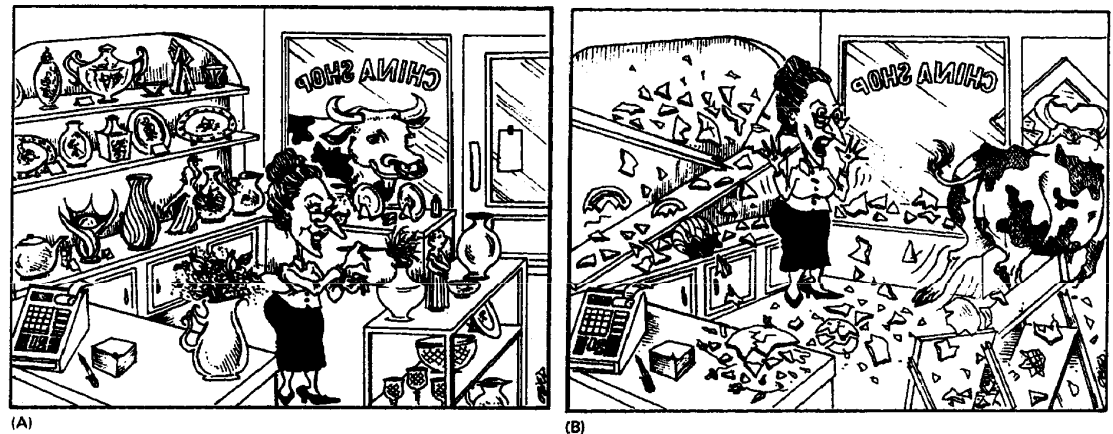
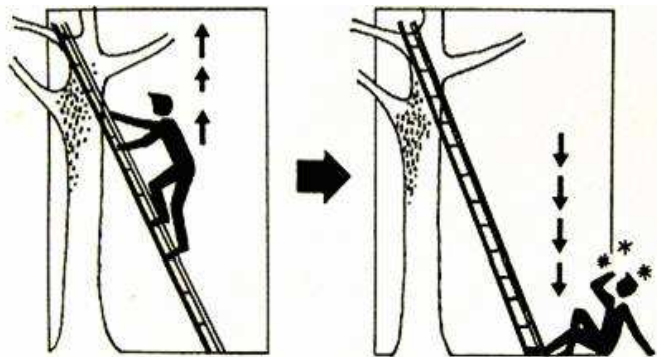
Tření

# Entropie a samovolné děje

**Reversibilní děje:**  $\Delta S = 0$ , v systému probíhají pouze vratné děje a systém je v rovnováze.

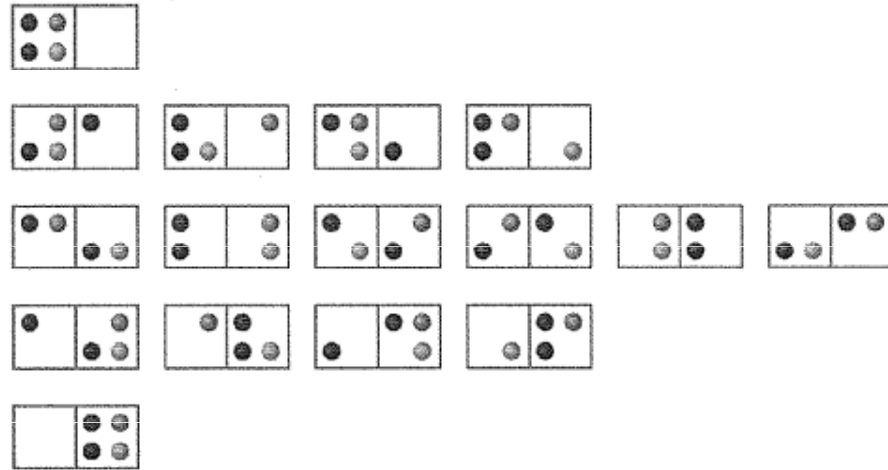
**Ireversibilní děje:**  $\Delta S < 0$  děj neprobíhá samovolně,  $\Delta S > 0$  děj probíhá samovolně.

Z toho je patrné, že entropie je **kritériem samovolnosti děje**.

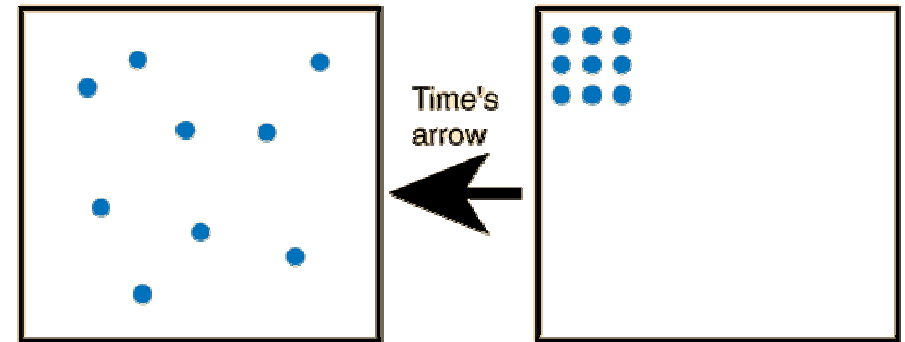


Růst entropie = směr plynutí času

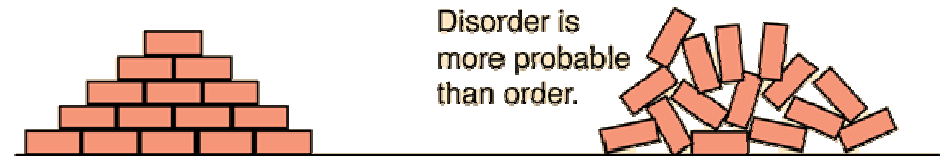
# Statistický výklad entropie



If the particles represent gas molecules at normal temperatures inside a closed container, which of the illustrated configurations came first?



If you tossed bricks off a truck, which kind of pile of bricks would you more likely produce?

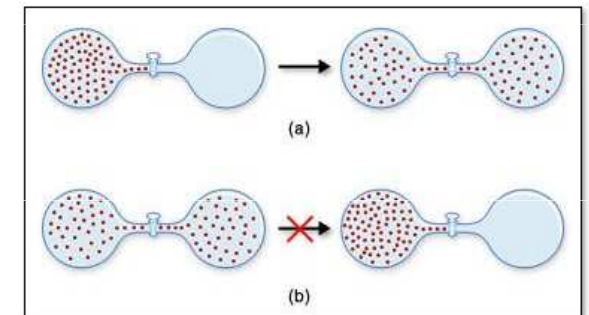


Samovolné děje lze charakterizovat nejen zvětšením entropie, ale též vzrůstem neuspořádanosti vznikajícího stavu soustavy, vzhledem ke stavu výchozímu. Proto se entropie také definuje jako míra neuspořádanosti systému. Čím je systém neuspořádanosti větší, tím má vyšší entropii. Entropie se udává v jednotkách  $J.mol^{-1}.K^{-1}$ .

$$S = k \cdot \ln P$$

$k$  je Boltzmanova konstanta

$P$  je termodynamická pravděpodobnost děje (daného uspořádání).



## Příklad:

Změna neuspořádanosti systému při přeměně:  $\text{H}_2\text{O} (\text{s}) \rightarrow \text{H}_2\text{O} (\text{l})$

Při tomto ději přechází systém do stavu s větší neuspořádaností, tedy entropie se zvětšuje:

$$\Delta S = S_{(\text{l})} - S_{(\text{s})}$$
$$\underline{\underline{\Delta S = 21,5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}}}$$

