TERMODYNAMIKA

Kinetická teorie stavby látek

- statistická povaha - nelze popsat pohyb všech částic => model využívající základy statistiky

3 empirické poznatky:

1, Látky všech skupenství se skládají z částic.

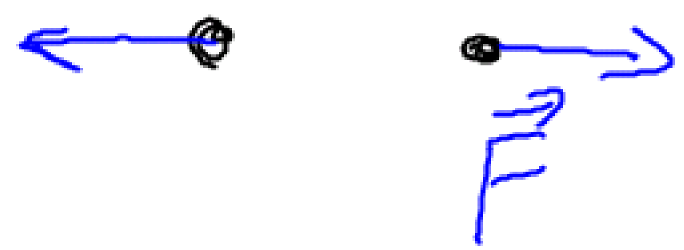
2, Částice se v látkách neustále chaoticky pohybují.

Př. čaj + NEZAMÍCHANÝ cukr – po delší době je sladký

šíření vůní a pachů vzduchem

3, Částice na sebe navzájem působí silami:

- při malých vzdálenostech částic jsou síly ODPUDIVÉ
- při velkých vzdálenostech částic jsou síly PŘITAŽLIVÉ



Model 2 částic v závislosti na vzdálenosti r

$r = r_0$ --- $F = 0$; ROVNOVÁŽNÁ POLOHA

pro $r < r_0$ --- ODPUDIVÁ SÍLA, jejíž velikost
s klesajícím $\underline{r}$ PRUDCE ROSTE

pro $r > r_0$ --- PŘITAŽLIVÁ SÍLA, jejíž
velikost:
- nejdříve roste
- pak velmi rychle klesá k nule

$r_0 \sim 10^{-10}\,m$

$F \doteq 0$ pro $r \sim 10^{-8}\,m$

na základě této síly lze pak hovořit
o POTENCIÁLNÍ ENERGII ČÁSTIC

2, ⇒ částice mají i KINETICKOU ENERGII

Modely částic

a) plyn : $E_k \gg E_p$

b) kapalina : $E_k \sim E_p$

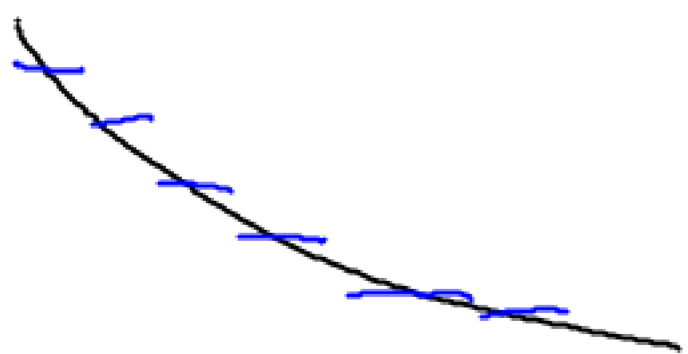
c) pevná látka : $E_k \ll E_p$

d) plazma – vysoce ionizovaný plyn

Rovnovážný stav soustavy

stav soustavy – popsán STAVOVÝMI VELIČINAMI : T, p, V, m, energie, počet částic, látkové množství, chem. složení, ...

STAVOVÉ ZMĚNY – interakce soustavy s okolím



spojitá změna stav. veličin

„kaskáda" rovnovážných stavů

(„snímky filmu")

lze omezit interakci s okolím
(buď hypoteticky pro zjednodušení výpočtu nebo reálným zařízením):

- <u>IZOLOVANÁ SOUSTAVA</u>

  není výměna ENERGIE ani ČÁSTIC s okolím
  (káva v uzavřené termosce)

- <u>UZAVŘENÁ SOUSTAVA</u>

  není výměna částic, ale je výměna energie
  (káva v hrnečku s pokličkou)

OTEVŘENÁ SOUSTAVA

je výměna částic i energie
(káva v otevřeném hrnečku)

ADIABATICKY IZOLOVANÁ SOUSTAVA

není TEPELNÁ VÝMĚNA s okolím
(soustava koná práci, nebo okolí koná
práci na soustavu)

Rovnovážný stav: (některé) stavové veličiny jsou KONSTANTNÍ

(při T_{kdy} se vyrovná s okolím – obvykle se vzduch, kámen, stůl, ...)

Rovnovážný děj – posloupnost rovnovážných stavů

Rovnovážný stav – největší pst výskytu

A	B
0	22
10	12
16	6
20	2
15	7
9	13
11	11

problémy:

- malý počet nosinových koulí nesrovnání s $\underline{N_A}$
- malý počet měření

vylepšení: „bílé“ (nosinové) a „barevné“ (s letální) koule

$\Rightarrow$ ROVNOVÁŽNÝ STAV SE REALIZUJE NEJČASTĚJI (je to energeticky nejvýhodnější)

Teplota a její měření

teploměr x teplotoměr

nutno vědět:

- rozsah, který chceme měřit (lihový teploměr x var vody)
- jak zajistit bezpečnost čidla
- proč měřit (orientační měření x „vědecké" měření)

nejběžnější teplotní stupnice je
CELSIOVA teplotní stupnice

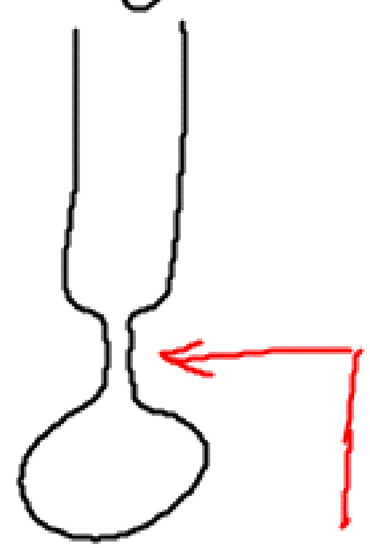
- bod tuhnutí vody (při Pa) ..... 0 °C
- bod varu vody (při Pa) .... 100 °C

pro měření je nutné znát fyzikální děj
(resp. veličinu), který je závislý na teplotě
(pro výpočty je nejjednodušší: LINEÁRNÍ ZÁVISLOST)

- kapalinový teploměr

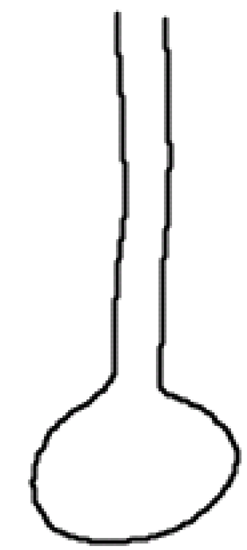
změna V na teplotě

- lékařský



nutno „sklepat“
před dalším použitím

- venkovní

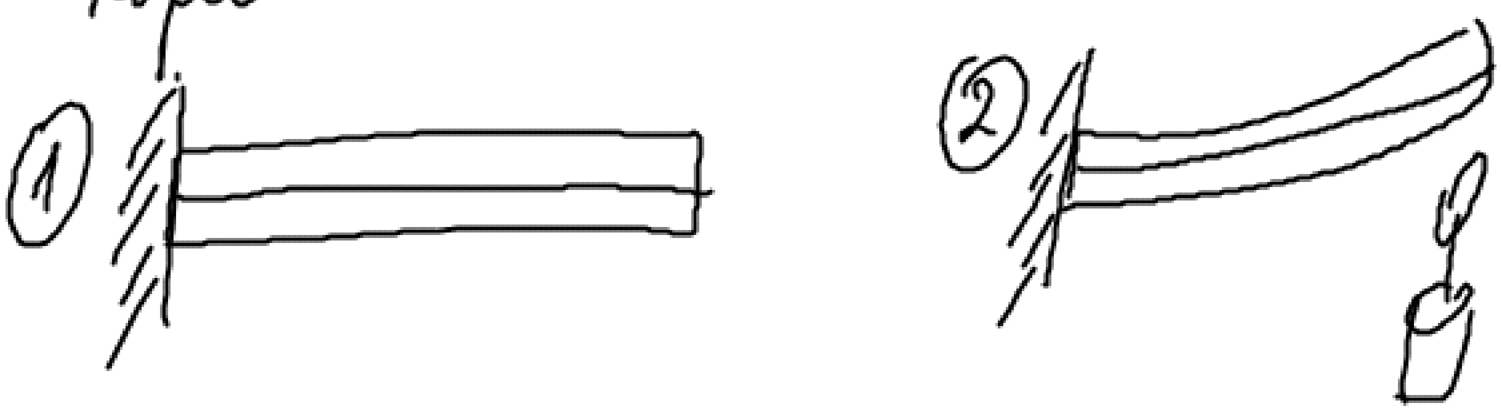


- odporové teploměry

  změna odporu polovodičů (nebo můstkového zapojení rezistorů) na teplotě

- bimetalové teploměry

  teplotní délková roztažnost



• <u>infračervené teploměry</u>

vyzařování absolutně černého tělesa a následný přepočet vln. délky na teplotu

POZOR:

- lesklé předměty
- vzdálenost od měřeného objektu („úhel záběru")

termokamera – stejný princip

Teplotní stupnice

- **FAHRENHEITOVA**

$$\{t_F\} = \frac{9}{5}\{t_c\} + 32$$

- **RÉAUMUROVA**

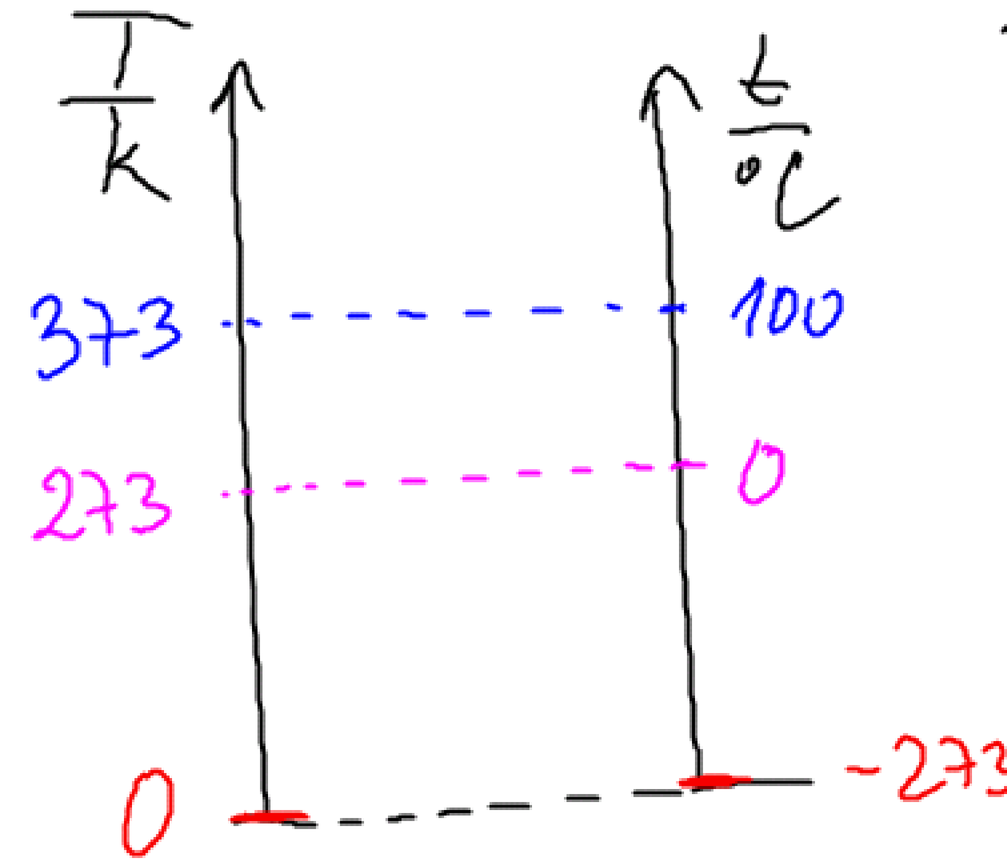
$$\{t_R\} = \frac{4}{5}\{t_c\}$$

• KELVINOVA (TERMODYNAMICKÁ STUPNICE)

$$\{T\} = \{t_c\} + 273$$

$$\Downarrow$$

$$\{\Delta T\} = \{\Delta t_c\}$$



zavedena pro vědecké srovnání teploty

$$t = 20\,^\circ C \cancel{=} 293\,K \qquad m = 2\,kg \cancel{=} 20\,N$$

$$t = 20\,^\circ C \Rightarrow T = 293\,K$$

ÚLOHY – počet částic, ...

Jak dlouhá by byla nitka sestavená z molekul vody obsažených v kapce o poloměru 1 mm?

FYZIKÁLNÍ NESMYSL

$$\frac{r = 1\ \mathrm{mm}}{l = ?}$$

$$N = n N_A = \frac{m}{M_m} N_A = \frac{\rho V}{M_m} N_A = \frac{\rho \frac{4}{3}\pi r^3}{M_m} N_A$$

$$N = \frac{\cancel{4}}{\cancel{3}} \cdot 10^3 \cdot \cancel{3{,}14} \cdot \frac{10^{-9}}{\cancel{18}^{\,3} \cdot 10^{-3}} \cdot \cancel{6} \cdot 10^{23} = 10^{20}$$

$$d_{H_2O} \sim 10^{-9}\ \mathrm{m}$$

$$\Rightarrow l = d_{H_2O} \cdot N = 10^{11}\ \mathrm{m} \sim 1\ \mathrm{AU}$$

V čem odneseme (odvozeme) 10 molů cukru?

SACHAROZA: $C_{12}H_{12}O_{11}$

$$M_m = (12 \cdot 12 + 12 \cdot 1 + 11 \cdot 16)\ g \cdot mol^{-1} = 332\ g \cdot mol^{-1}$$

$$n = \frac{m}{M_m} \Rightarrow m = n \cdot M_m$$

$$m = 10 \cdot 332\ g$$

$$\underline{\underline{m = 3{,}3\ kg}}$$

VNITŘNÍ ENERGIE, TEPLO, PRÁCE

U Q W

$[U] = [Q] = [W] = J$

Vnitřní energie

je celková energie molekul dané soustavy

- E_k
  - posuvný pohyb
  - rotační pohyb
  - vibrační pohyb
- E_p

vnitřní energii lze měnit:

(1) • konáním práce

(2) • tepelnou výměnou

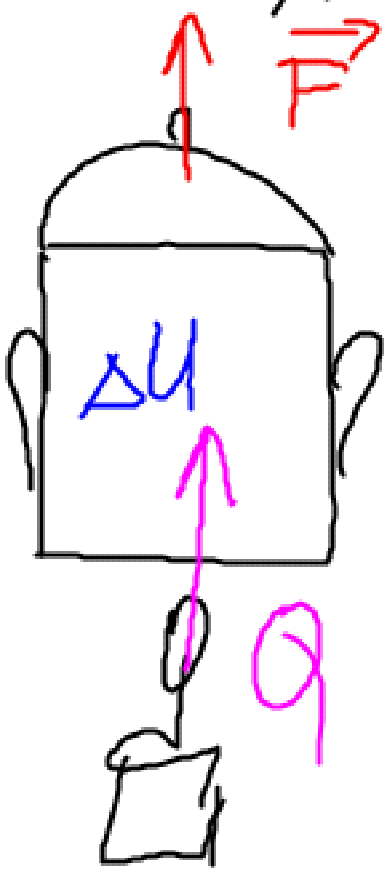
(1) rozpohybováním částic VNĚJŠÍ SILOU; tento pohyb se pak přenáší na další částice

(2) spojeno s přenosem TEPLA z jednoho tělesa na druhé

teplo = tok energie z místa A do místa B

1. termodynamický zákon

při vaření brambor



$$\boxed{Q = \Delta U + W}$$

1.TZ (~ZZE)

$\Delta U \sim \Delta T \sim$ ohřev toho, co je v hrnci

$W \sim$ nadskakování poklice; PRÁCE, kterou koná SOUSTAVA

W_{ok} – práce, kterou KONÁ OKOLÍ; $W_{ok} = -W$

Tepelné charakteristiky látek

a) **měrná tepelná kapacita**

– pro látky, které se ohřívají (resp. chladnou)

– čas nutný k ohřevu látky závisí na

- $V \rightarrow m$
- Δt resp. ΔT
- látka
- P

$\left.\begin{array}{l} V \rightarrow m \\ \Delta t \text{ resp. } \Delta T \end{array}\right\}$ přímá úměrnost

$\Rightarrow$ ENERGIE $\rightarrow$ TEPLO

$$\boxed{Q = m \cdot c \cdot \Delta T} \Rightarrow c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \, ; \quad [c] = J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$$

$$J \cdot kg^{-1} \cdot {}^\circ C^{-1}$$

c – teplo nutné k ohřevu 1kg látky o 1K (resp. 1°C)

extremální hodnoty c:

- voda ... velké c („špatně se ohřívá a špatně chladne")

$\Rightarrow$ použití jako chladič

- kov ... malá c $\Rightarrow$ snadné tepelné opracování (pájka, svařování, ...)

b) tepelná kapacita

- pro nádoby, přístroje

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad ; \quad [C] = J \cdot K^{-1}$$

teplo, které přijme (odevzdá) nádoba při změně teploty o 1K

cíl výrobců: $\underline{C}$ malé $\Rightarrow$ minimální ovlivnění měření

c) výhřevnost

pro paliva

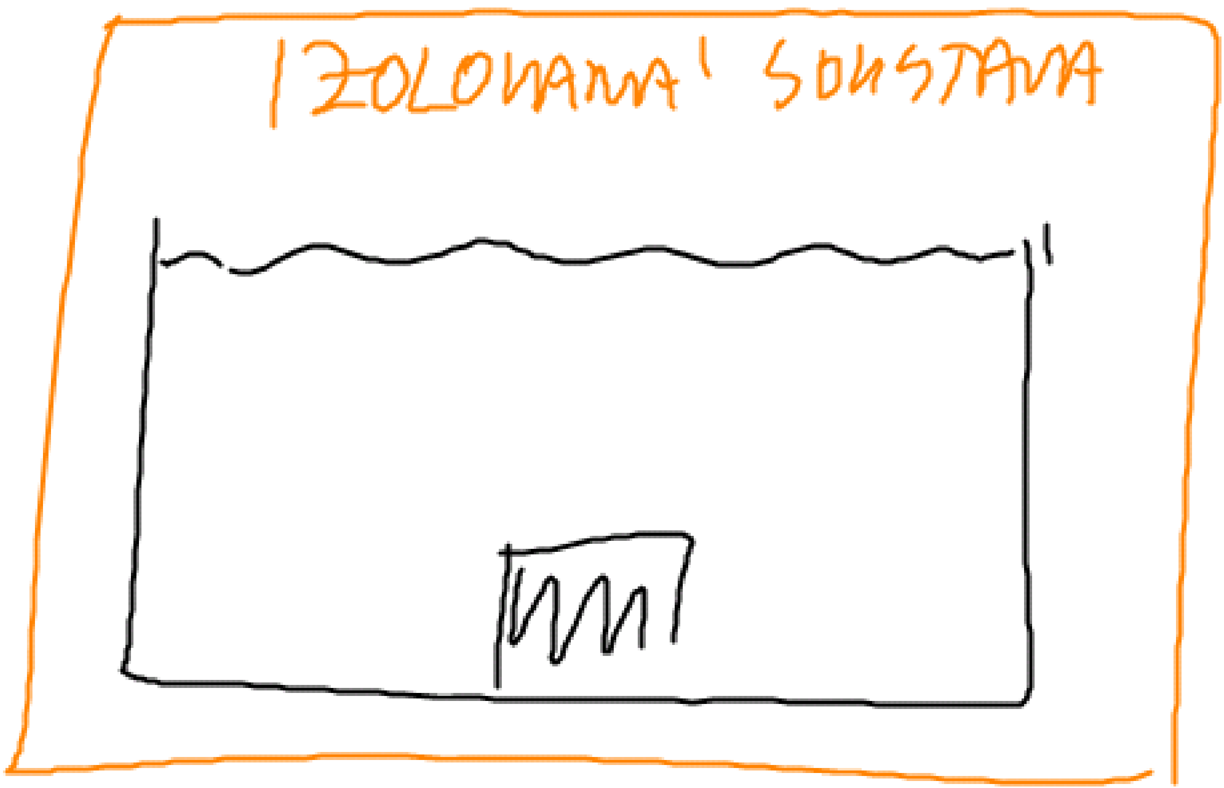
$$\boxed{H = \frac{Q}{m}} \quad ; [H] = J \cdot kg^{-1}$$

teplo uvolněné spálením 1 kg látky

Kalorimetrická rovnice

voda: m_v, c_v, t_v

těleso: $m_t, c_t, t_t > t_v$



$$Q_{\text{přijaté}} = m_v c_v (t - t_v)$$

$$Q_{\text{vydané}} = m_t c_t (t_t - t)$$

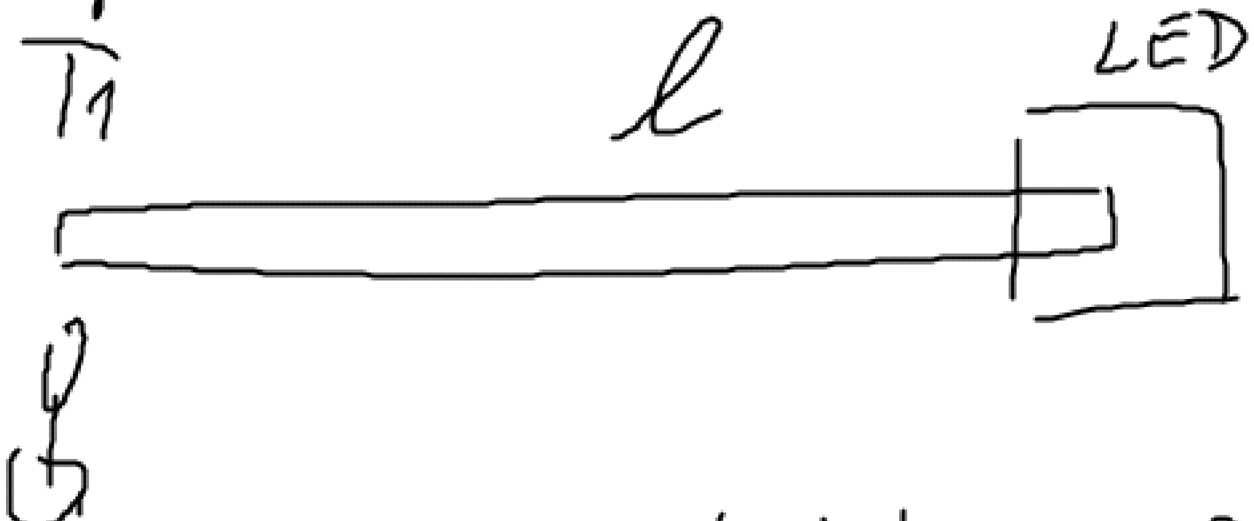
$$\boxed{Q_{\text{přijaté prvním tělesem}} = Q_{\text{vydané druhým tělesem}}}$$

po čase se teploty obou těles vyrovnají na $\underline{t} \in (t_v, t_t)$

Přenos vnitřní energie

1, **VEDENÍ** – pevné látky

tyč: délka l
průřez S



$T_2 < T_1$

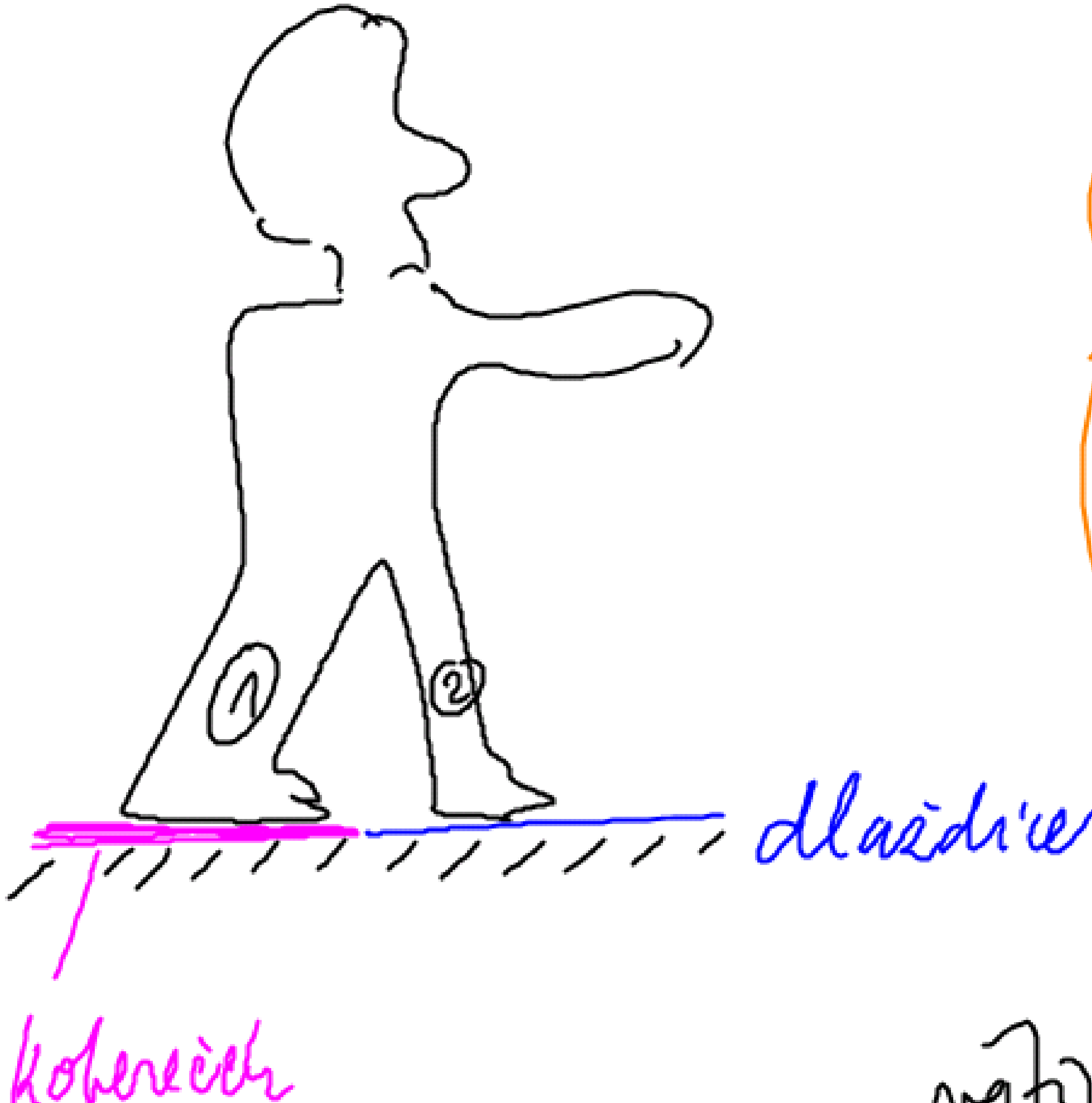
tyčí se šíří teplo a teploty se vyrovnávají

Teplo závisí na:

- materiál tyče ..... λ
- S ; $S\uparrow \Rightarrow Q\uparrow$
- l ; $l\uparrow \Rightarrow Q\downarrow$
- ΔT ; $\Delta T\uparrow \Rightarrow Q\uparrow$
- τ ; $\tau\uparrow \Rightarrow Q\uparrow$

$$\boxed{Q = \lambda S \tau \frac{\Delta T}{l}}$$

λ – součinitel tepelné vodivosti ; $[\lambda] = \frac{J\cdot m}{m^2 s K} = W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$



pocitová teplota:

$t_1 > t_2$

přitom: $t_1 = t_2$

dlaždice má větší $\underline{\lambda}$ než má koberec

$\Longrightarrow$ dlaždice odebírá více tepla aplikace vztahu na:

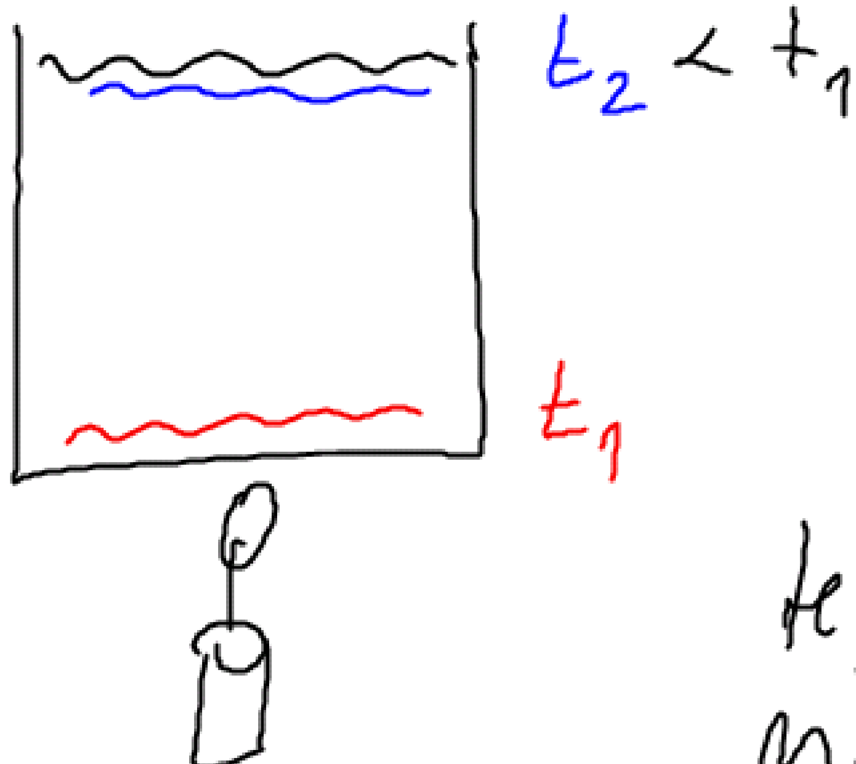
- výpočet tepelných ztrát domu

příklady: $\underline{\lambda}$ malá ⇒ „vzduchová izolace"

- dvojitá okna
- „oběd do peřin"
- kožich

2, PROUDĚNÍ

kapalina nebo plyn v tíhovém poli



$t_1 \uparrow \Rightarrow \rho \downarrow \Rightarrow$ studenější tekutina klesá dolů a vytlačuje teplejší

praxe: radiátory jsou pod okny

3, ZÁŘENÍ (SÁLÁNÍ)

lze i ve vakuu (← energie ze Slunce)

IDEÁLNÍ PLYNY

Model ideálního plynu (IP)

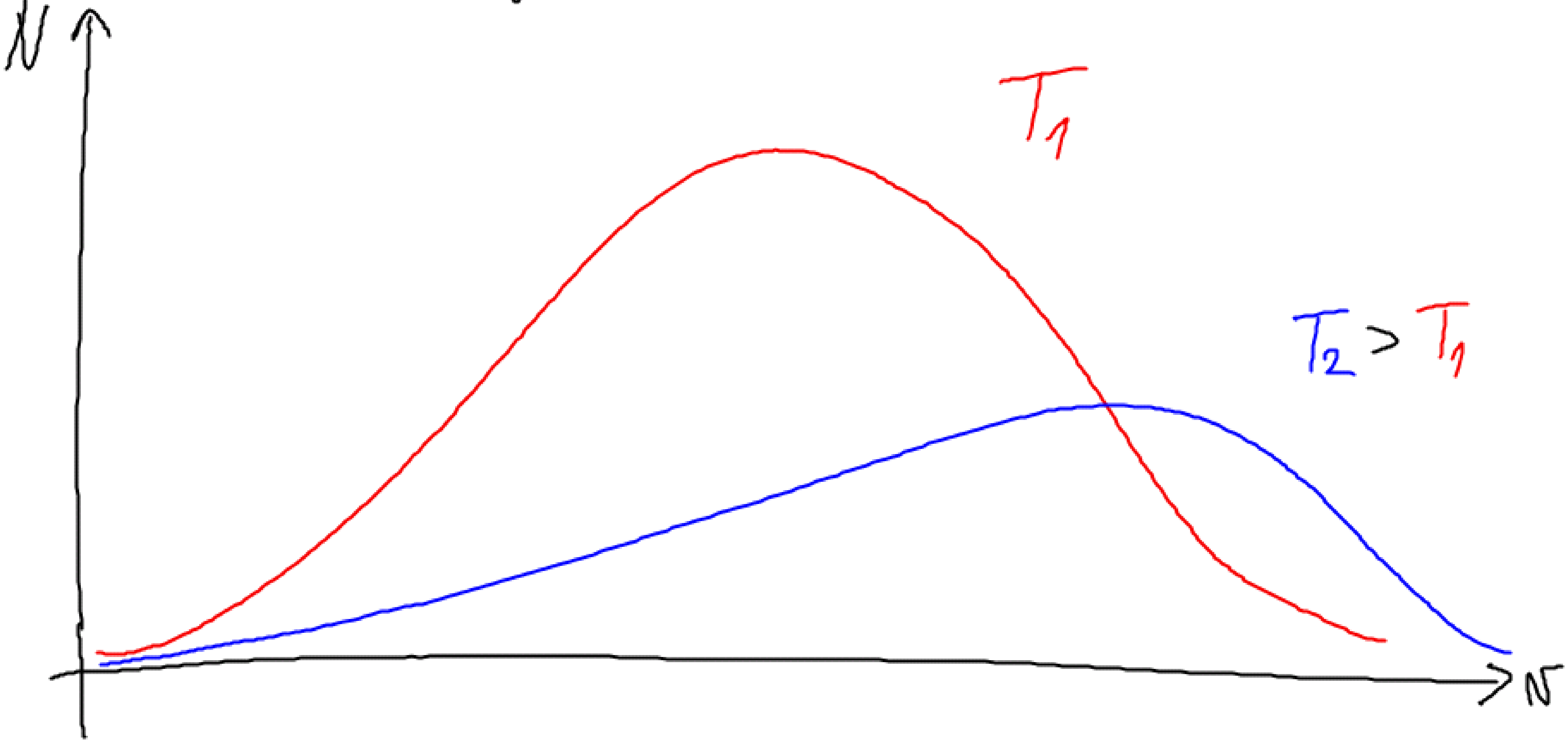
- rozměry molekul jsou výrazně menší než střední vzdálenosti molekul
- molekuly IP na sebe silově NEPŮSOBÍ kromě srážek (vzájemných a se stěnou nádoby)
- srážky jsou dokonale pružné (platí ZZH, ZZmE)

běžné plyny lze za IP považovat při malých tlacích

Rozdělení velikosti rychlosti molekul IP

KTL $\Rightarrow$ molekuly se pohybují stále a chaoticky

$\Rightarrow$ různé rychlosti



N_1 ---- v_1 $\quad \langle v_1 - \Delta v_1 ; v_1 + \Delta v_1 \rangle$

N_2 ---- v_2

$\vdots$

N_n ---- v_n

$$E_k = N_1 E_{k1} + N_2 E_{k2} + \dots + N_n E_{kn} =$$
$$= N_1 \frac{1}{2} m v_1^2 + N_2 \frac{1}{2} m v_2^2 + \dots + N_n \cdot \frac{1}{2} m v_n^2 =$$
$$= \frac{1}{2} m \left(N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + \dots + N_n v_n^2 \right)$$

zjednodušení: VŠECHNY MOLEKULY SE POHYBUJÍ **STEJNĚ VELKOU RYCHLOSTÍ**, ALE CELKOVÁ E_k SE NEZMĚNÍ

$$\cancel{\frac{1}{2}}m\left(N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + \dots + N_n v_n^2\right) = N \cdot \cancel{\frac{1}{2}} m v_k^2$$

$$\boxed{v_k = \sqrt{\frac{1}{N}\left(N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + \dots + N_n v_n^2\right)}}$$

v_k – střední kvadratická

$N = N_1 + N_2 + \dots + N_n$

Teplota IP

$T \uparrow \Rightarrow v \uparrow \Rightarrow E_k \uparrow$

pro 1 molekulu o hmotnosti m : $E_k = \frac{1}{2} m v_k^2$

lze psát také: $E_k = \frac{3}{2} kT$

k – Boltzmannova konstanta: $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ J \cdot K^{-1}$

3 – počet stupňů volnosti

a $\Rightarrow \frac{1}{2} m v_k^2 = \frac{3}{2} kT \Rightarrow \boxed{v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m}}}$

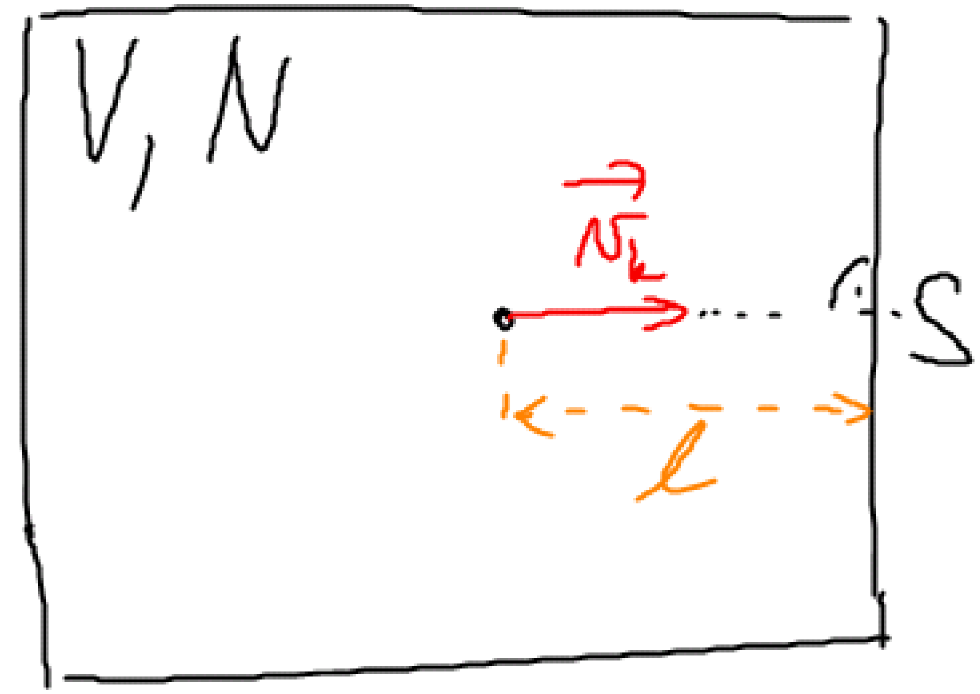
Ideální plyn

zjednodušující předpoklad:

- nádoba tvaru krychle
- molekuly se pohybují rychlostí $\underline{v_k}$
- symetrický pohyb

$p = \frac{F}{S}$; $\vec{F}$ KOLMÁ K PLOŠE

F – interakce molekul a nádoby



$$2.\,NZ: F = \frac{\Delta p_H}{\Delta t} = \frac{2 m v_k}{\Delta t}$$

počet molekul, které za dobu Δt dopadnou na stěnu rychlostí v_k:

$$\frac{1}{6}\,\frac{l \cdot S}{V}\,N = \frac{1}{6}\,\frac{v_k \cdot \Delta t \cdot S}{V}\,N$$

SYMETRIE POHYBU

$$p = \frac{1}{\cancel{6}_{3}} \frac{v_k \cdot \cancel{\Delta t} \cdot \cancel{S}}{V} N \cdot \frac{\frac{\cancel{2} m v_k}{\cancel{\Delta t}}}{\cancel{S}}$$

$$p = \frac{1}{3} m \boxed{v_k^2} \frac{N}{V}$$

$$p = \frac{1}{3} m \boxed{\frac{3kT}{m}} \frac{N}{V}$$

$$N = n N_A$$

$$N_A \cdot k =: R_m$$

$$p = \frac{NkT}{V} \Rightarrow \boxed{pV = NkT = n R_m T}$$

STAVOVÁ RCE IP

R_m – molární plynová konstanta; $R = 8{,}31 \frac{J}{mol \cdot K}$

R_m – teplo nutné k ohřevu 1 molu plynu o 1 K

(k – teplo nutné k ohřevu 1 částice o 1 K)

STAVOVÁ RCE PRO REÁLNÝ PLYN (1 mol)

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)\left(V_m - b\right) = RT$$

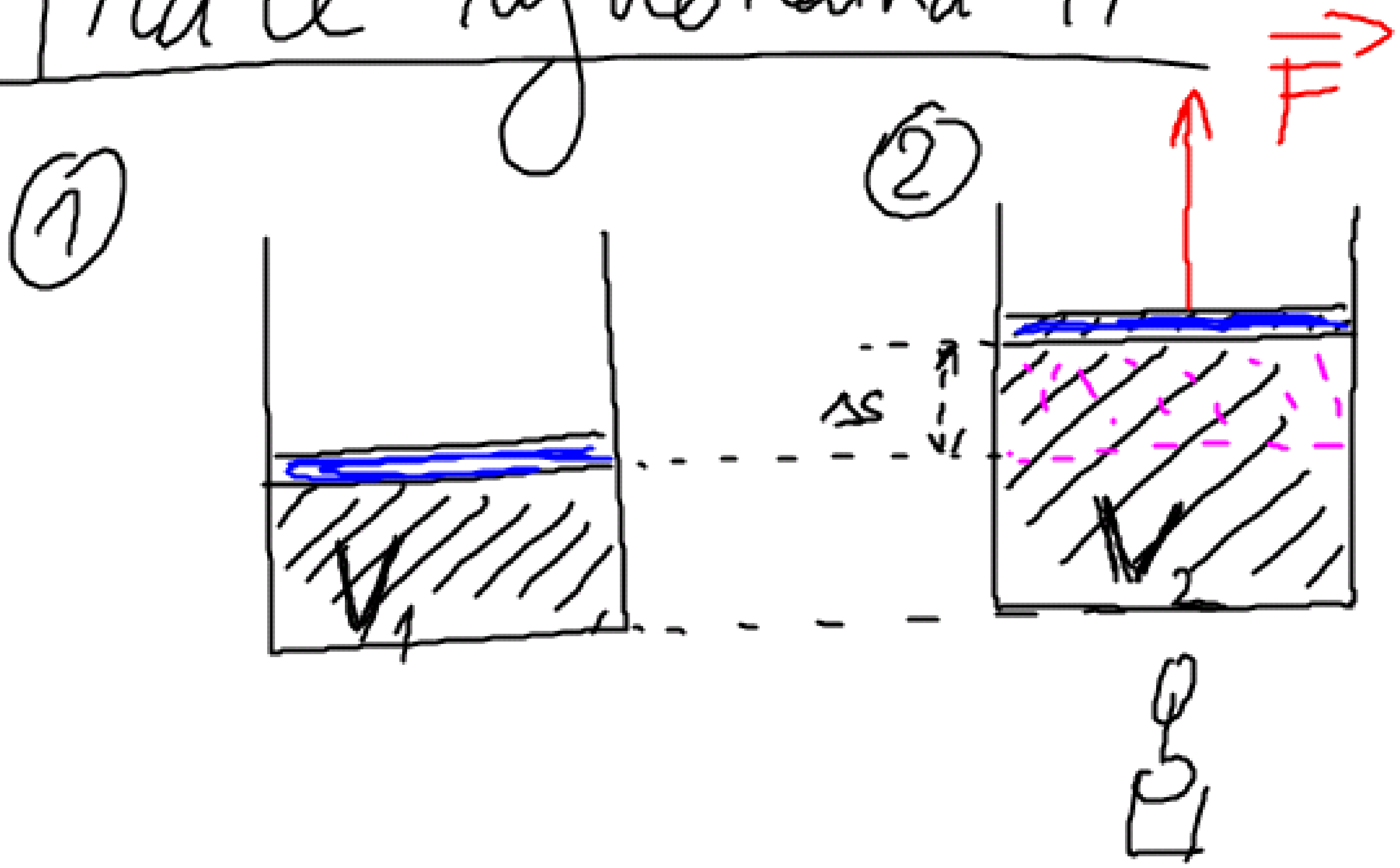
V_m – molární objem

a, b – „opravy" na neideálnost plynu (viz 3 vlastnosti IP) pro různé stavy téhož IP platí:

$$\frac{pV}{T} = \text{konst.} \iff \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

: $n, N, m, M_m = \text{konst.}$

Práce vykonaná IP



$p = \text{konst.}$

$$W = F\cdot\Delta s\cdot\underbrace{\cos\alpha}_{1} = p\cdot S\cdot\Delta s = \boxed{p\cdot\Delta V}$$

$$p = \frac{F}{S}$$

$V_2 > V_1 \Rightarrow$ práci konal plyn

$V_2 < V_1 \Rightarrow$ — " — okolí

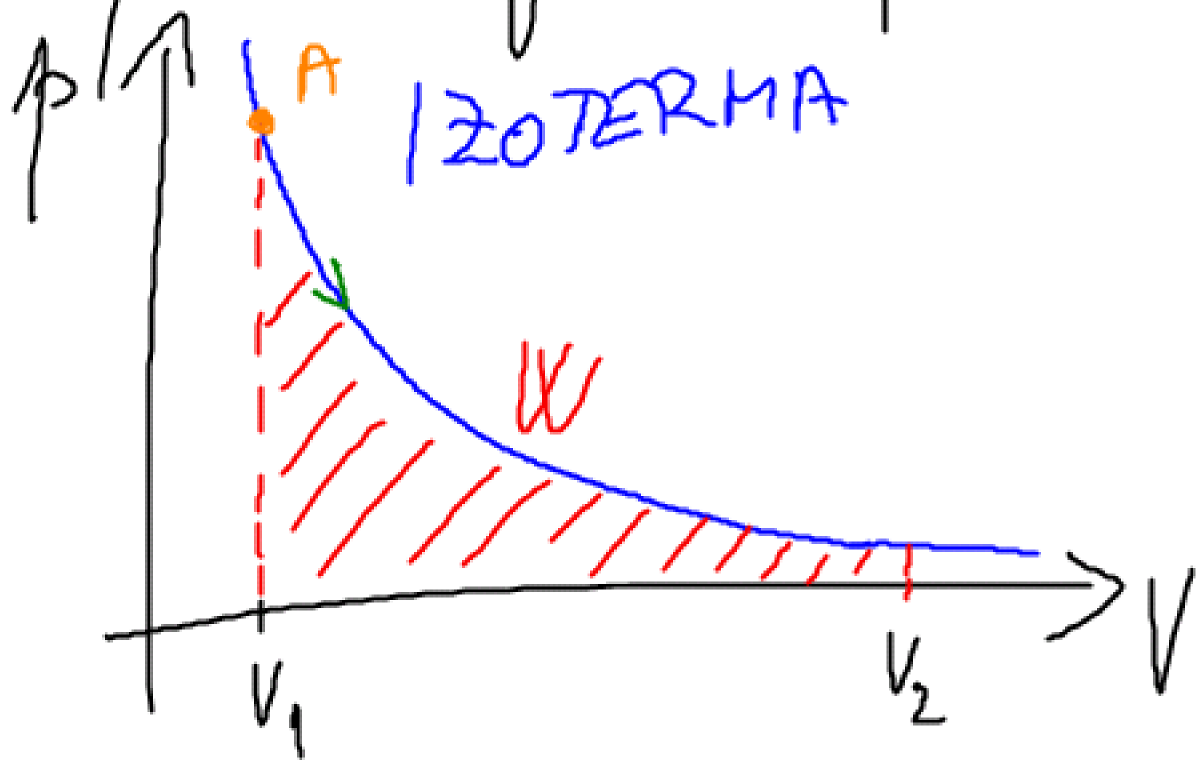
Děje s IP

1) Izotermický děj

$T = \text{konst} \Rightarrow \boxed{pV = \text{konst.}}$

Boylův – Mariottův zákon

pV – diagram (pracovní diagram)



V se mění ⇒ plyn koná práci W

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

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{konst}{V} \, dV = konst. \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} =$$

$$pV = konst$$

$$p = \frac{konst}{V}$$

$$= konst. \left[\ln V \right]_{V_1}^{V_2} = konst. \left(\ln V_2 - \ln V_1 \right) =$$

$$= konst. \ln \frac{V_2}{V_1}$$

lze určit z KONKRÉTNÍCH PARAMETRŮ BODU A

$T = \text{konst.} \Rightarrow U = \text{konst.} \Rightarrow \Delta U = 0$

1\. TZ: $Q = \Delta U + W$

$$Q = W$$

v praxi: pomalu probíhající děje

experiment: $p = \frac{A}{V}$

$pV = \text{konst.}$

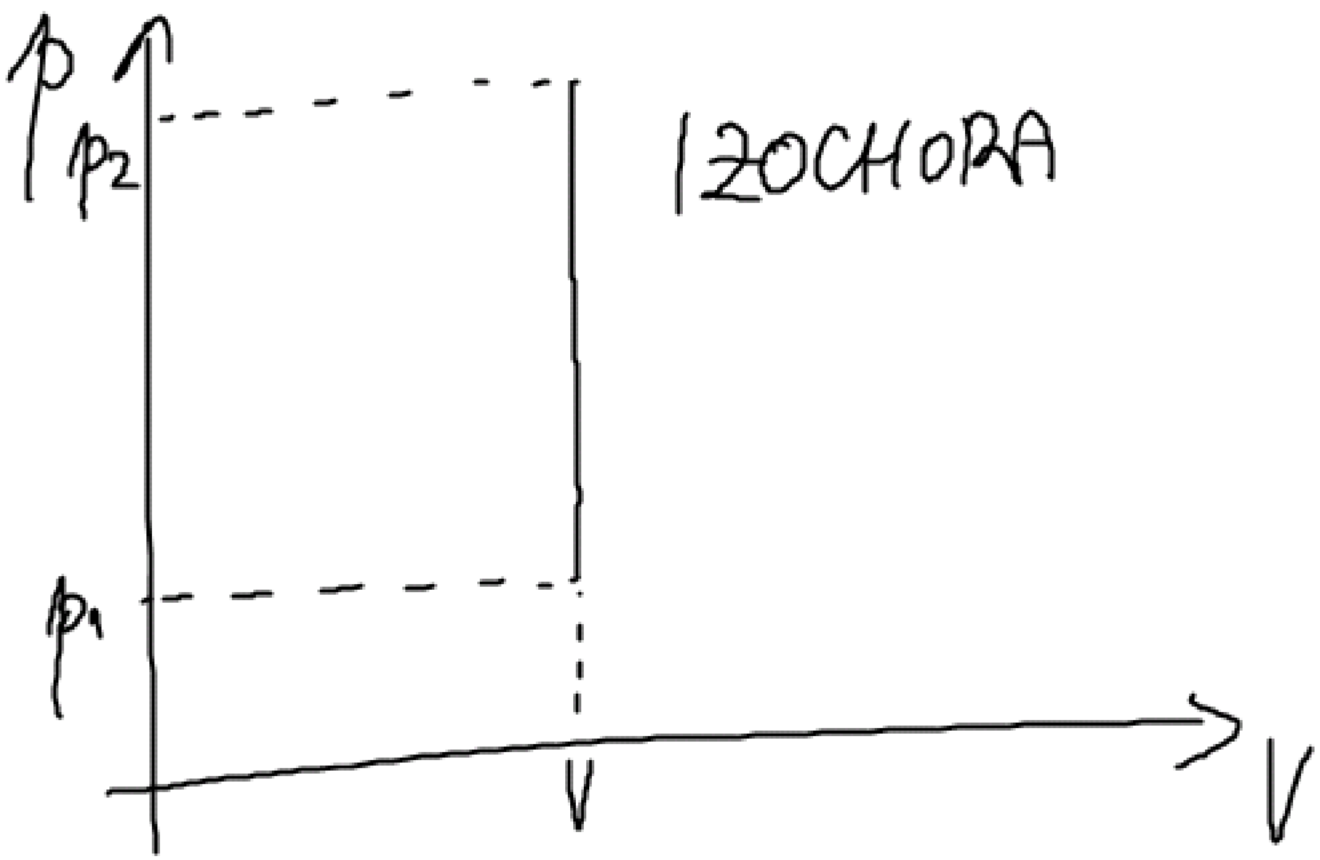
mine: $pV = nRT \Rightarrow n = \ldots$

vzduch: ρ, M_m, $V \Rightarrow n_{Teor} = \ldots$

2, Izochorický děj

$V = konst. \Rightarrow \boxed{\frac{p}{T} = konst}$

Charlesův zákon



$V = \text{konst} \Rightarrow W = 0$

$1. TZ: Q = \Delta U$

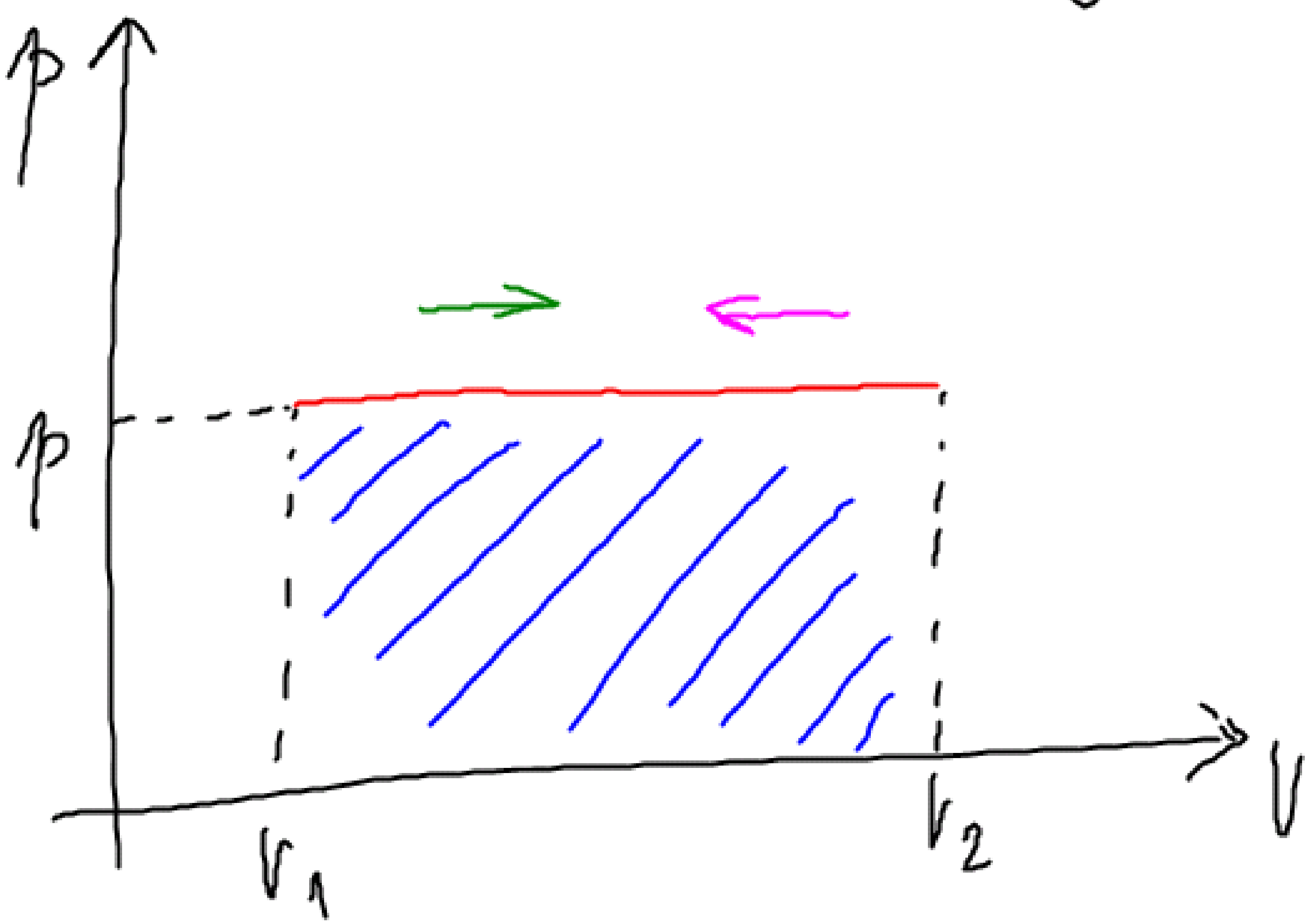
plyn přijme teplo: $Q = m \cdot c_V \cdot \Delta T$

c_V – měrná tepelná kapacita plynu při STÁLÉM OBJEMU

3, Izobarický děj

$p = konst. \Rightarrow \boxed{\frac{V}{T} = konst.}$

Gay-Lussacův zákon



$W = p \cdot \Delta V$

$V \uparrow \Rightarrow$ práci koná plyn

$V \downarrow \Rightarrow$ práci koná vnější síla

1.TZ: $Q = \Delta U + W$

teplo prijaté plynem: $Q = m c_p \cdot \Delta T$

c_p - měrná tepelná kapacita plynu při STÁLÉM TLAKU

(za jinak stejných podmínek)

$Q_{V=konst} < Q_{p=konst}$

$c_V < c_p$

4) Adiabatický děj

- rychlý děj
- nestíhají se vyrovnávat teploty okolí a plynu $\Rightarrow Q = 0$

1\. TZ: $0 = \Delta U + W$

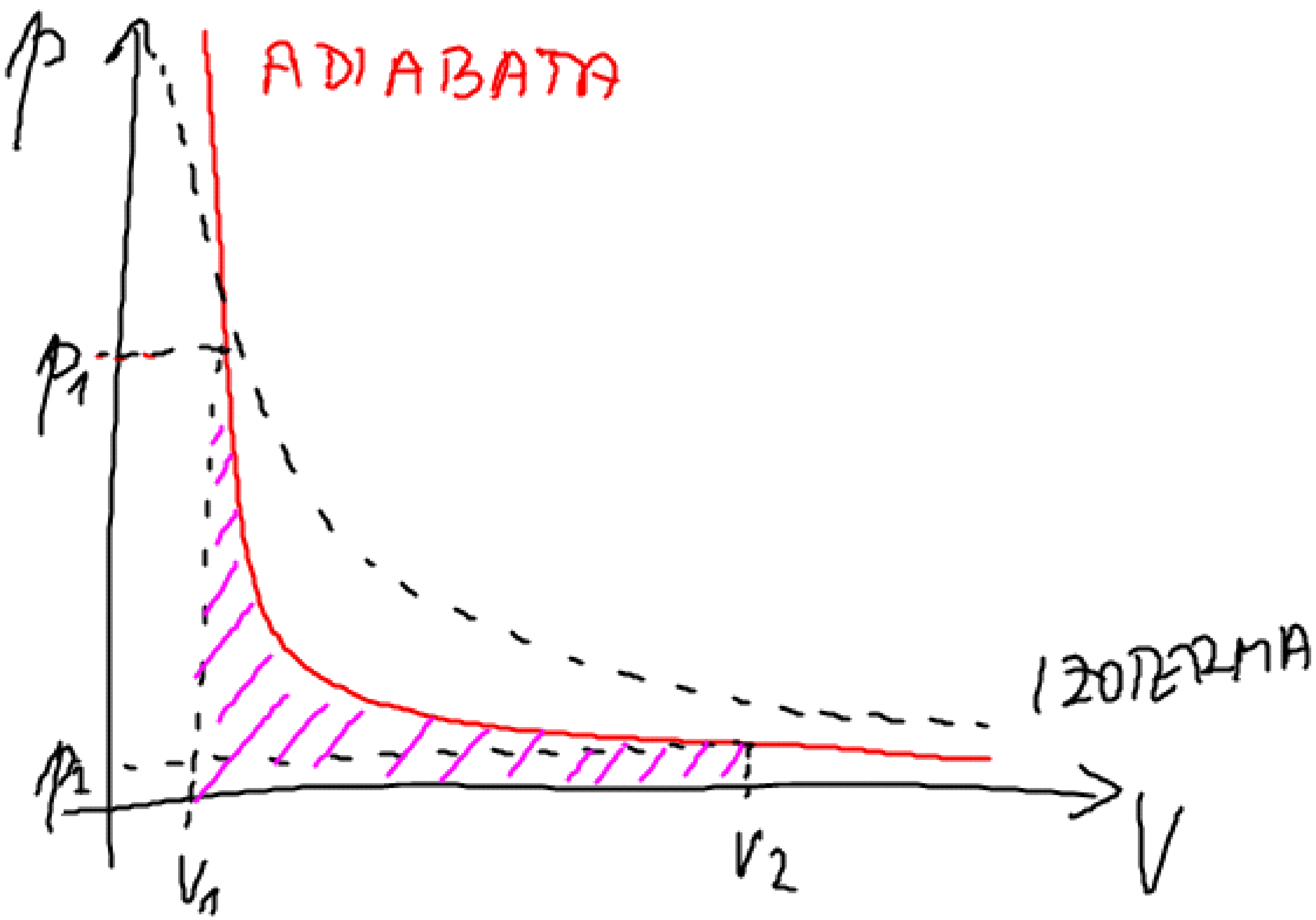
$W = -\Delta U$ ···· plyn koná práci NA ÚKOR SVÉ VNITŘNÍ ENERGIE

$\Downarrow$

prudké ochlazení plynu (resp. nádoby)

$$pV^{\varkappa} = \text{konst.}$$

$$\varkappa = \frac{c_p}{c_V} > 1$$ .... Poissonova konstanta



$$\left.\begin{aligned} &W = \int p \, dV \\ &pV^{\varkappa} = \text{konst} \Rightarrow p = \frac{\text{konst}}{V^{\varkappa}} \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\text{konst}}{V^{\varkappa}} \, dV = \text{konst} \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^{\varkappa}} = \text{konst} \cdot \left[\frac{V^{-\varkappa+1}}{-\varkappa+1} \right]_{V_1}^{V_2} =$$

$$= \frac{\text{konst}}{1-\varkappa} \left(V_2^{\,1-\varkappa} - V_1^{\,1-\varkappa} \right)$$

pro $[V_1; p_1]$ platí: $p_1 V_1 = nRT_1$ (1)

adiabatický děj: $p_1 V_1^{\varkappa} = K$ (2)

$$\frac{(2)}{(1)} \qquad \frac{p_1 V_1^{\varkappa}}{p_1 V_1} = \frac{K}{nRT_1}$$

$$K = nRT_1 \cdot V_1^{\varkappa - 1}$$

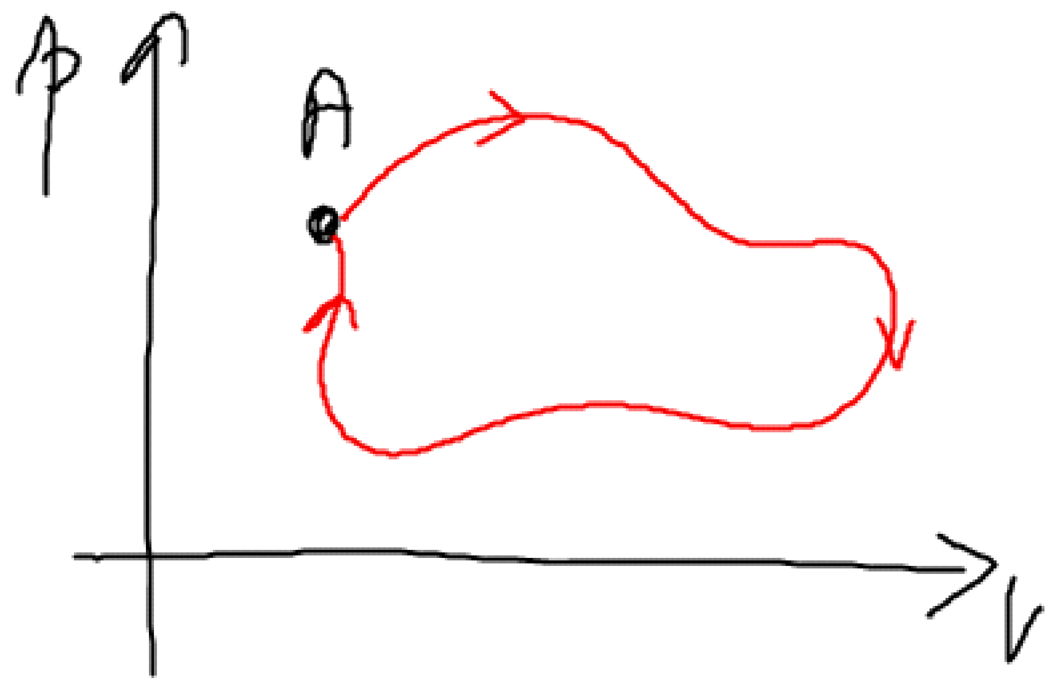
praxe: tepelné motory (Stirling, Carnot, ...)

zkapalňování plynů

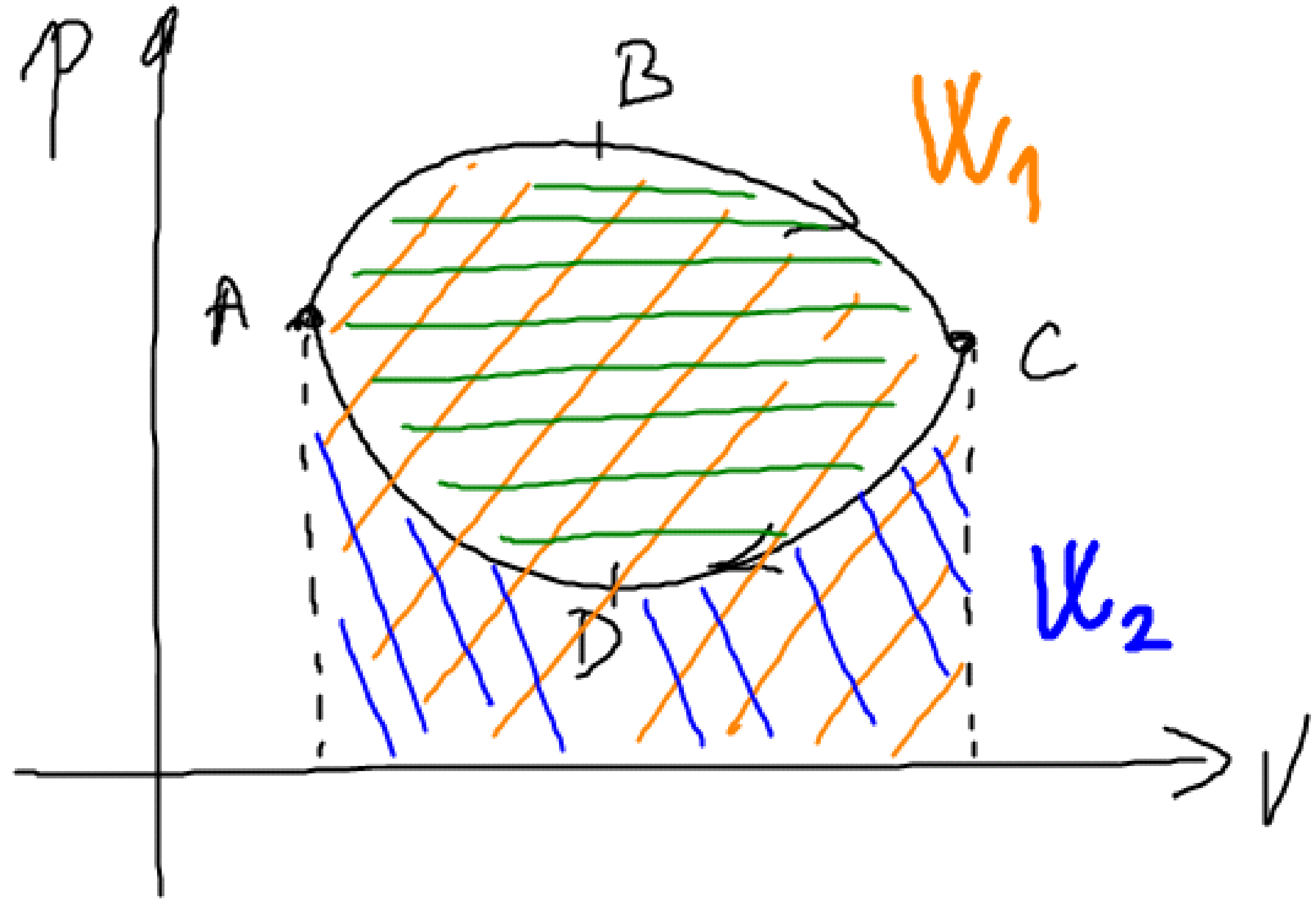
Kruhový děj

důležitý pro praxi: motory

hlavní předpoklad: VRATNÝ DĚJ



počáteční i koncový bod děje jsou stejné v pV diagramu:



ABC: $V\uparrow$ ⇒

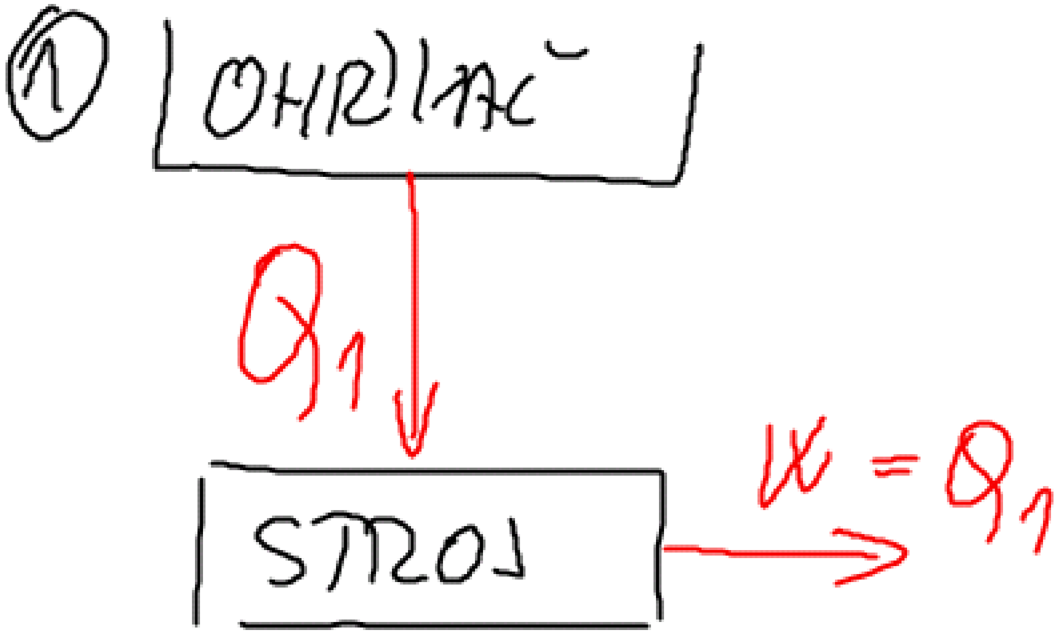
⇒ PRÁCI KONÁ PLYN

CDA: $V\downarrow$ ⇒

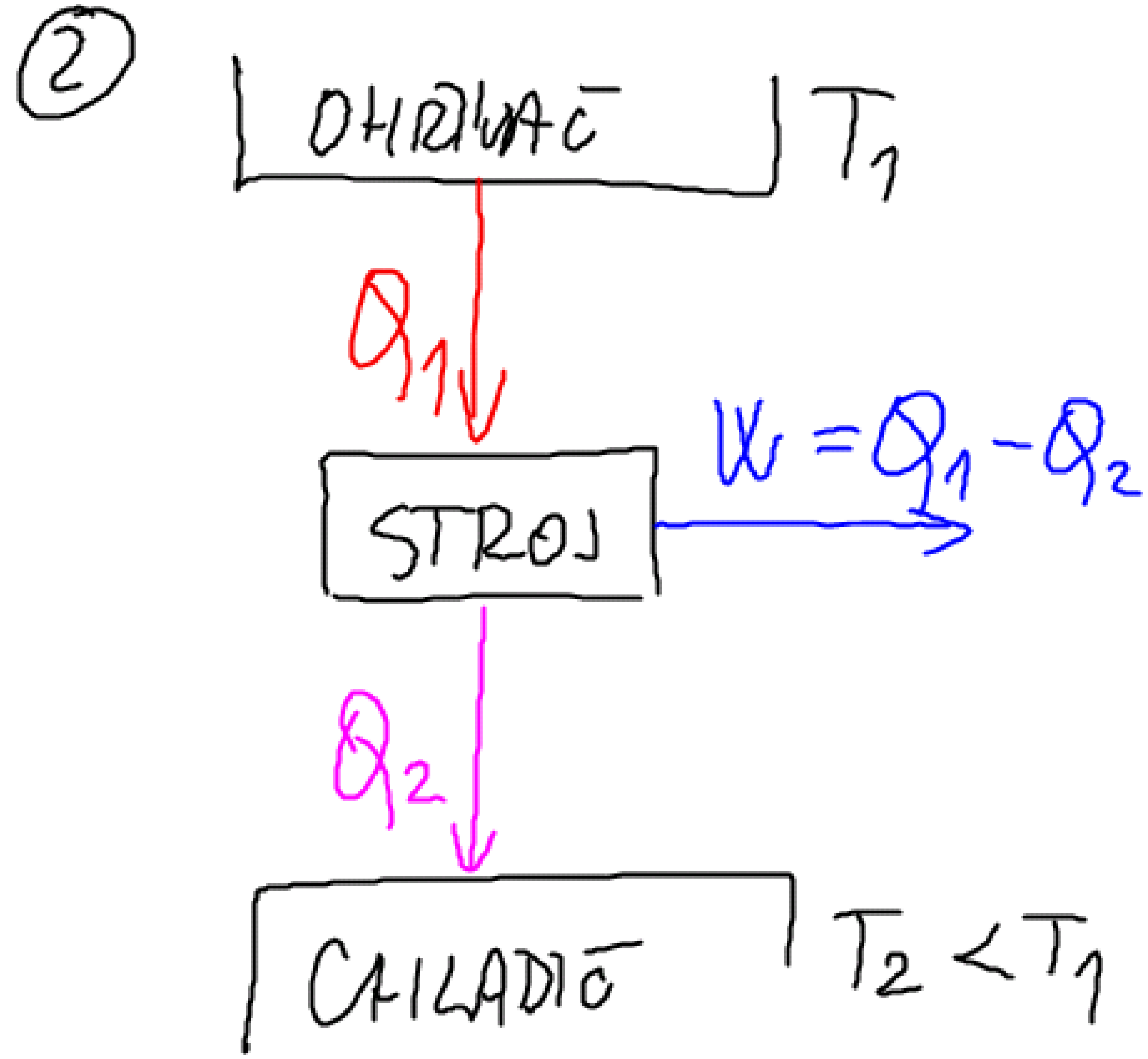
PRÁCI KONÁ VNĚJŠÍ SÍLA

pro práci máme: $W_1 > W_2$

užitečná práce (kterou lze přeměnit E_k): $W = W_1 - W_2$



NEPRACUJE CYKLICKY



PRACUJE CYKLICKY

(viz pV diagram kruhového deje)

2. TZ: NELZE SESTROJIT PERIODICKY PRACUJÍCÍ TEPELNÝ STROJ, KTERÝ POUZE ODEBÍRÁ TEPLO JEDNOMU TĚLESU A MĚNÍ JE NA EKVIVALENTNÍ PRÁCI.
(nelze zlepšit ①)

JINÁ FORMULACE: TEPLO NEMŮŽE $\boxed{\textbf{SAMOVOLNĚ}}$ PŘECHÁZET Z CHLADNĚJŠÍHO TĚLESA NA TEPLEJŠÍ!

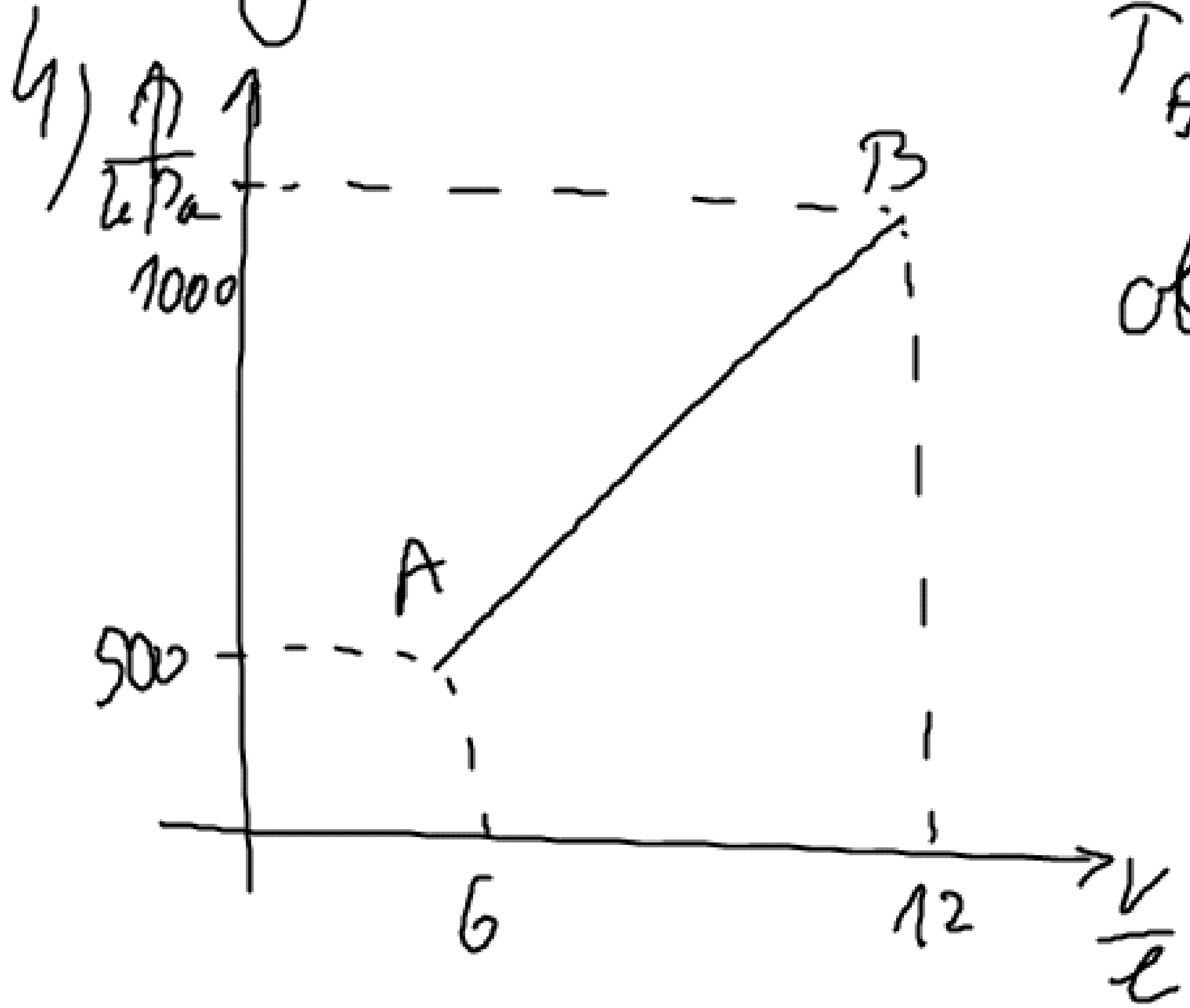
$\boxed{}$ = BEZ KONÁNÍ PRÁCE

② ⇒ maximální účinnost tepelného stroje

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Úlohy na IP

4)



$T_A = 200\,K$

obecný děj

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_B V_B}{T_B}$$

$$T_B = T_A \frac{p_B V_B}{p_A V_A}$$

$$T_B = 4 T_A = 800\,K$$

$$p = \alpha V \qquad ; \alpha = \text{konst.}$$

$$5 \cdot 10^5 = \alpha \cdot 6 \cdot 10^{-3}$$

$$\alpha = \frac{5}{6} \cdot 10^8$$

Tepelné motory

- parní: energie vodní páry → E_k
  - parní stroj
  - parní turbína
- spalovací: vnitřní energie paliva → E_k
  - zážehový – palivo je zapáleno jiskrou
  - vznětový – palivo se vznítí samo
  - raketové

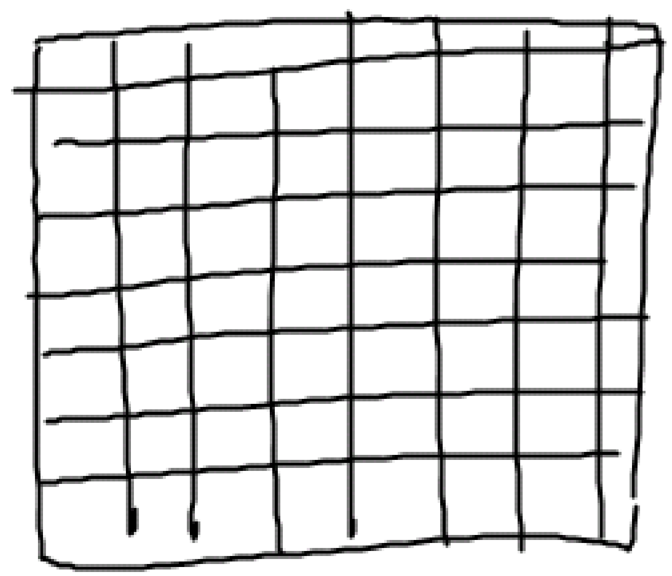
STRUKTURA A VLASTNOSTI PEVNÝCH LÁTEK

Krystalické a amorfní látky

- krystalické – pevná pravidelná struktura a uspořádání
- amorfní – bez pravidelné struktury (sklo, asfalt, parafín, ...)

krystalické

- monokrystalické – „dalekodosahové uspořádání"

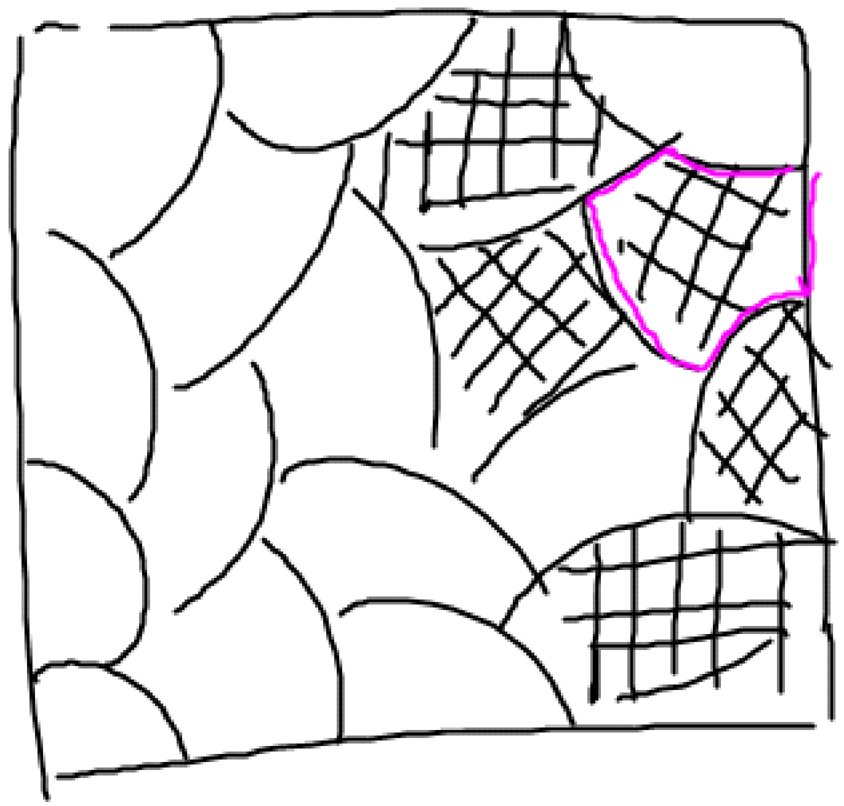


NaCl, SiO_2

ANIZOTROPNÍ

- polykrystalické — „krátkodosahově uspořádaný"

kovy



ZRNA - mono-krystalická

IZOTROPNÍ