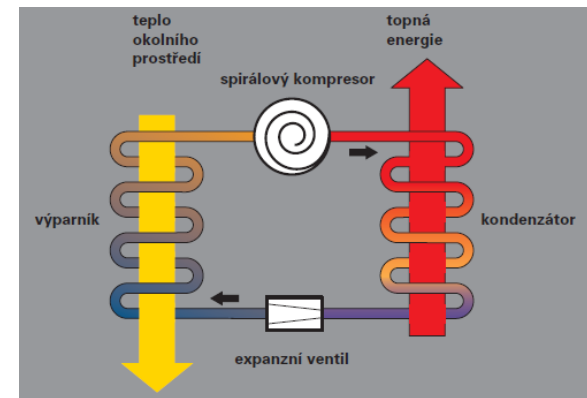
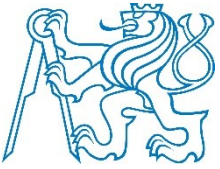


Základy tepelných čerpadel

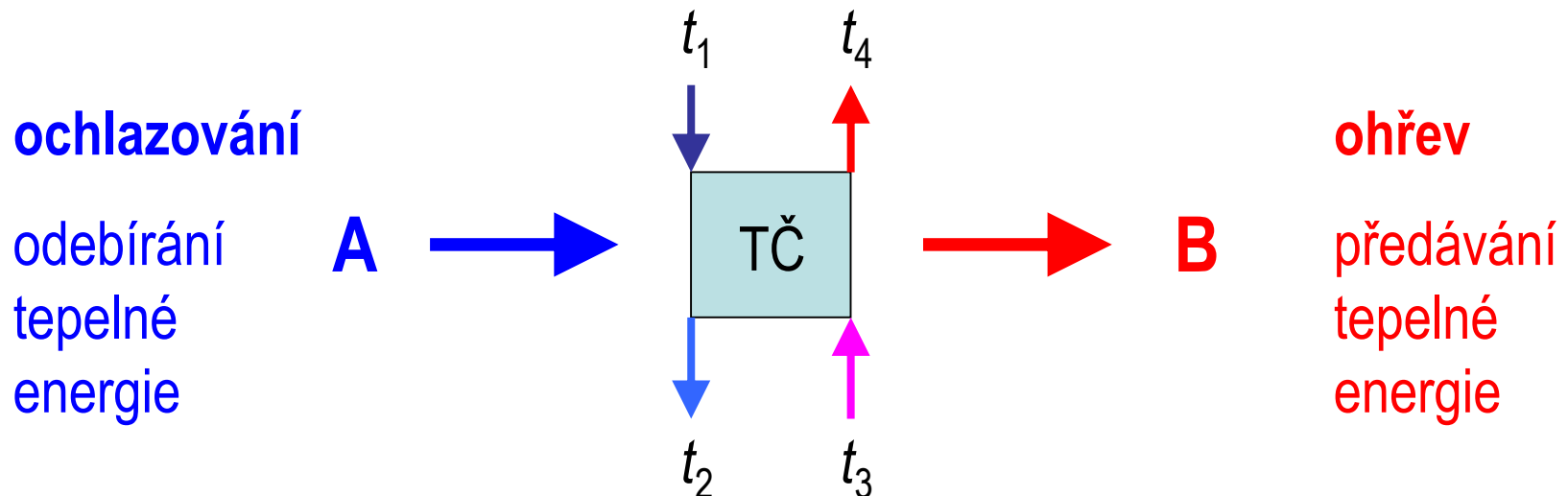
- princip přečerpávání tepla
- základní oběhy
- hlavní součásti tepelných čerpadel

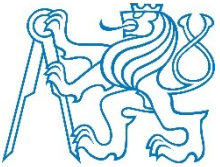




Tepelná čerpadla

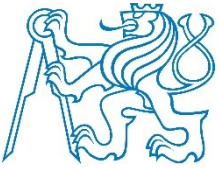
- zařízení, která umožňují:
 - cíleně **čerpat** tepelnou energii z prostředí **A** o **nízké** (= **nevyužitelné**) teplotě (anergie)
a zároveň
 - **předávat** ji do prostředí **B** při **vyšší** (= **využitelné**) teplotě





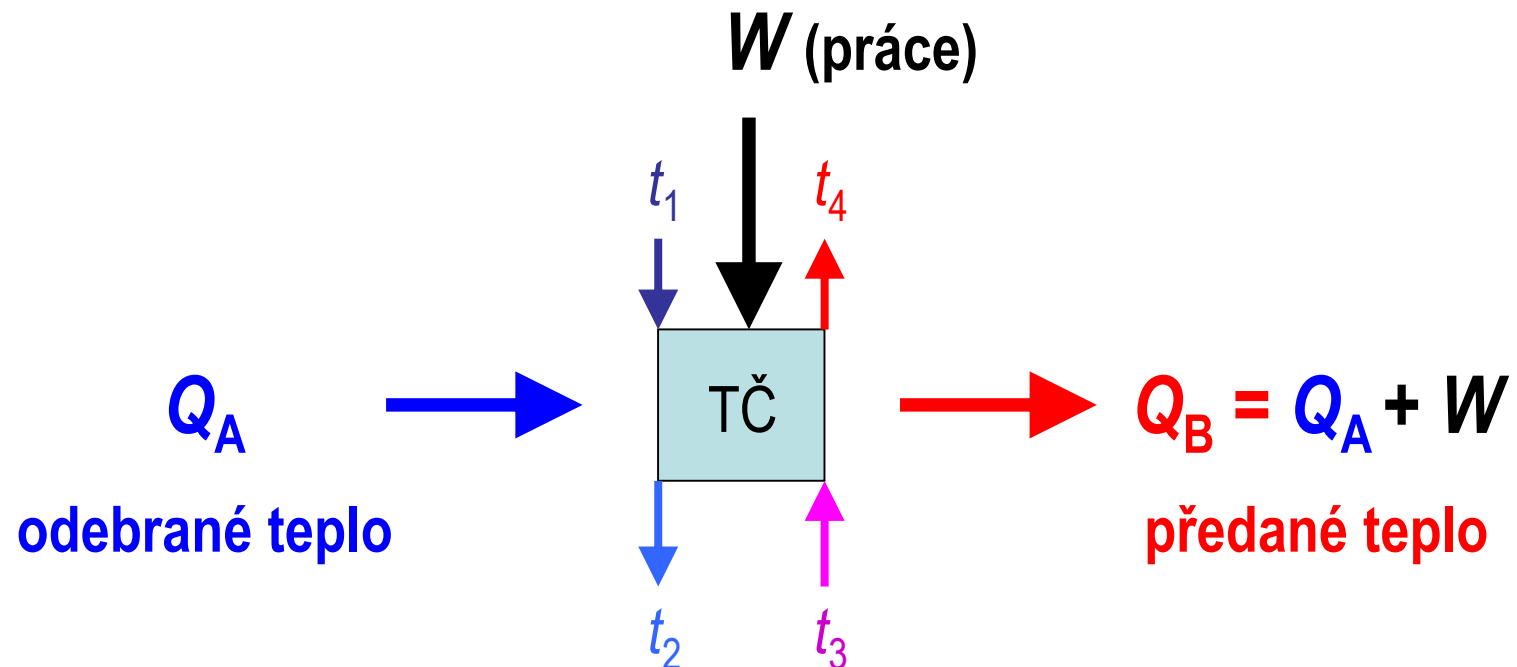
Tepelná čerpadla – základní principy

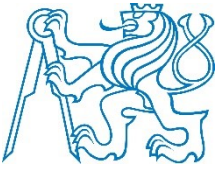
- 2. zákon termodynamiky (růst entropie, nevratnost tepelných pochodů):
 - „tepelná energie nemůže samovolně přecházet z prostředí o nižší teplotě do prostředí o vyšší teplotě“
 - děj lze uskutečnit pouze za přívodu vnější energie o vyšší kvalitě (potenciálu, teplotě)
- vysokopotenciální energie
 - elektrická (elektromotor)
 - mechanická (hřídel motoru, převod)
 - tepelná o **vyšší teplotě** než je teplota, na kterou se přečerpává (plynový hořák)



Tepelná čerpadla – základní principy

- přecherpávání tepla:
 - pohonná vysokopotenciální energie W degraduje a přechází s přecherpávanou energií do prostředí **B**





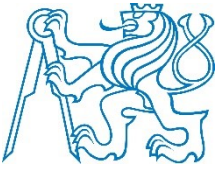
Zařízení pro přečerpávání tepla

- **chladicí zařízení**

- využívají primárně chladicího jevu
- užitečným teplem je teplo odebírané prostředí A (snižuje jeho teplotu)
- nevyužitým teplem je teplo odváděné do prostředí B (odpadní teplo)

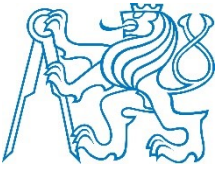
- **tepelné čerpadlo**

- účelně využívá teplo předávané do prostředí B
- rozdíl není v principu, ale v charakteru využití tepla
- nelze však jednoduše směřovat s ohledem na odlišnosti v konstrukci prvků obou zařízení



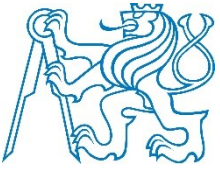
Zařízení pro přečerpávání tepla

- **tepelné oběhy (cykly)**
 - pracovní látka prochází změnami stavu a vrací se do výchozího
 - znázornění oběhu v diagramech pracovní látky
- **pravotočivý oběh**
 - teplo se přeměňuje na práci (tepelné motory)
- **levotočivý oběh**
 - přečerpávání tepla, chladicí oběh



Tepelné oběhy pro přečerpávání tepla

- **parní oběh**
 - pohonná energie: mechanická, elektrická
 - kompresorová TČ: elektrický kompresor, plynová turbína
- **sorpční oběh**
 - pohonná energie: tepelná
 - sorpční TČ: absorpční (plynová), adsorpční (plynová)
- **proudový oběh**
 - pohonná energie: tepelná



Náročnost přečerpávání tepla

topný faktor

coefficient of performance

COP

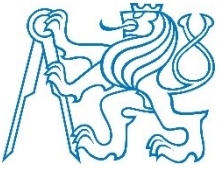
$$COP = \frac{Q_B}{W}$$

chladicí faktor

energy efficiency ratio

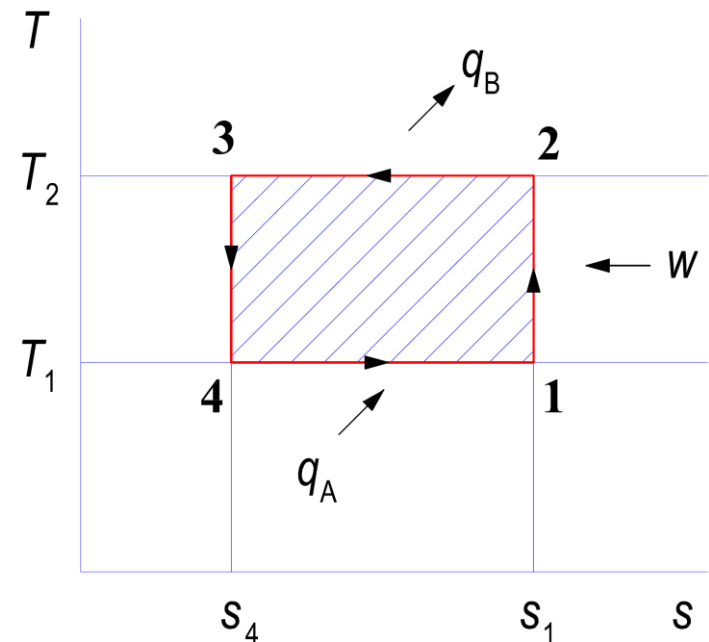
EER

$$EER = \frac{Q_A}{W}$$



Carnotův oběh

- **teoretický oběh**
 - vratný (ideální)
 - tepelně nejúčinnější typ oběhu
 - nelze jej v reálném zařízení uskutečnit
- **izoentropické změny ($s = \text{konst.}$)**
 - komprese, expanze
- **izotermické změny ($T = \text{konst.}$)**
 - přívod tepla, odvod tepla





Carnotův oběh

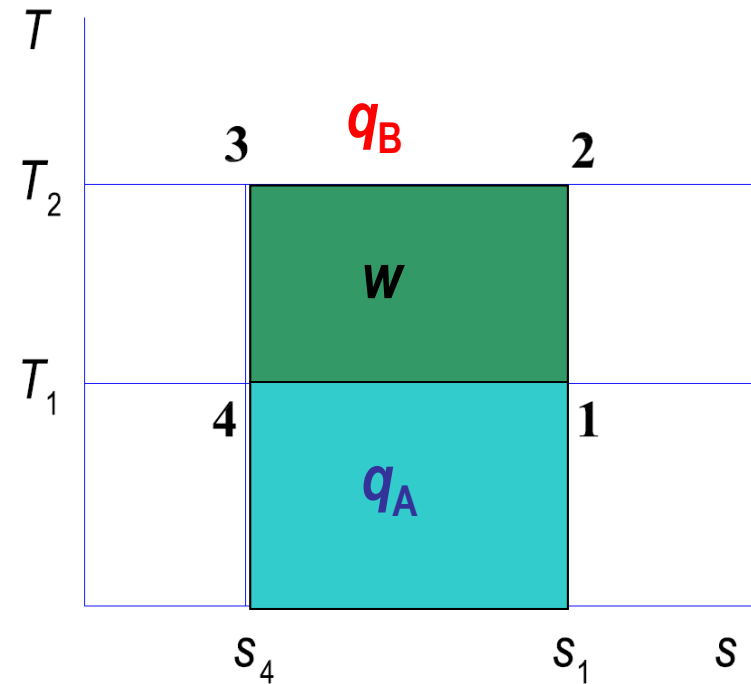
měrné energie

$$q_A = q_{41} = T_1 \cdot (s_1 - s_4)$$

$$q_B = q_{23} = T_2 \cdot (s_1 - s_4)$$

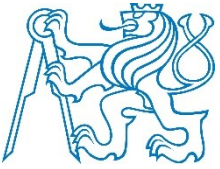
[J/kg]

$$w = q_B - q_A = (T_2 - T_1) \cdot (s_1 - s_4)$$



$$COP_C = \frac{q_B}{w} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

$$EER_C = \frac{q_A}{w} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = COP_C - 1$$



Carnotův oběh

- **nereálný oběh – nezohledňuje:**
 - konečnou velikost teplosměnných ploch
 - reálné vlastnosti pracovních látek (chladičů)
 - skutečnou účinnost zdroje pohonné energie (neizoentropický zdroj)
 - tepelné ztráty do okolí
 - potřebu pohonné energie pro pomocná zařízení
- **skutečný topný faktor – srovnání s Carnotem**

$$COP_{TČ} = \eta_{TČ} \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

srovnávací účinnost $\eta_{TČ} = 0,4$ až $0,6$

malé výkony

velké výkony

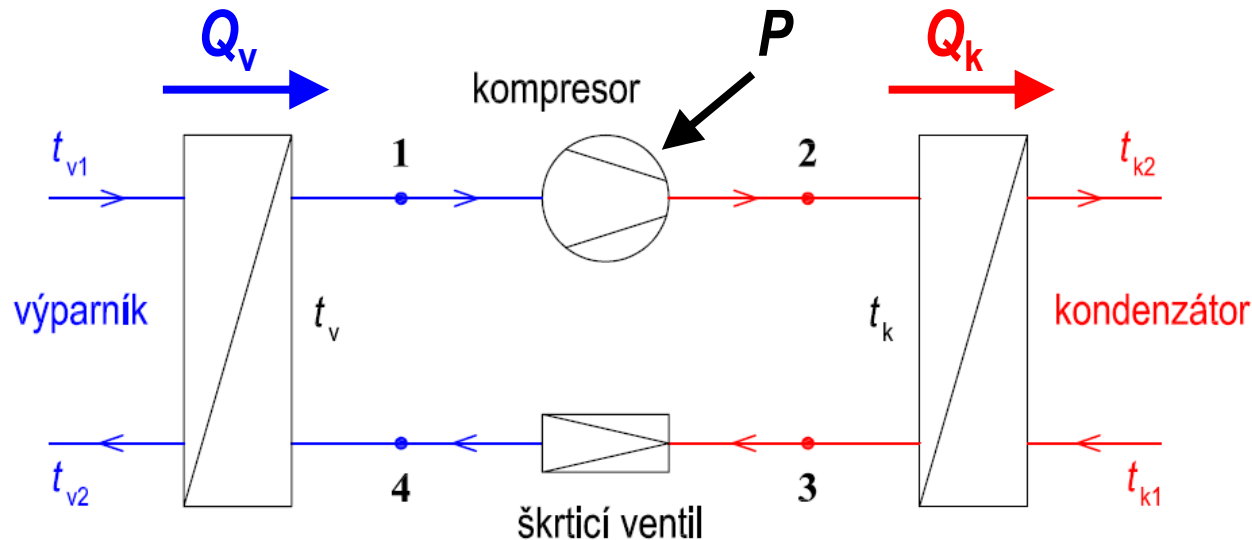


Parní oběh

- nejrozšířenější oběh, naprostá většina tepelných čerpadel
- 1) odnímání tepla při **nízké** teplotě a **nízkém** stálém tlaku změnou skupenství (vypařováním) pracovní látky ve **výparníku**
- 2) odsávání par a jejich stlačování **kompresorem**
 - zvýšení tlaku = zvýšení teploty změny skupenství pracovní látky
- 3) předávání tepla při **vysoké** teplotě a **vysokém** stálém tlaku změnou skupenství (kondenzací) pracovní látky v **kondenzátoru**
- 4) pokles tlaku (expanze) v **expanzním (škrticím) ventilu**
 - snížení tlaku = snížení teploty změny skupenství pracovní látky



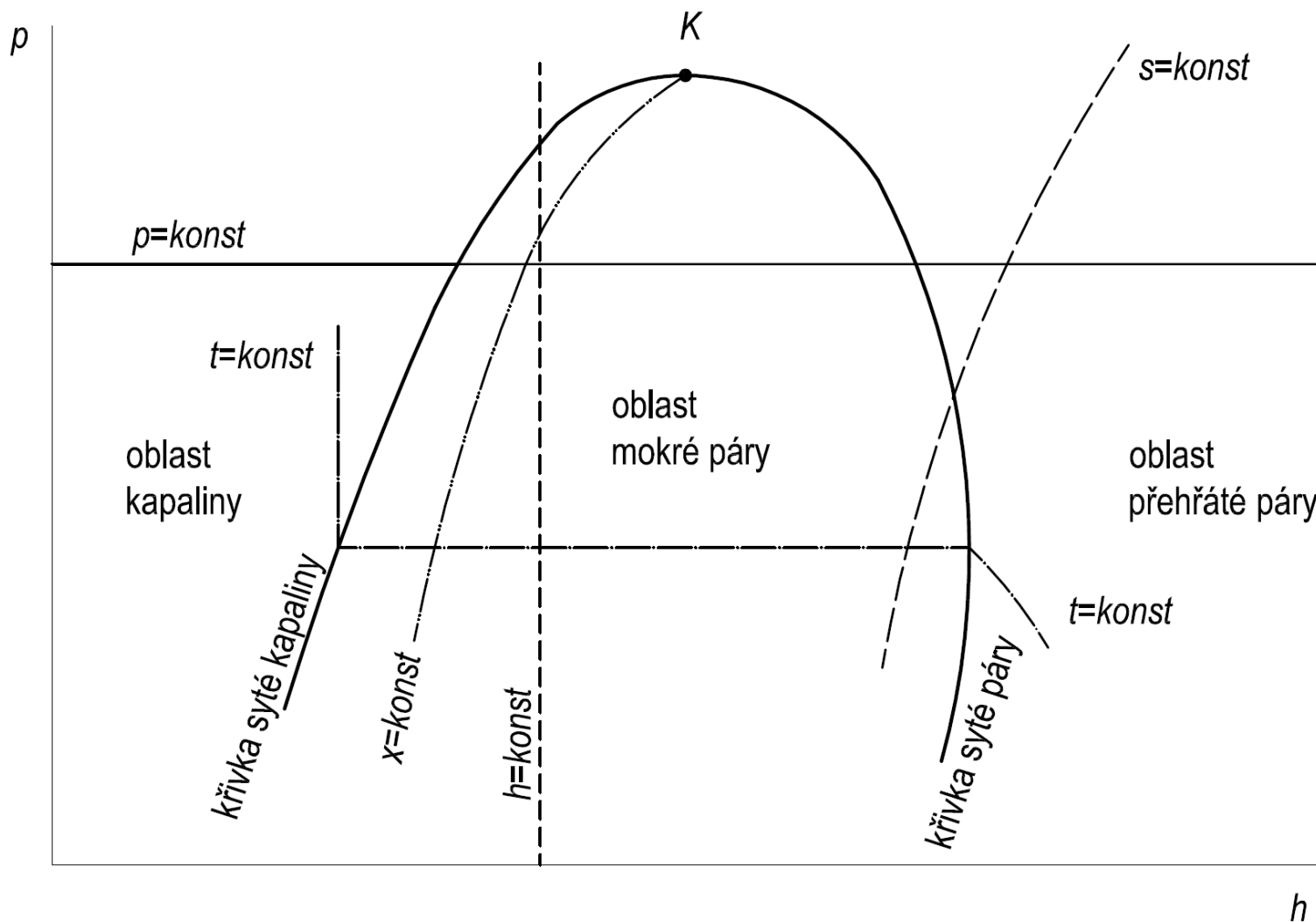
Parní oběh



- 4-1: vypařování při nízkém vypařovacím tlaku p_v a teplotě $t_v < t_{v2}$, ochlazení
- 1-2: komprese na vyšší kondenzační tlak p_k
- 2-3: ochlazení par a kondenzace při tlaku p_k a teplotě $t_k > t_{k2}$, odvedení přečerpaného tepla z kondenzátoru, ohřev
- 3-4: škrticí ventil pro udržení rozdílu tlaků mezi V a K

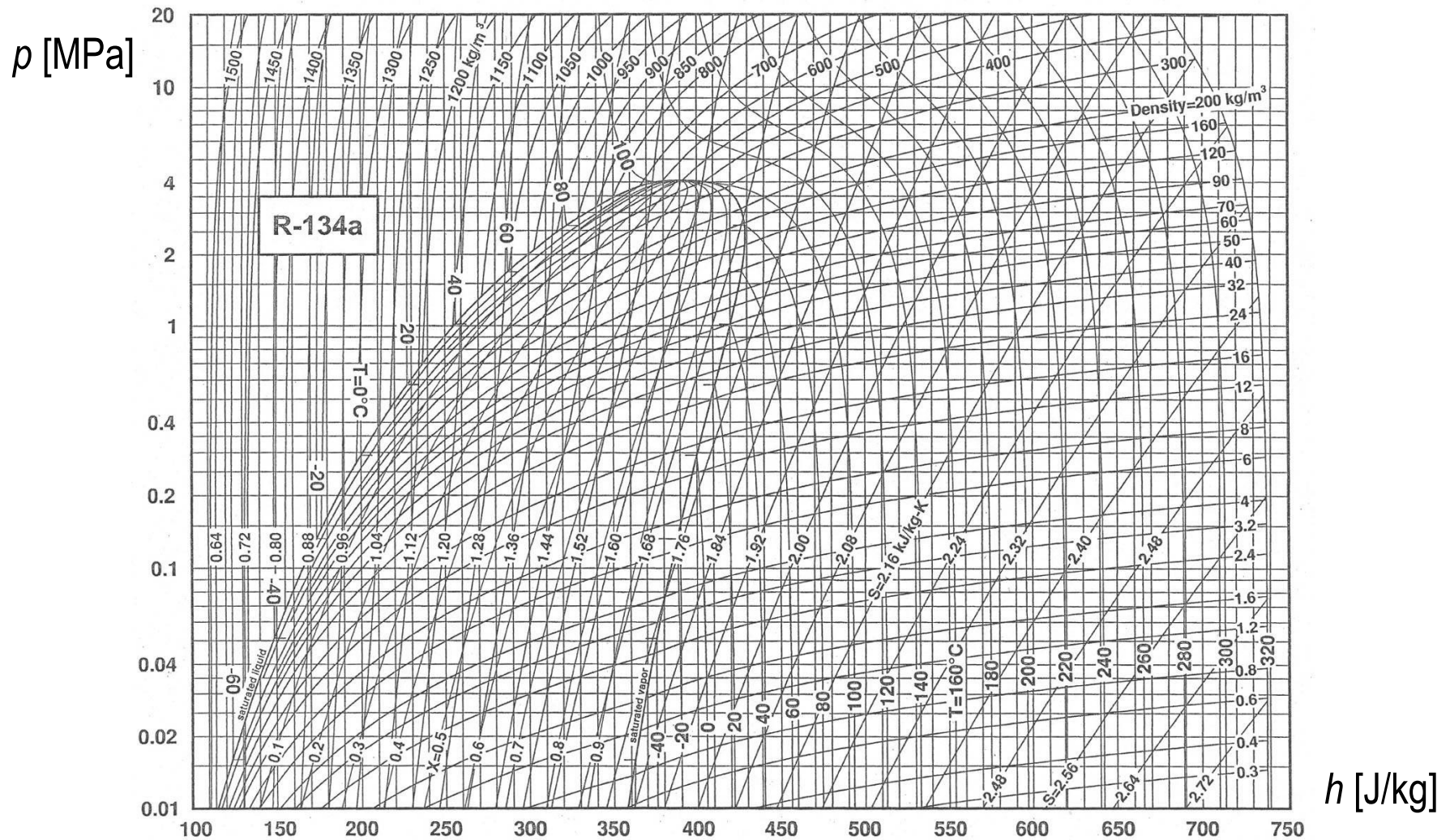


Pracovní látka – reálné chladivo





Pracovní látka – reálné chladivo





Rankinův oběh

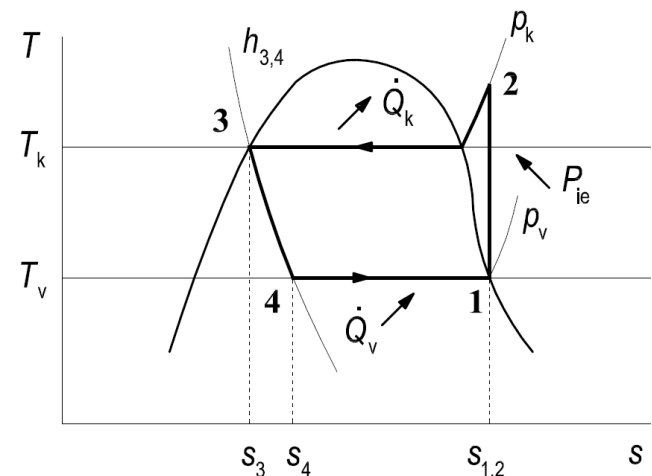
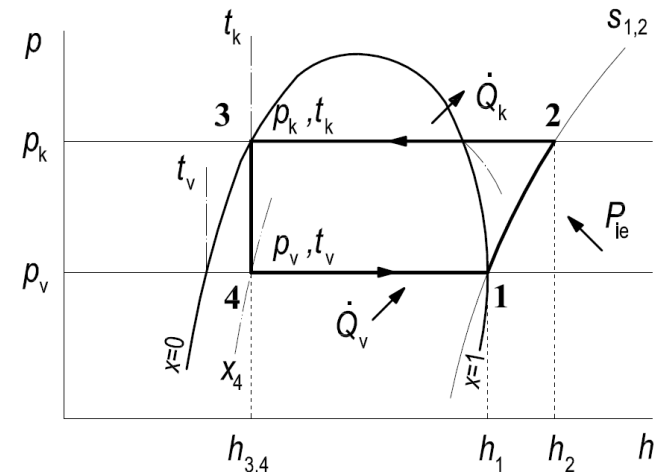
- parní oběh s reálnou pracovní látkou (chladičem) – idealizovaný Rankinův oběh

4-1: **izobarické vypařování** na mez syté páry

1-2: **izoentropická komprese** syté páry na přehřátou páru

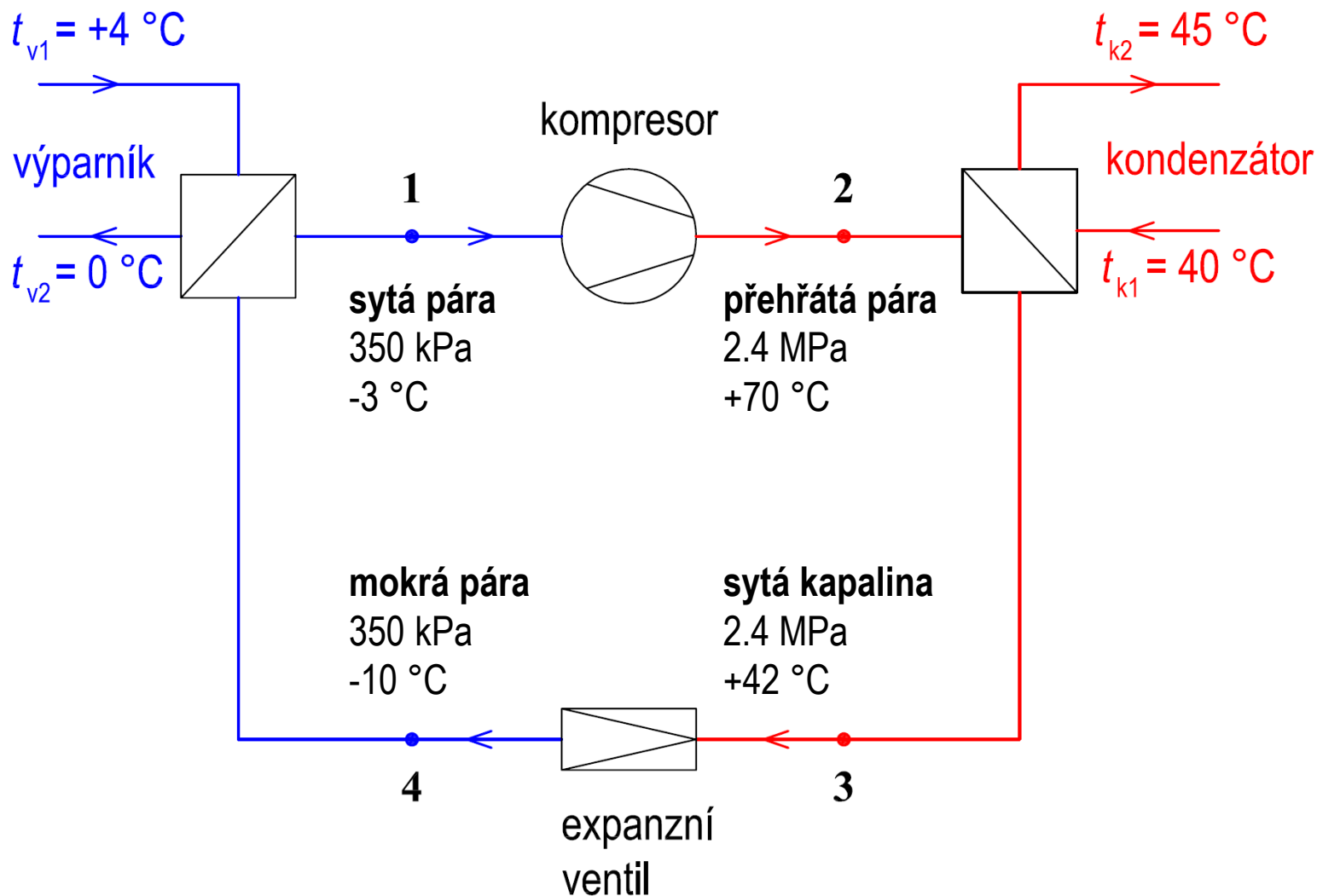
2-3: **izobarické ochlazení** přehřátých par na mez sytosti a následná kondenzace na mez syté kapaliny

3-4: **izoentalpické škrcení** na mokrou páru, snížení tlaku škrcením, nekoná se práce, nepřivádí se teplo = nemění se entalpie (adiabatické škrcení)





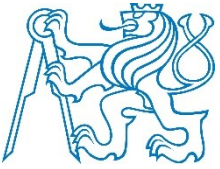
Rankinův oběh





Skutečný oběh x Rankinův oběh

- idealizovaný Rankinův oběh předpokládá:
 - žádné podchlazení nebo přehřátí chladiva, stavy chladiva na mezi sytosti
 - nulové tlakové ztráty v oběhu chladiva (potrubí, výměníky)
 - dokonale tepelně izolované tepelné čerpadlo, eliminace sdílení tepla s okolím
 - izoentropická = bezztrátová komprese
- Rankinův oběh není technicky zcela realizovatelný, odchylky od skutečného oběhu jsou malé

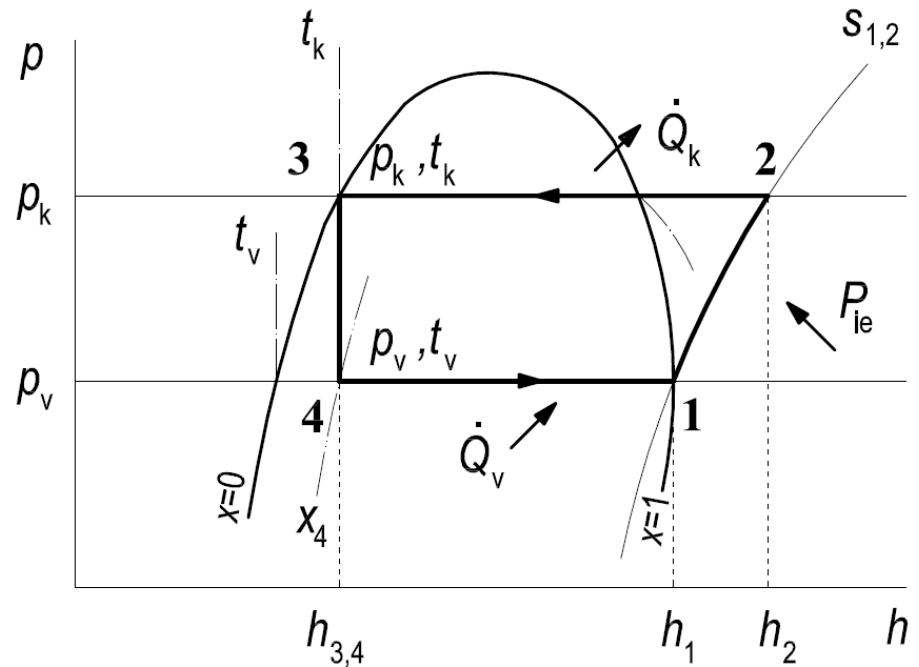


Bilance Rankinova oběhu

$$\dot{Q}_v = \dot{M}_{ch} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_k = \dot{M}_{ch} \cdot (h_2 - h_4)$$

$$P_{ie} = \dot{M}_{ch} \cdot (h_2 - h_1)$$



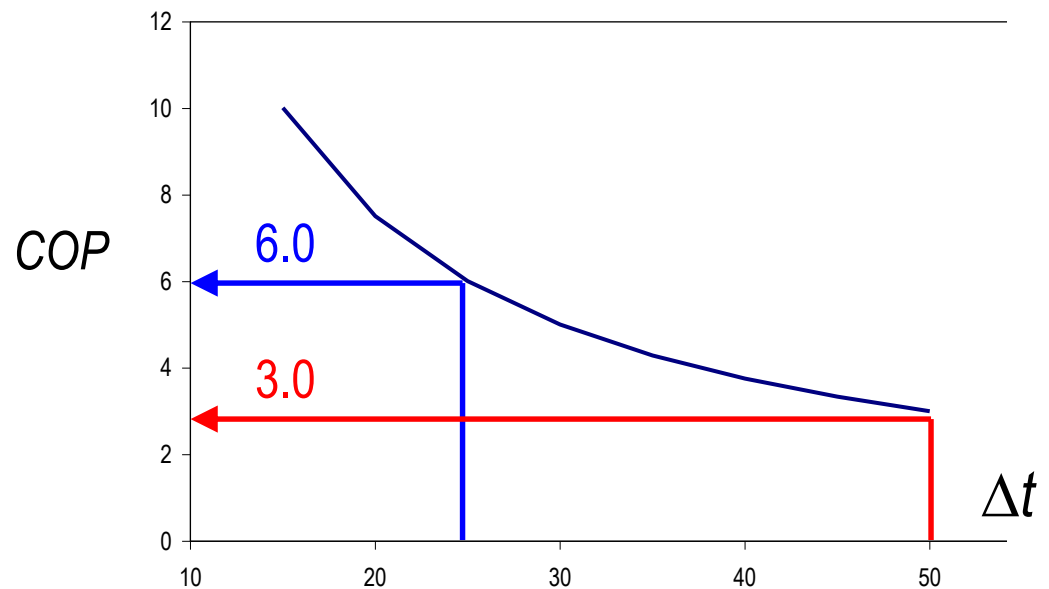
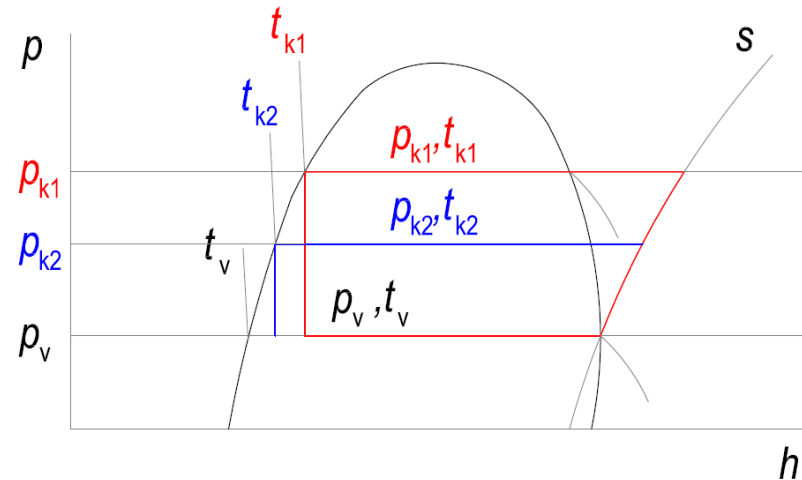
$$COP_R = \frac{\dot{Q}_k}{P_{ie}} = \frac{h_2 - h_4}{h_2 - h_1}$$

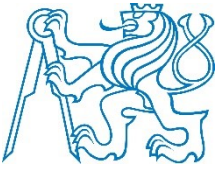
$$EER_R = \frac{\dot{Q}_v}{P_{ie}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$



Topný faktor závislý na teplotách

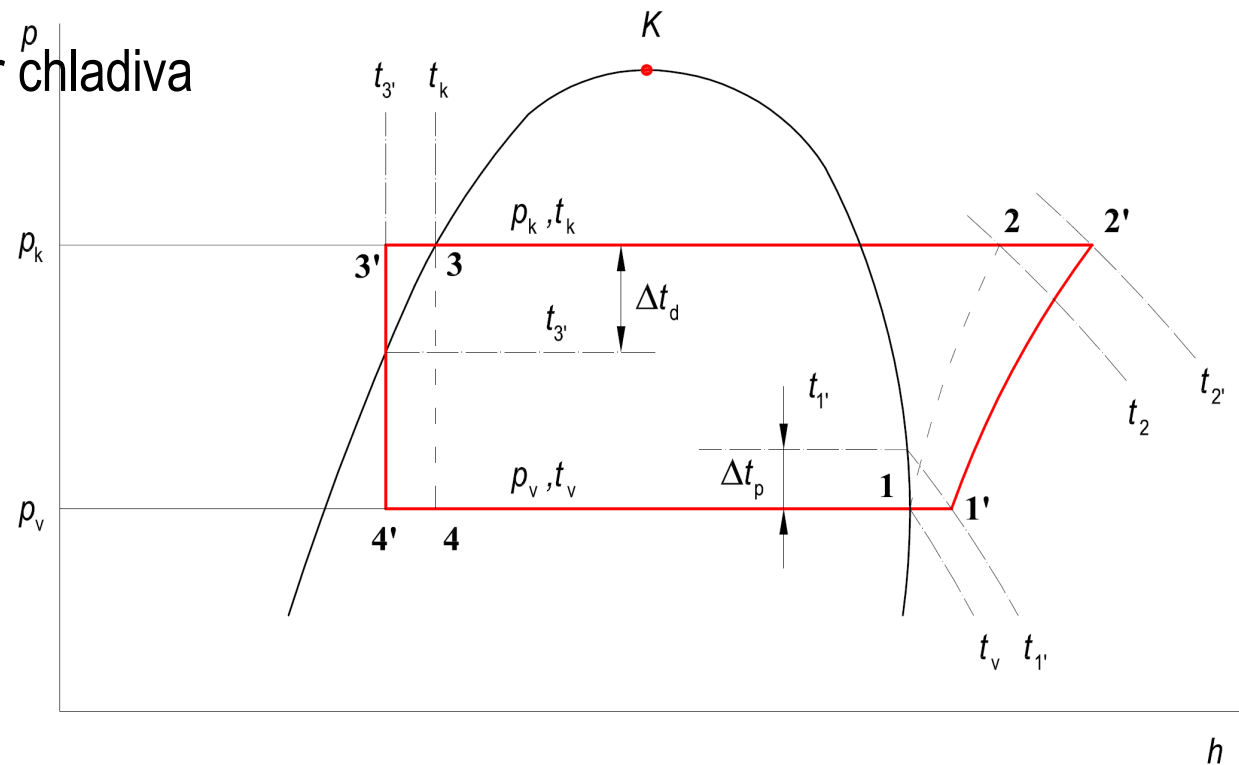
- t_k - dána okruhem spotřeby
- otopnou soustavou
(tělesa, podlahové vytápění, VZT, TV)
- t_v - dána teplotou
ochlazovaného prostředí
(země, vzduch, povrch.
voda, podzemní voda)
- typ **chladiwa**
- typ **kompresoru**





Skutečný oběh

- odchyluje se od Rankinova oběhu v:
 - přehřívání par chladiva
 - podchlazení kapalného chladiva
 - kompresi par chladiva





Přehřívání par chladiva

- kompresor nasává již přehřátou páru o Δt_p
- přehřátí je výhodné (oproti chladicím zařízením) – vyšší topivost
- přehřáté páry na sání kompresoru = nižší opotřebení, delší životnost
- k přehřátí dochází:
 - funkcí termostatického expanzního ventilu
 - přívodem tepla z okolí = tepelnými zisky do potrubí mezi V a C
 - v tělese hermetického kompresoru teplem odváděným z motoru
 - zvláštní výměník za výparníkem, přehřívání vnějším zdrojem
 - **vnitřní rekuperací tepla** ve výměníku za výparníkem (párou se podchlazuje kapalné chladivo)

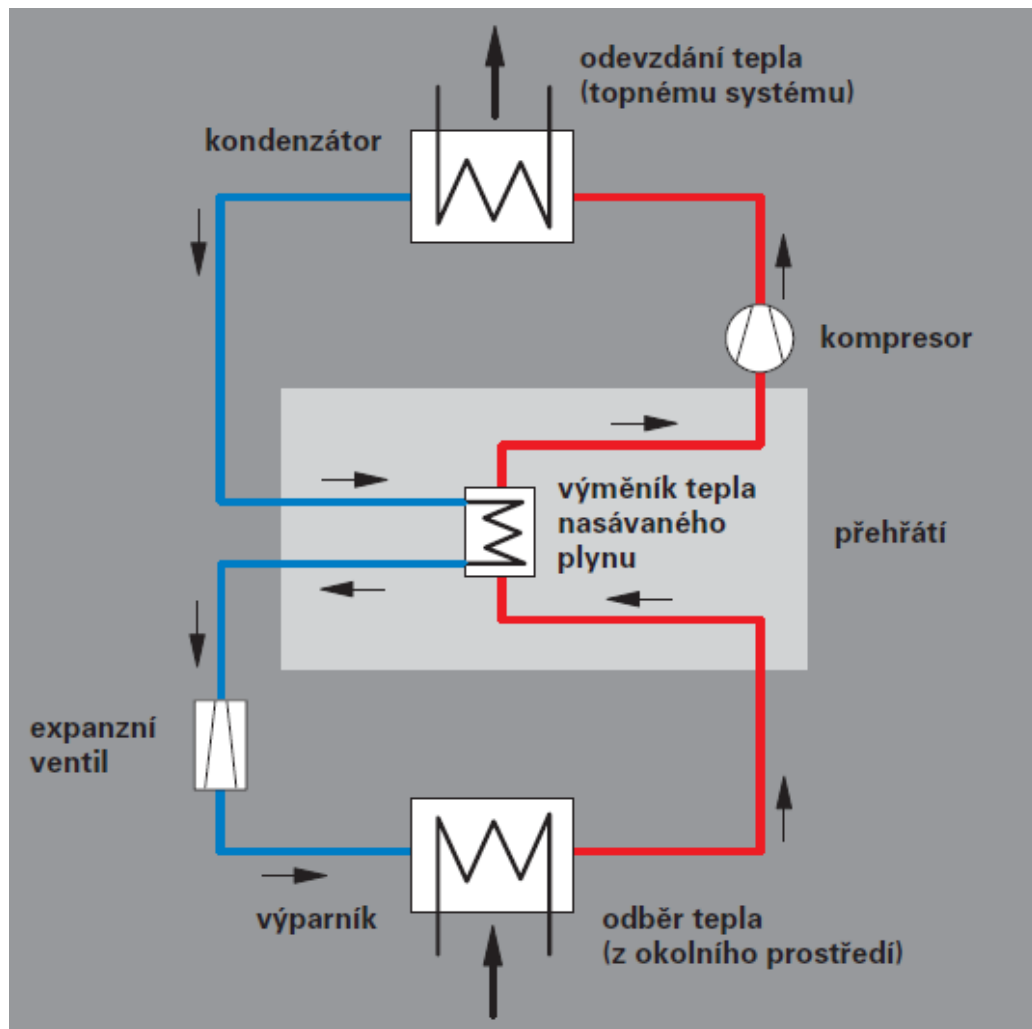


Podchlazení kapalného chladiva

- podchlazení kapalného chladiva pod křivku syté kapaliny o Δt_d
- k podchlazení dochází účelně pro:
 - pro správnou funkci termostatického expanzního ventilu – podchlazení zajišťuje přítok kapalného chladiva = stabilizovaná funkce, minimalizace kavitace, delší životnost
 - zvýšení hospodárnosti oběhu – zvýšení topivosti, **vnitřní rekuprace parou** vystupující z výparníku



Vnitřní rekuperace tepla



- přehřátí páry nasávané kompresorem
- podchlazení kapaliny do expanzního ventilu
- zvýšení topného faktoru
- zvýšení životnosti tepelného čerpadla



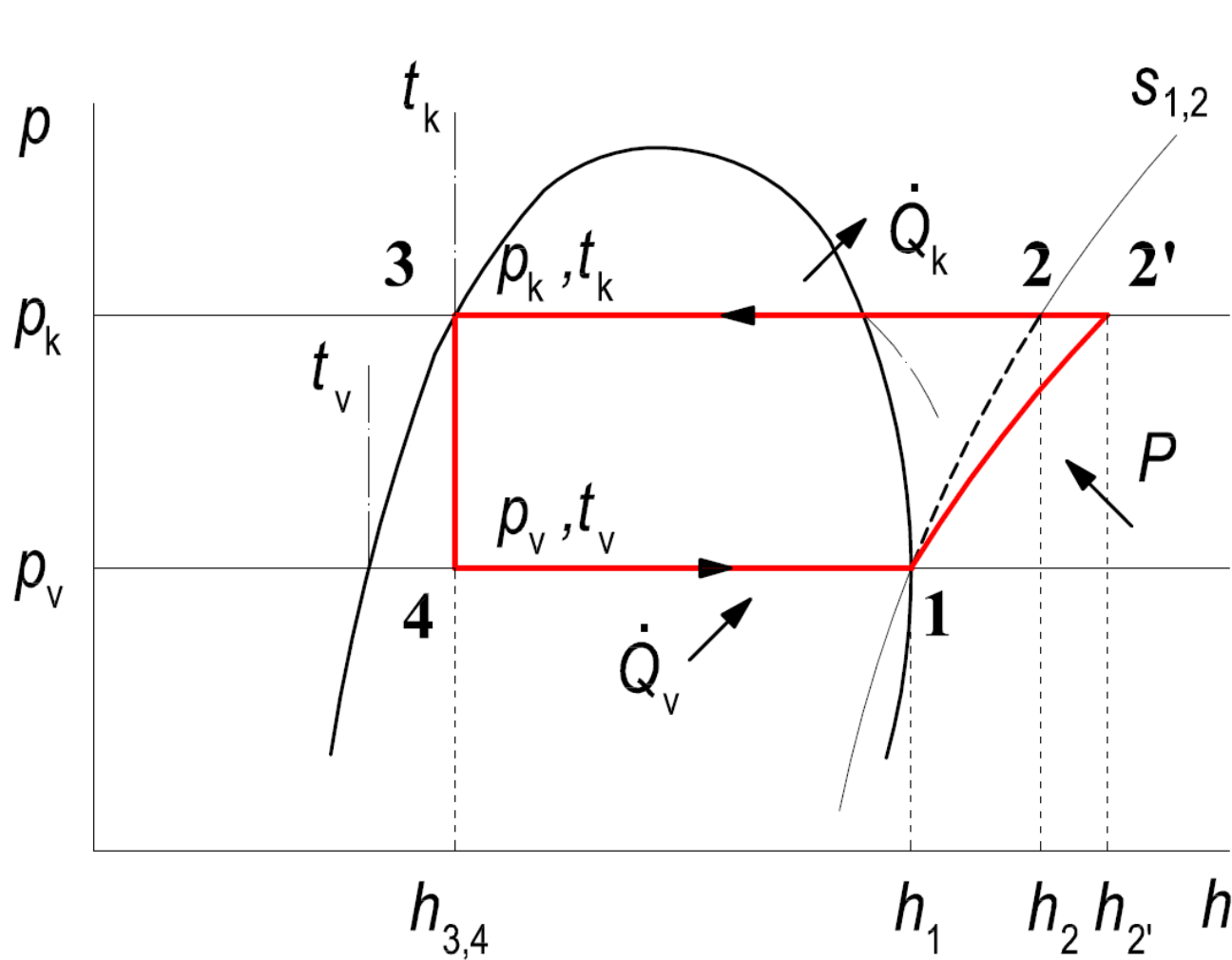
Reálná komprese

- komprese par chladiva není izoentropická (bezeztrátová)
 - nasávání par: páry se ohřívají o stěny válce a pístu (entropie klesá)
 - vytlačování par: teplota přehřátých par je vyšší a teplo je z chladiva odváděno do stěn válce a pístu, tepelné ztráty (entropie roste)
- **polytropická komprese**: zvýšení energetické náročnosti skutečnými pochody v kompresoru
- izoentropická účinnost

$$\eta_{ie} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1} = \frac{P_{ie}}{P_i} = \frac{\text{teoretický izoentropický příkon}}{\text{vnitřní indikovaný příkon}}$$



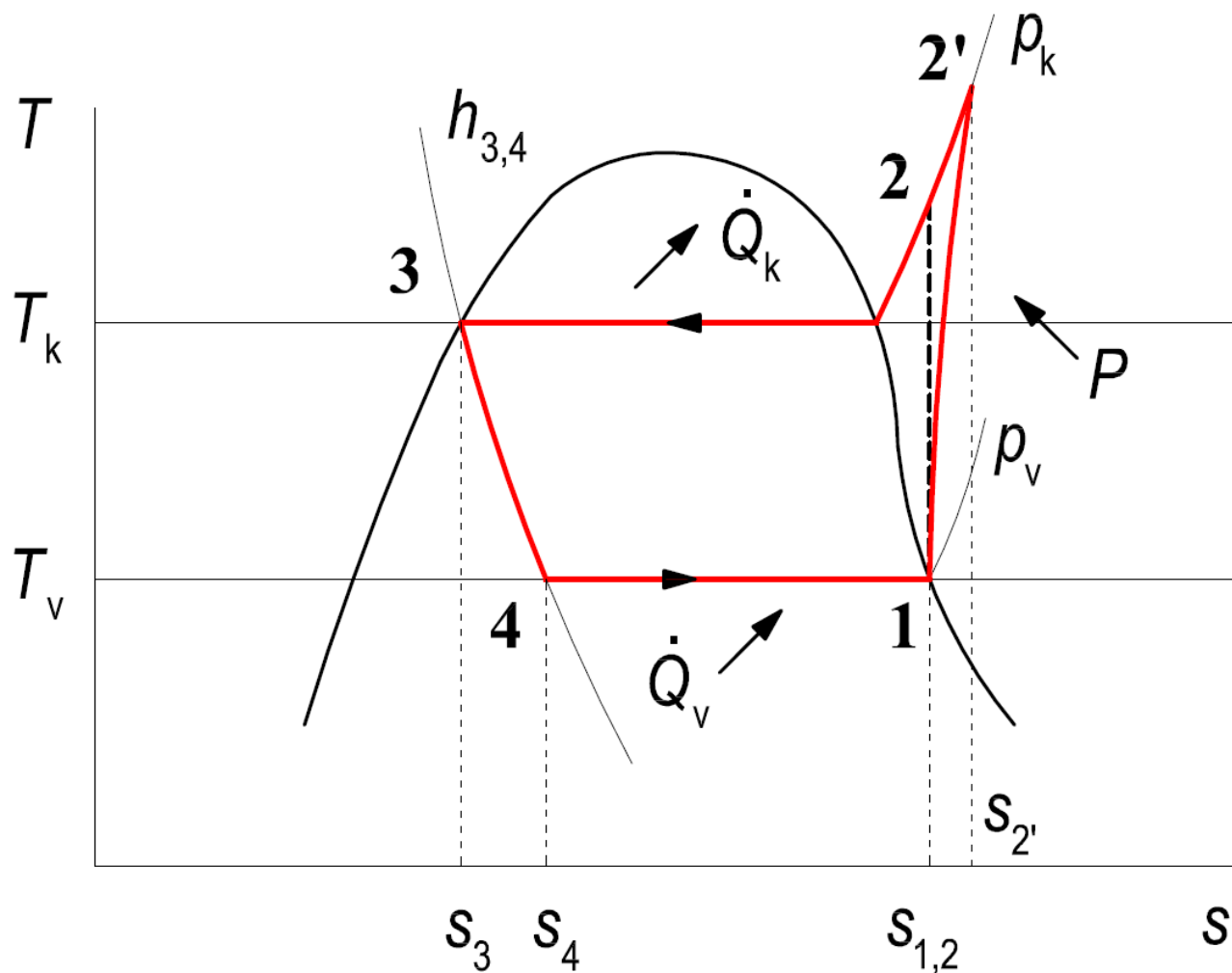
Reálná komprese



$$\eta_{ie} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$$



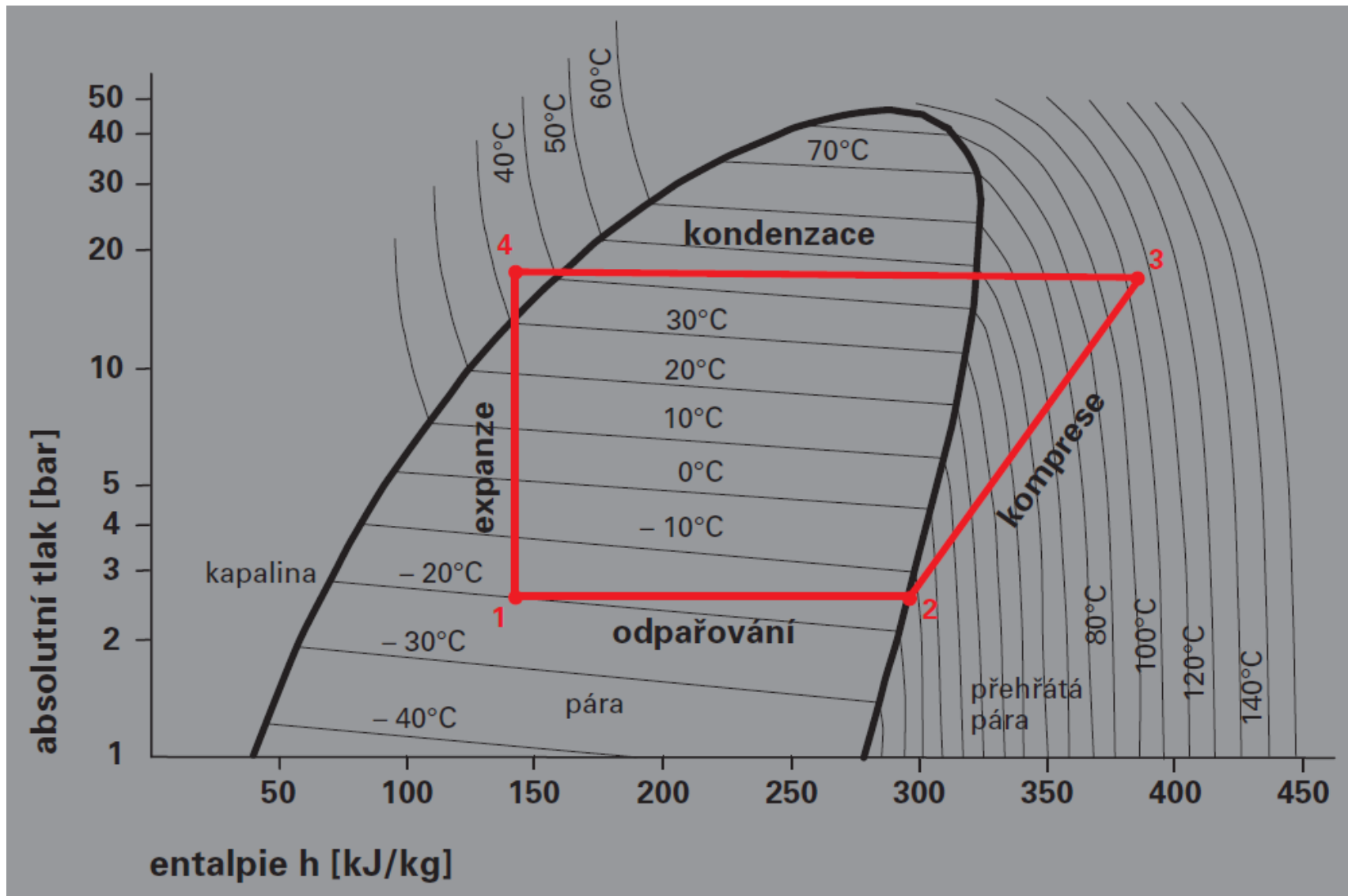
Reálná komprese



$$\eta_{ie} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$$



Reálná komprese





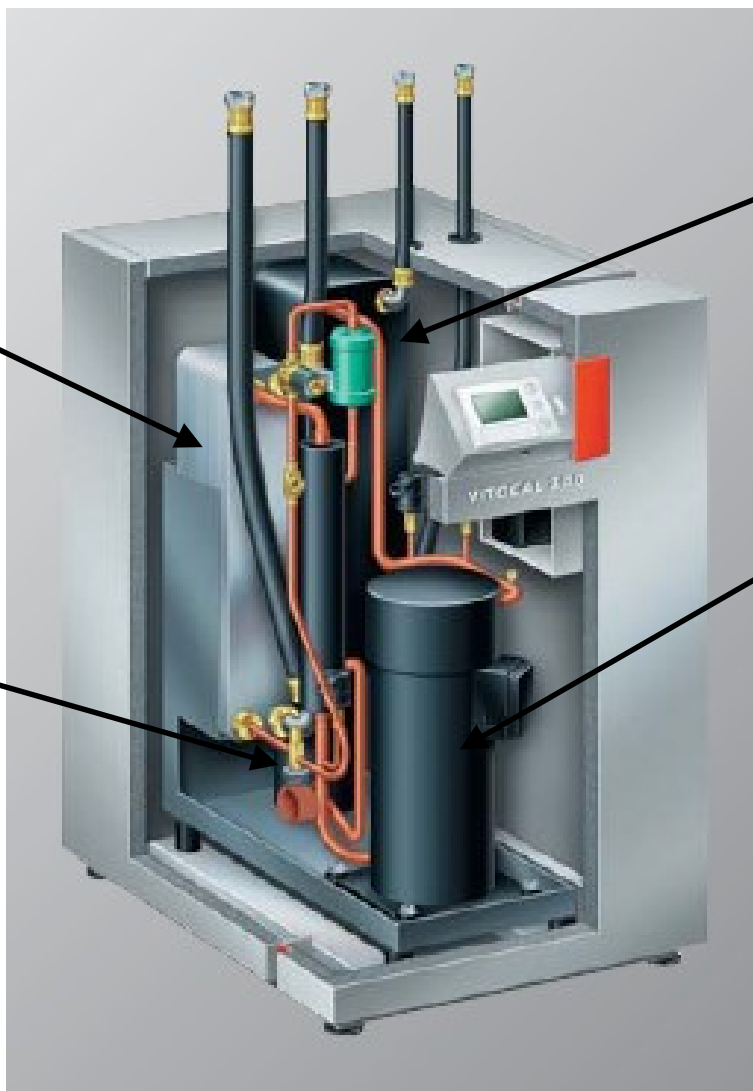
Prvky tepelného čerpadla

výparník

expanzní
ventil

kondenzátor

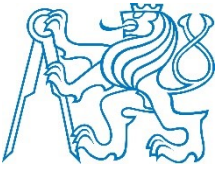
kompresor





Kompresor

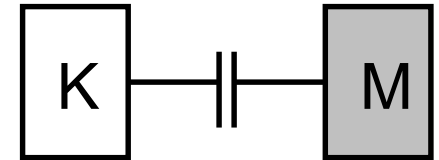
- nasává přehřáté páry z výparníku při tlaku na sání p_v a stlačuje je na kondenzační tlak p_k
- požadavky:
 - funkce v požadovaném rozsahu tlaků a teplot
 - provozní spolehlivost
 - dlouhodobá životnost
 - minimální údržba
 - nízká hlučnost



Kompresor - provedení

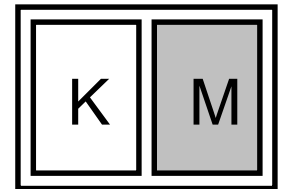
■ oddělené

- pohonný motor je od kompresoru oddělen převodem
- hřídel je v kompresorové skříni těsněna ucpávkou
- velká zařízení
- tepelné ztráty motoru se nepodílí na oběhu



■ hermetické

- motor a kompresor v hermeticky uzavřené tlakové nádobě
- ztráty (elektro)motoru se podílí na bilanci oběhu
vinutí je chlazeno nasávanými parami chladiva
přehřívání par na sání kompresoru

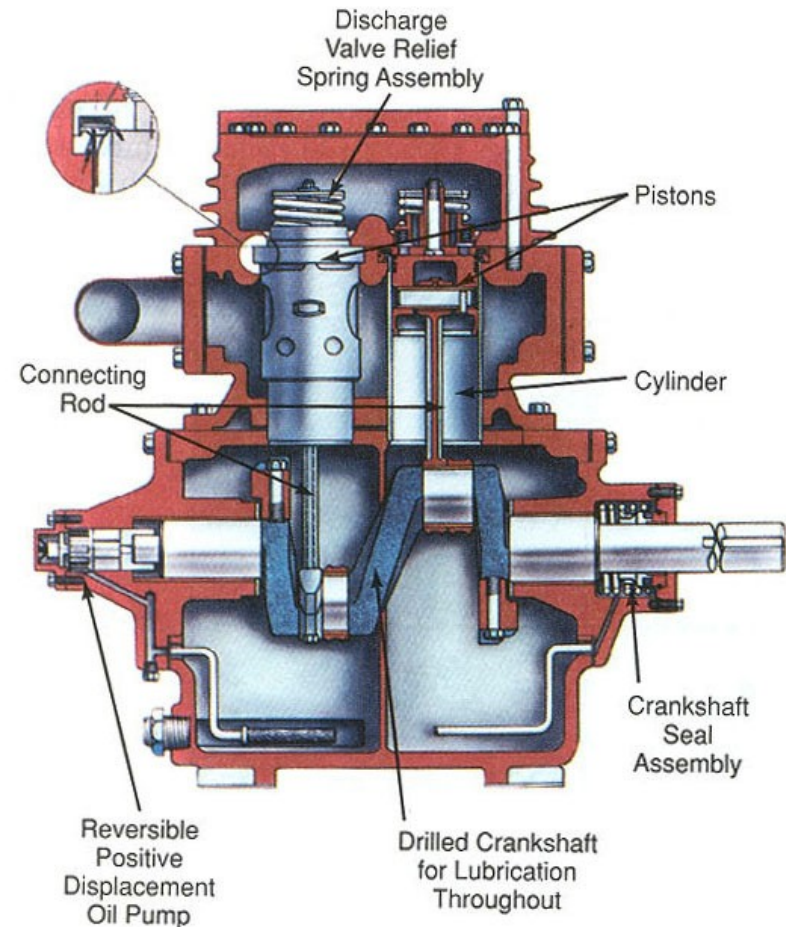




Kompresor - konstrukce

■ pístové kompresory

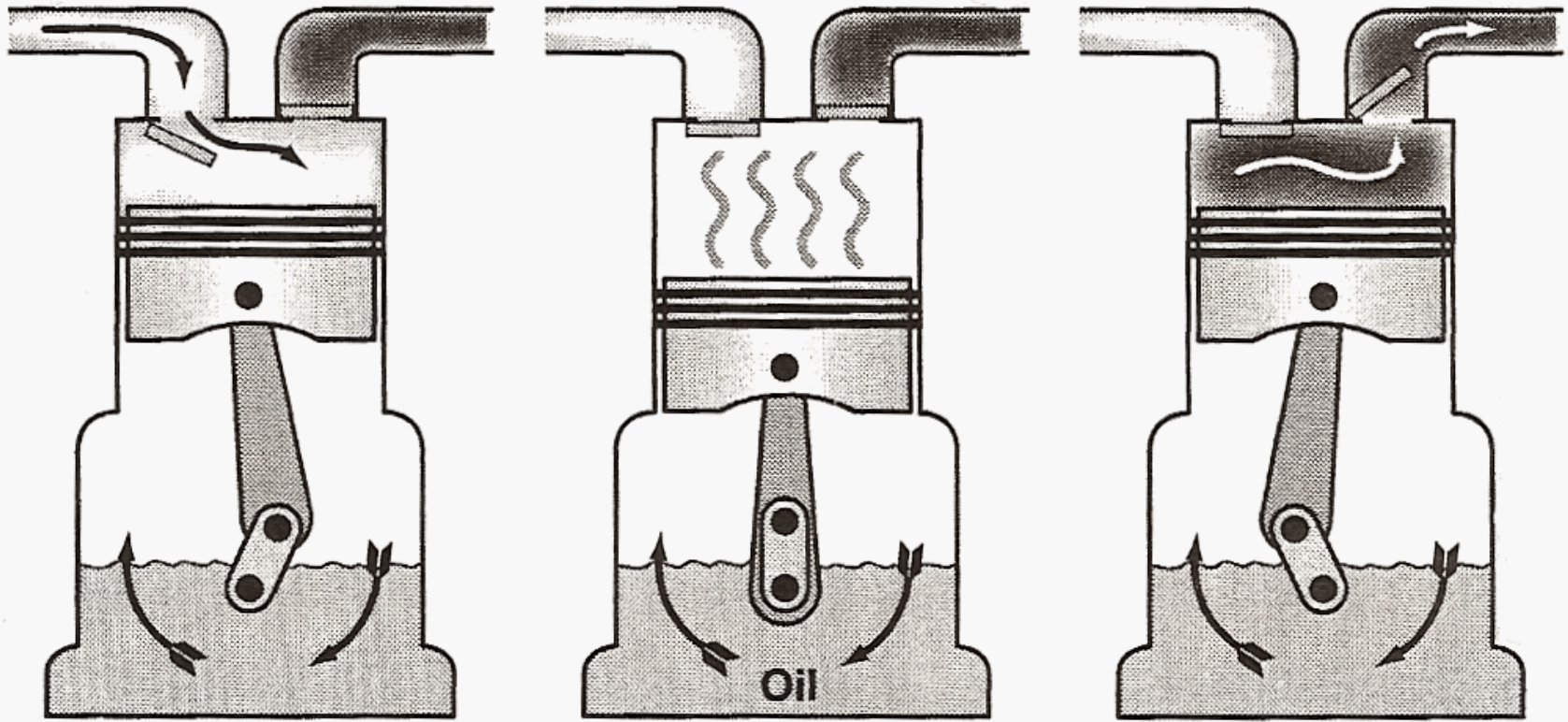
- nejstarší typ
- páry chladiva nasávány přes sací ventil
- sací ventily se zavřou, stlačování par ve válci
- přehřáté páry vytlačeny přes výtlačné ventily při dosažení požadovaného tlaku
- negativní vliv škodlivého prostoru válce, vliv na účinnost kompresoru





Kompresor - konstrukce

pístové kompresory - funkce





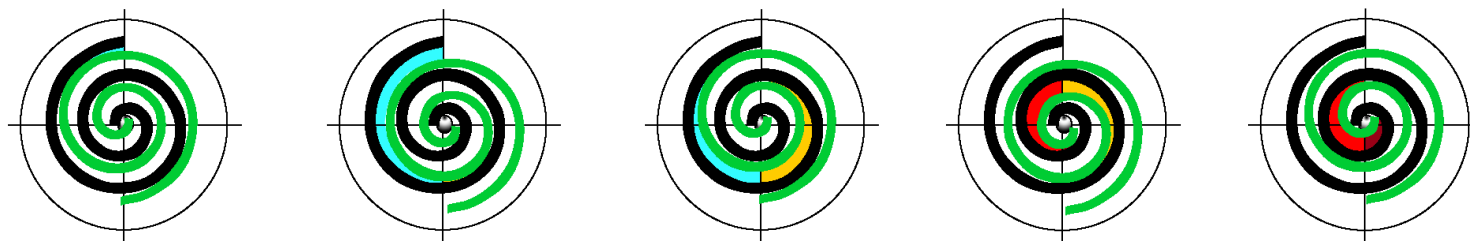
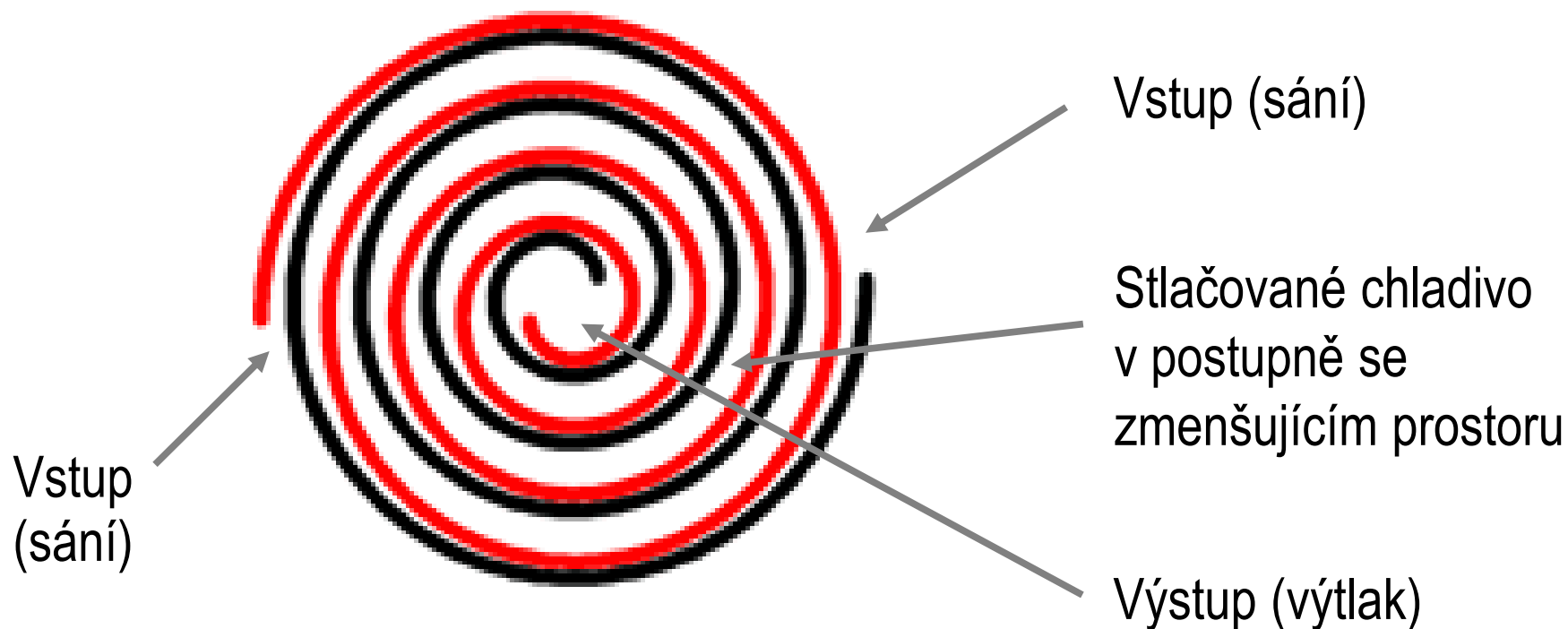
Kompresor - konstrukce

- **rotační spirálové kompresory (scroll)**
 - pracovní cyklus nasávání, stlačování a výtlačku par chladiva je realizován pohybem pohyblivé spirály vůči statické spirále
 - plynulá změna kompresního prostoru
 - sání je na obvodu, výtlačk ve středu
 - menší množství pohybujících se částí = vyšší životnost, spolehlivost, menší vibrace, nižší hlučnost
 - eliminace škodlivého prostoru





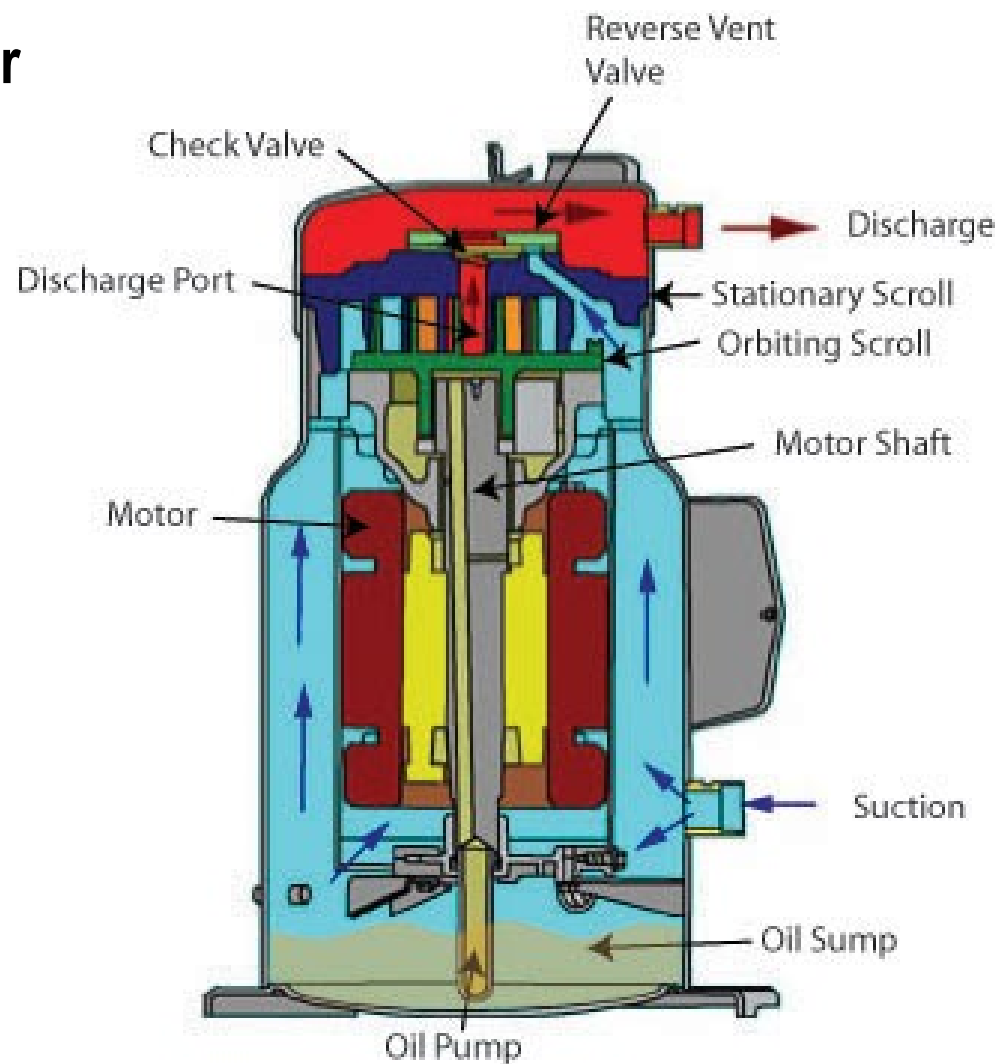
Kompresor - funkce

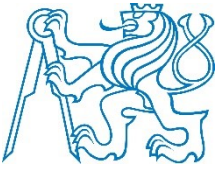




Kompresor - konstrukce

rotační spirálový kompresor





Pohon tepelných čerpadel

- **kompresory** (spirálové, pístové, šroubové)

parní cyklus chladiva

- **el. motor** – oddělené, kompaktní provedení
- **plynová turbína** – využití tepla spalin, totální TČ

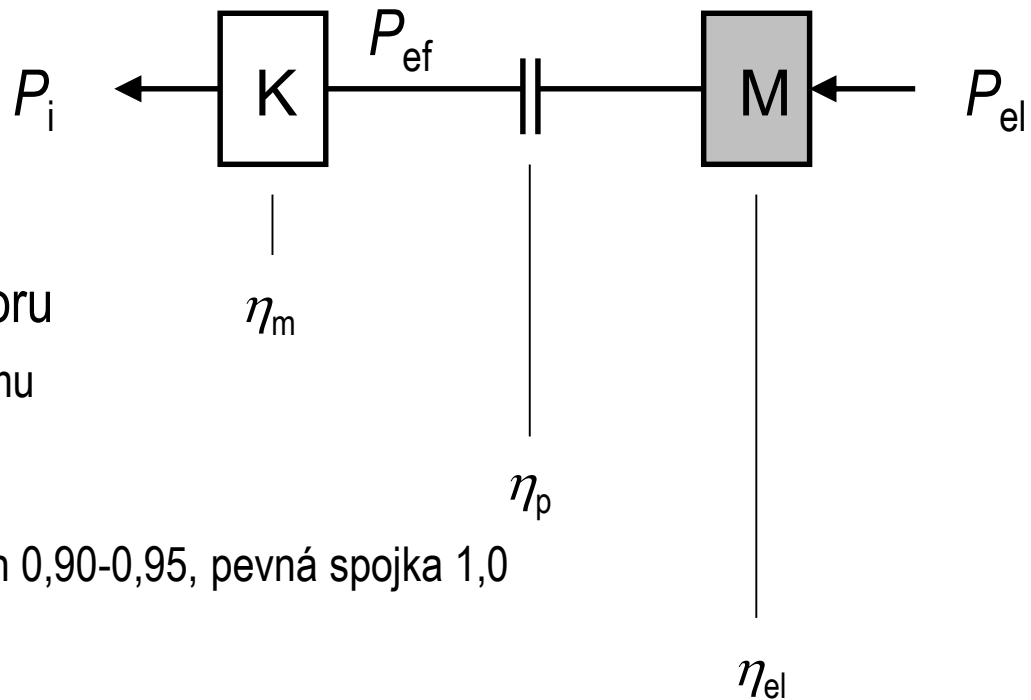
- **absorpční cyklus**

dvojice látek roztok-chladivo (LiBr-H₂O)

- **tepelná energie** (spalování plynu, teplo spalin, solární kolektory)



Elektrický příkon kompresoru



mechanická účinnost kompresoru

třecí ztráty v pohybovém mechanismu

účinnost převodu

třecí ztráty v převodu, klínový řemen 0,90-0,95, pevná spojka 1,0

účinnost elektromotoru

účinnost 0,80-0,90

$$P_{el} = \frac{P_i}{\eta_s} = \frac{P_i}{\eta_m \cdot \eta_p \cdot \eta_{el}} = \frac{P_{ef}}{\eta_p \cdot \eta_{el}}$$

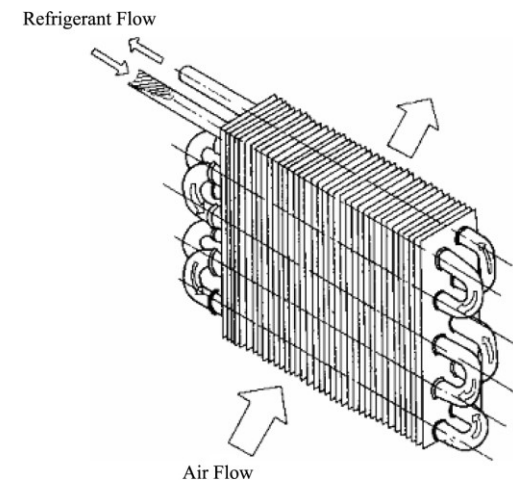
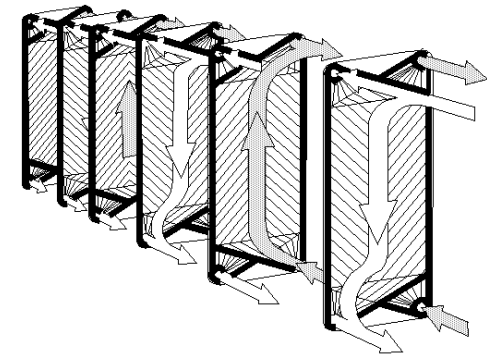
hermetické kompresory $\eta_s = 1$

oddělená soustrojí $P_i = P_{ef}$



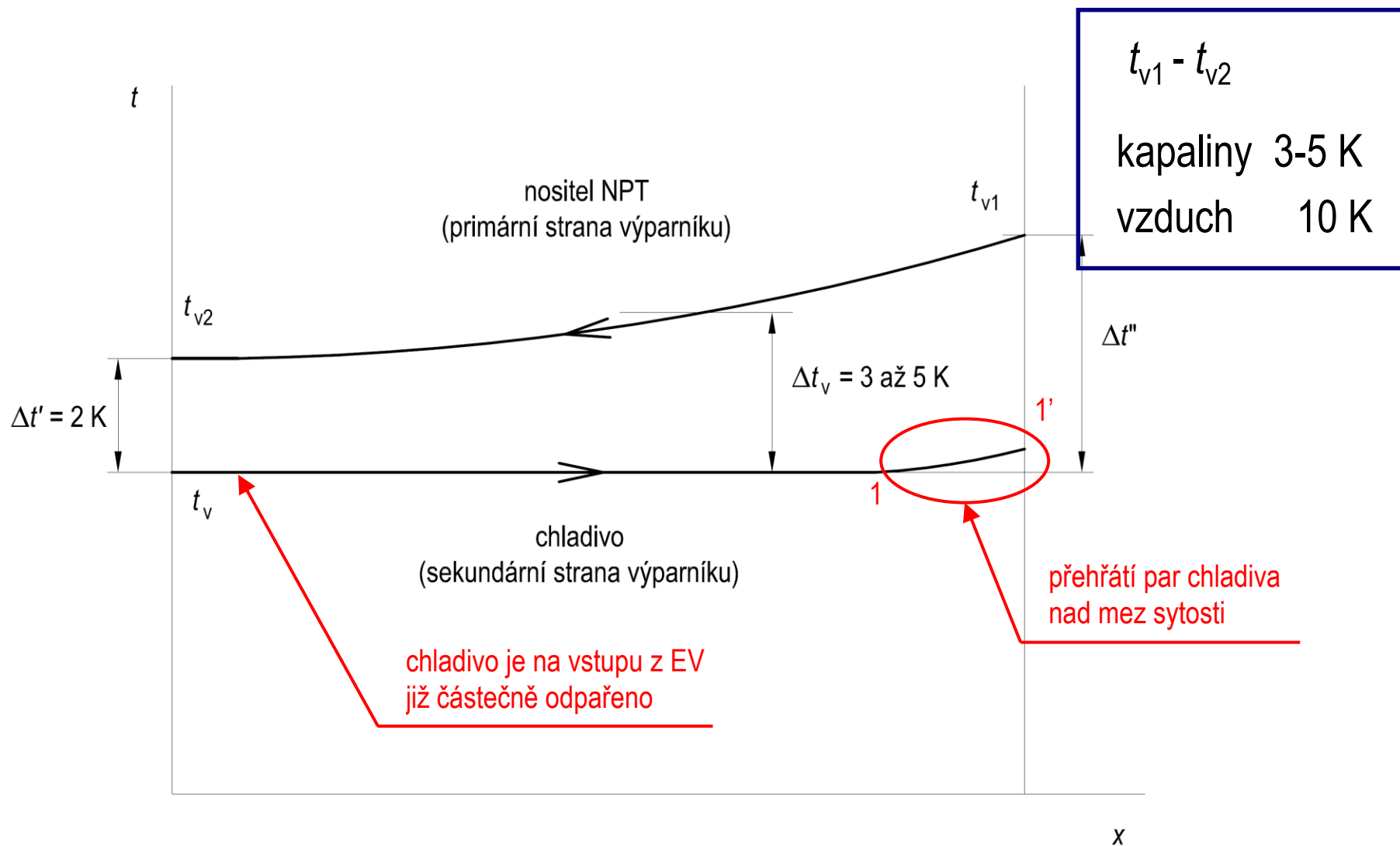
Výparník

- odebírá teplo nízkopotenciálnímu zdroji tepla (chlazenému prostředí) vypařováním chladiva za nízkého tlaku při teplotě **nižší** než je výstupní teplota teplotnosné látky t_{v2}
- **ochlazování teplotnosné látky:**
 - nemrznoucí směs (TČ země-voda)
 - voda (TČ voda-voda)
 - vzduch (TČ vzduch-voda)
- **výměníky:**
 - kapaliny: letovaný deskový výměník
 - vzduch: trubkový žebrový výměník





Výparník





Výkon výparníku

$$\dot{Q}_v = U_v \cdot A \cdot \Delta t_v$$

$$\Delta t_v = \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{\ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'}} = \frac{(t_{v1} - t_v) - (t_{v2} - t_v)}{\ln \frac{(t_{v1} - t_v)}{(t_{v2} - t_v)}} = \frac{(t_{v1} - t_{v2})}{\ln \frac{(t_{v1} - t_v)}{(t_{v2} - t_v)}}$$

linearizace při malých rozdílech

$$\Delta t_v = t_{v12} - t_v = \frac{t_{v1} + t_{v2}}{2} - t_v$$



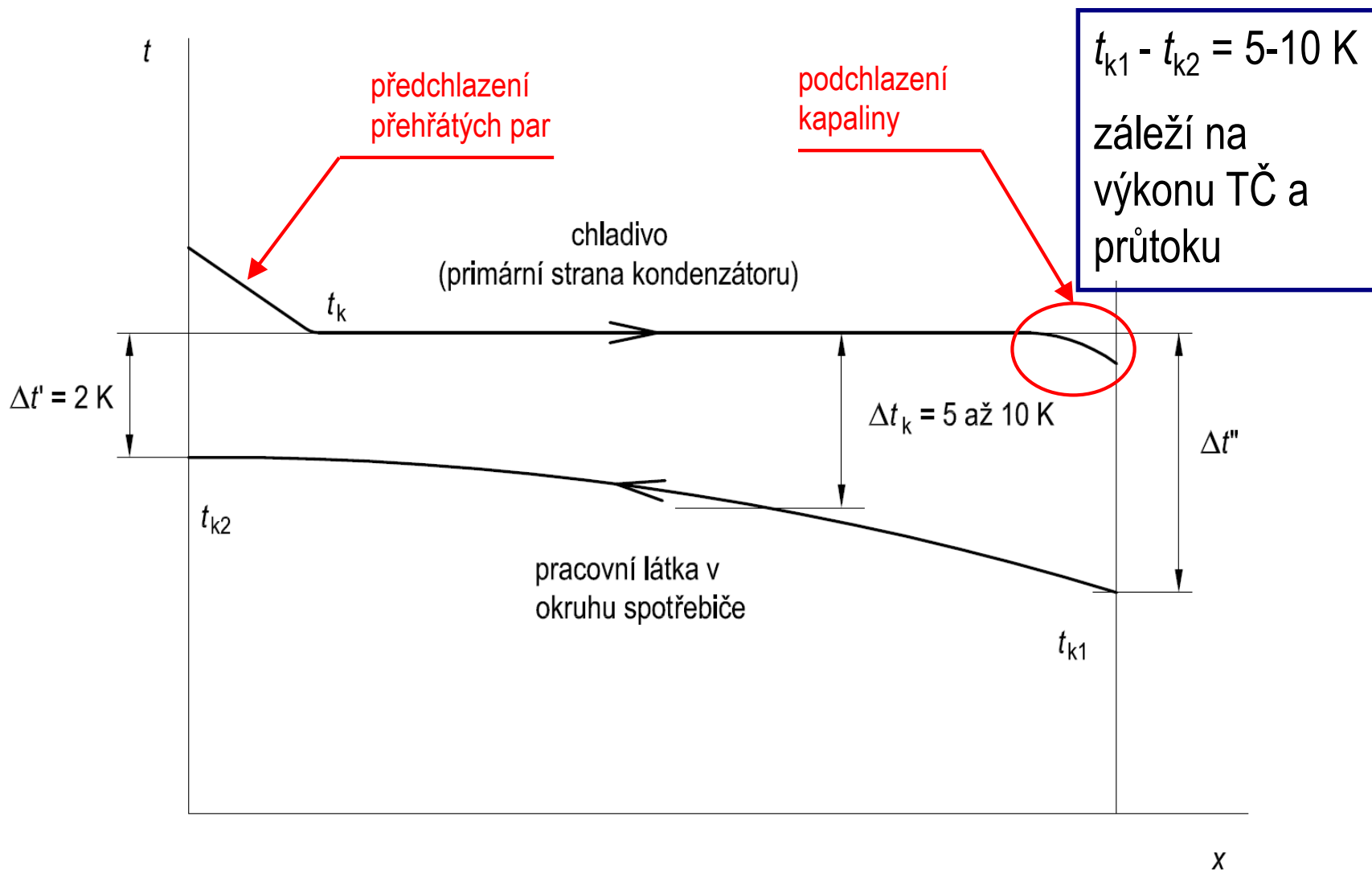
Kondenzátor

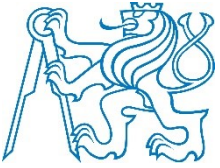
- předává teplo pro využití do teponosné látky (ohřívanému prostředí) kondenzací chladiva za vysokého tlaku při teplotě **vyšší** než je výstupní teplota teponosné látky t_{k2}
- **ohřívání teponosné látky:**
 - otopná voda (běžná TČ)
 - teplá voda (TČ ohřivače)
- **výměníky:**
 - letovaný deskový výměník
 - trubkový žebrový výměník (uvnitř zásobníku)





Kondenzátor





Výkon kondenzátoru

$$\dot{Q}_k = U_k \cdot A \cdot \Delta t_k$$

$$\Delta t_k = \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{\ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'}} = \frac{(t_k - t_{k1}) - (t_k - t_{k2})}{\ln \frac{(t_k - t_{k1})}{(t_k - t_{k2})}} = \frac{(t_{k2} - t_{k1})}{\ln \frac{(t_k - t_{k1})}{(t_k - t_{k2})}}$$

linearizace při malých rozdílech

$$\Delta t_k = t_k - t_{k12} = t_k - \frac{t_{k1} + t_{k2}}{2}$$



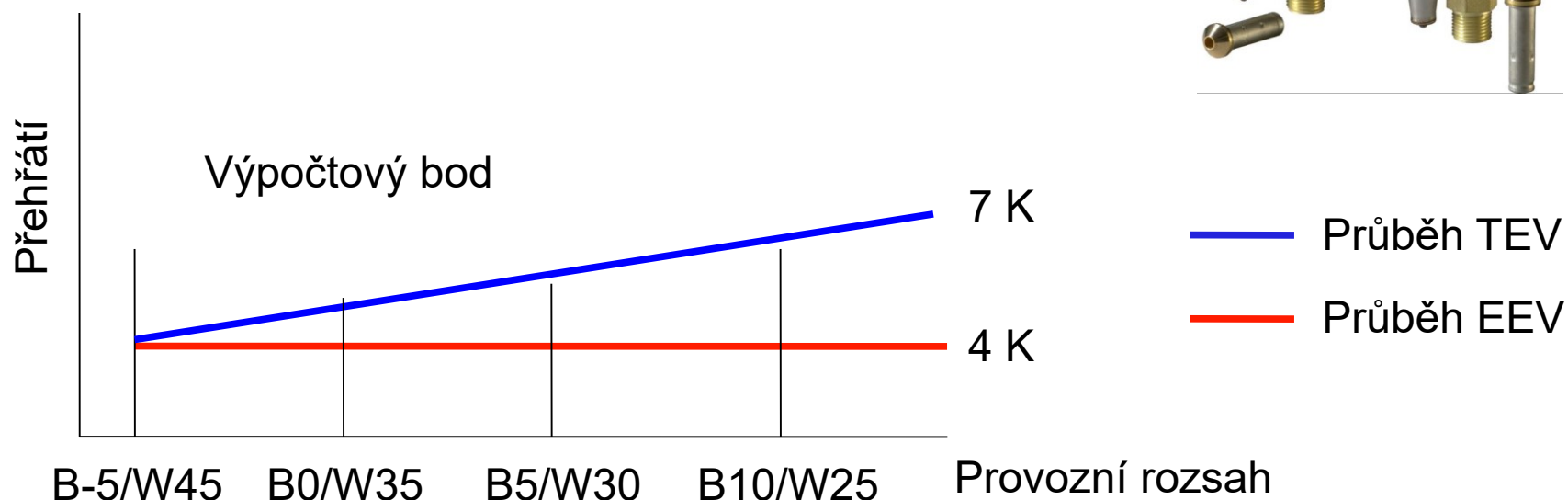
Expanzní (škrticí) ventil

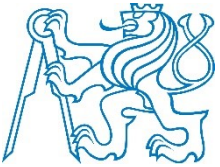
- **udržuje tlakový rozdíl** mezi vysokotlakou a nízkotlakou stranou chladicího oběhu
- **reguluje průtok chladiva** z kondenzátoru do výparníku v závislosti na výstupní teplotě z výparníku
- **udržuje přehřátí chladiva** za výparníkem $\Delta t_p = 4$ až 8 K
- průchodem kapalného chladiva EV se poklesem tlaku část chladiva odpaří a do výparníku vstupuje jako směs páry a kapaliny při výparné teplotě (mokrá pára)



Expanzní (škrticí) ventil

- škrticí orgán
 - kapilára – pro konstantní provozní podmínky (chladnička)
 - termostaticky řízený expanzní ventil (TEV)
 - elektronicky řízený expanzní ventil (EEV)
přesné řízení přehřátí





Chladiva

- **azeotropní**

- chovají se jako čisté kapaliny, během změny skupenství se složení par a kapaliny nemění, mohou být jednosložková nebo vícesložková
- R22, R290, azeotropní směs: R502 či R507

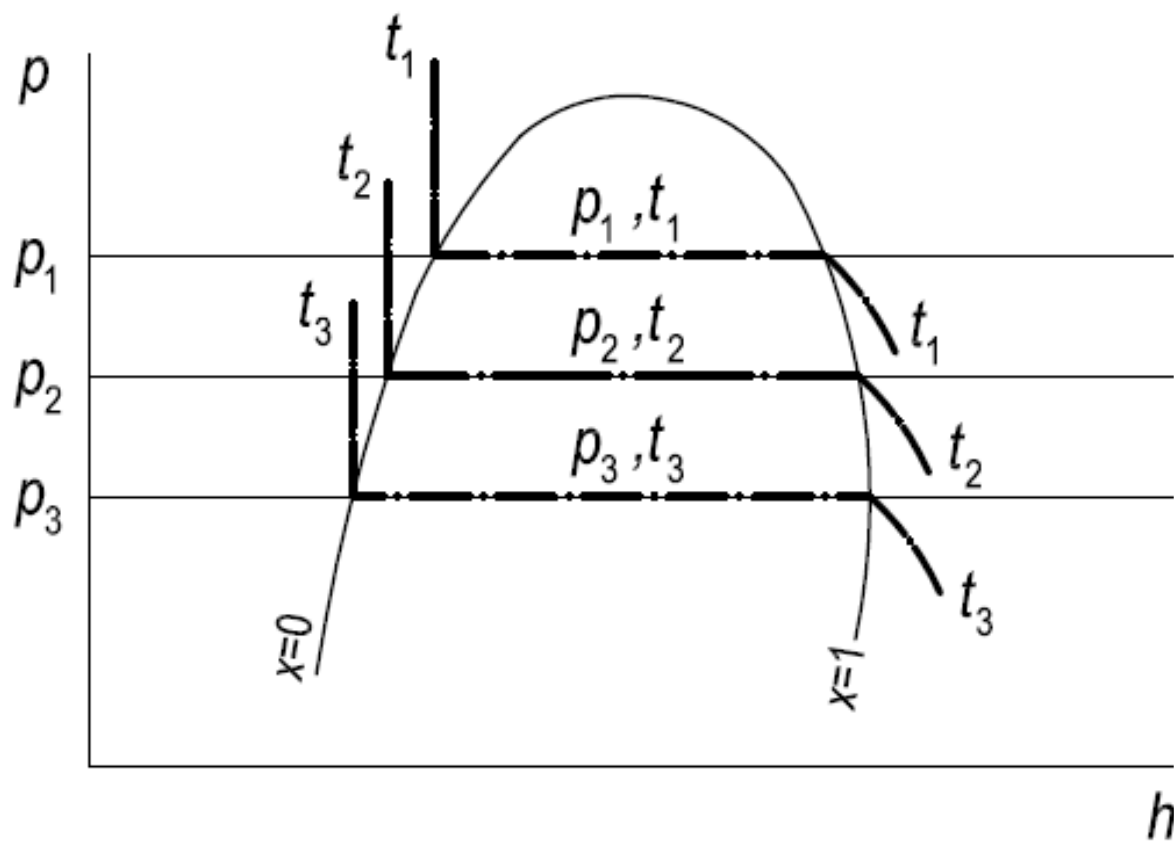
- **zeotropní**

- směsi obvykle 2 až 4 druhů chladiv
- **teplotní skluz** – nestejnoměrné vypařování složek chladiva, rozdíl ve vypařovacích teplotách jednotlivých složek chladiva při konstantním tlaku. Teplota během vypařování mírně vzrůstá, při kondenzaci mírně klesá.
- R407a, zatímco R404a je směs blízce azeotropní



Chladiwa

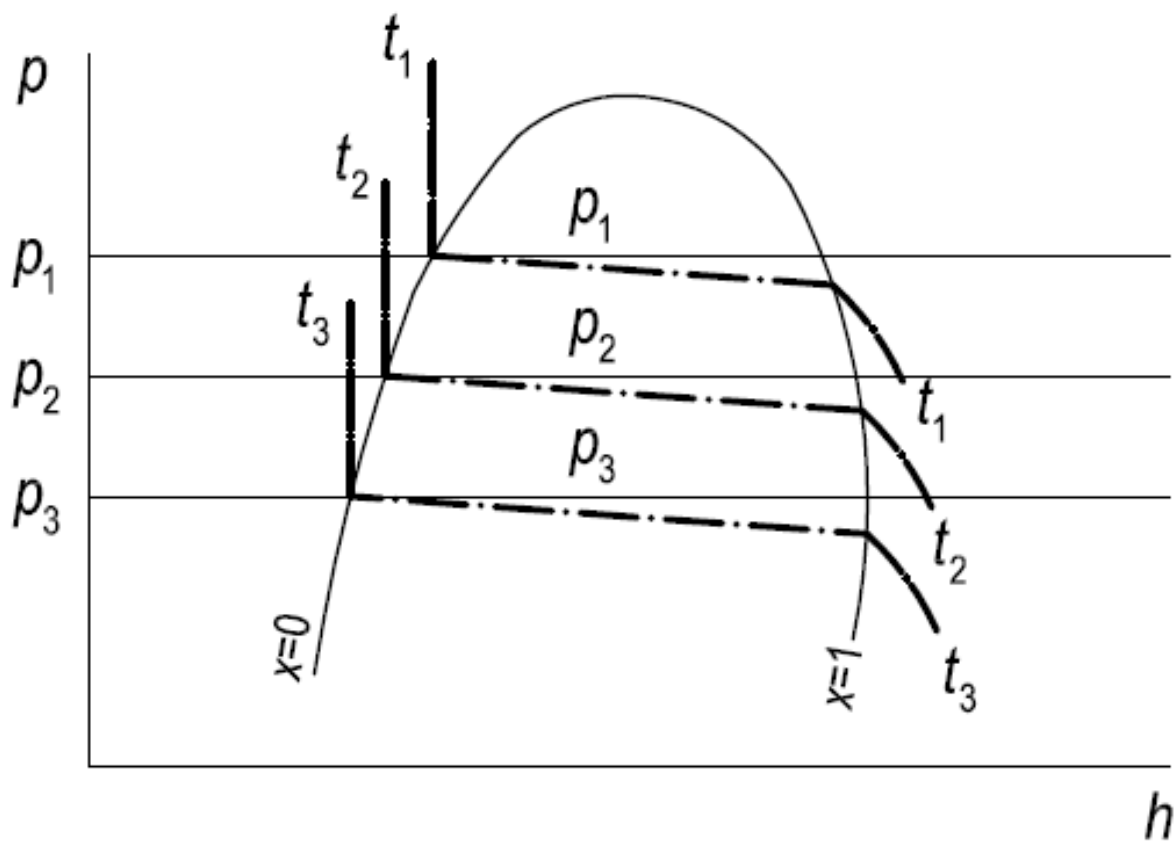
azeotropní





Chladiva

zeotropní





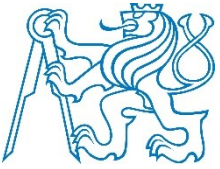
Chladiva

■ CFC

- plně halogenizované uhlovodíky a jejich směsi, tj. všechny atomy vodíku v molekule jsou nahrazeny atomy prvků ze skupiny halogenidů (Cl, F, Br)
- „tvrdé freony“
- R11, R12, R13, R113, R114, R115, R502, R503 a další.

■ HCFC

- chlorofluorované uhlovodíky, mají v molekule i atomy vodíku
- „měkké freony“
- R21, R22, R141b, R142b, R123, R124



Chladiva

- **HFC**

- nemají v molekule atomy chloru, jen fluor
- R134a, R152a, R125, R32, R218, R407c, R404a

- **HC**

- přírodní uhlovodíky a jejich směsi
- čpavek, propan (R290)
- zcela bez halogenidů, ale jsou hořlavé



Chladiva

Chladivo (složení)	Faktor poškození ozónové vrstvy RODP	Faktor vlivu na globální oteplování HGWP
plně halogenované uhlovodíky (CFC)		
R11 (CFCI₃) - reference	1	1
R12 (CF ₂ CI ₂)	1	3
částečně halogenované uhlovodíky (HCFC)		
R22 (CHF ₂ CI)	0,06	0,34
R401 (R22+R152a+R124)	0,03	0,22
R402 (R22+R290+R125)	0,02	0,64
fluorované uhlovodíky (HFC) a jejich směsi (bez chloru)		
R134a (C ₂ H ₂ F ₄)	0	0,27
R507 (C ₂ HF ₅ +C ₂ H ₃ F ₃)	0	0,98
R410a (CH ₂ F ₂ +C ₂ HF ₅)	0	0,41
R407c (CH ₂ F ₂ +C ₂ HF ₅ +C ₂ H ₂ F ₄)	0	0,39

**zakázaná chladiva bez
možnosti servisu**

**přechodná do 2015
(pouze servis, nesmí do
nových zařízení)**

**dlouhodobá alternativní
bezchlorová chladiva
nahrazující CFC, bez vlivu
na ozónovou vrstvu**



Parametry tepelného čerpadla

- **topný výkon Q_k [kW]** – výkon odebíraný z kondenzátoru
 - **topný faktor COP [-]**
-

při jasně definovaných podmínkách t_{v1} a t_{k2}

- **elektrický příkon P_{el} [kW]**
- **výkon zdroje NPT Q_v [kW]** – výkon přiváděný do výparníku

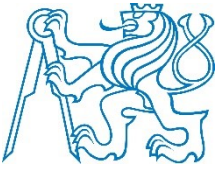
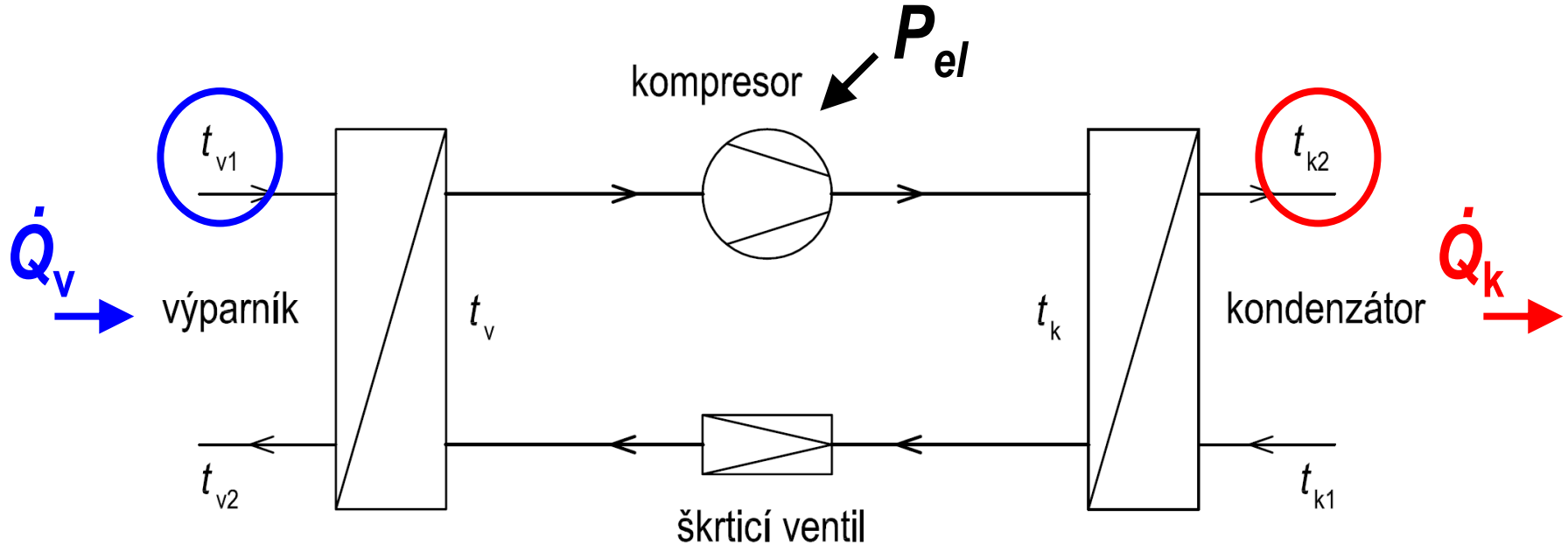


Schéma (el. poháněné TČ)

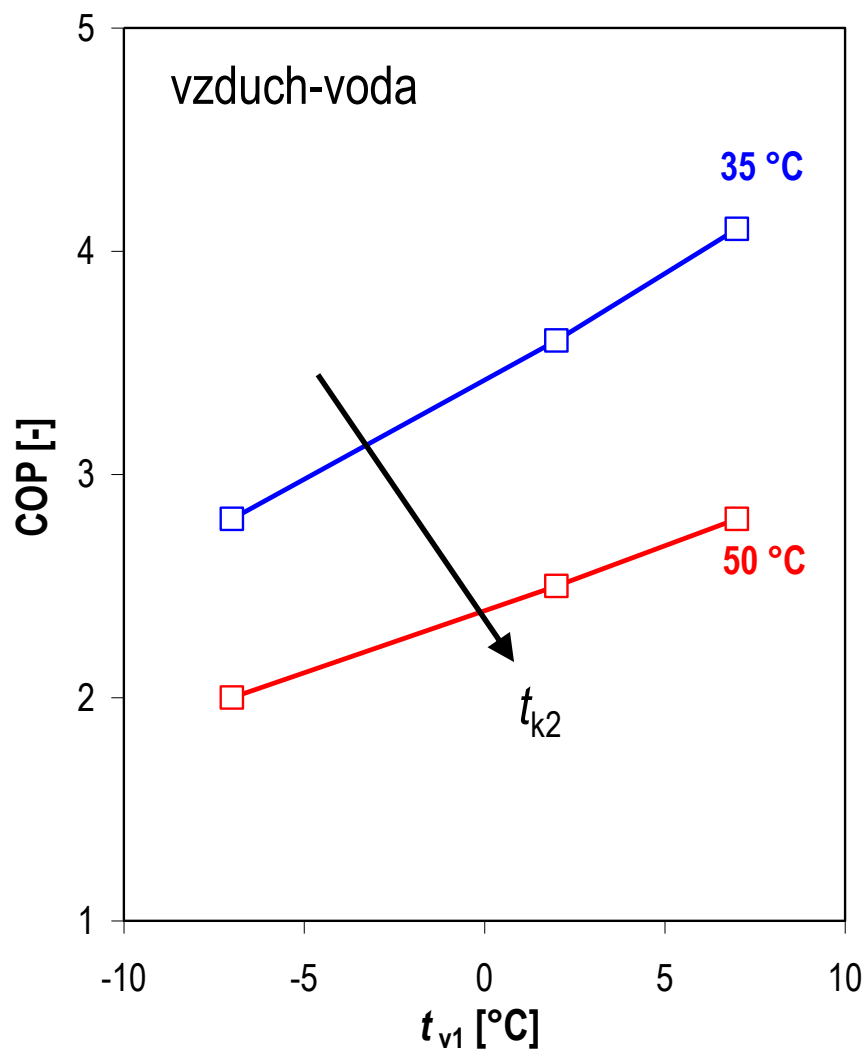
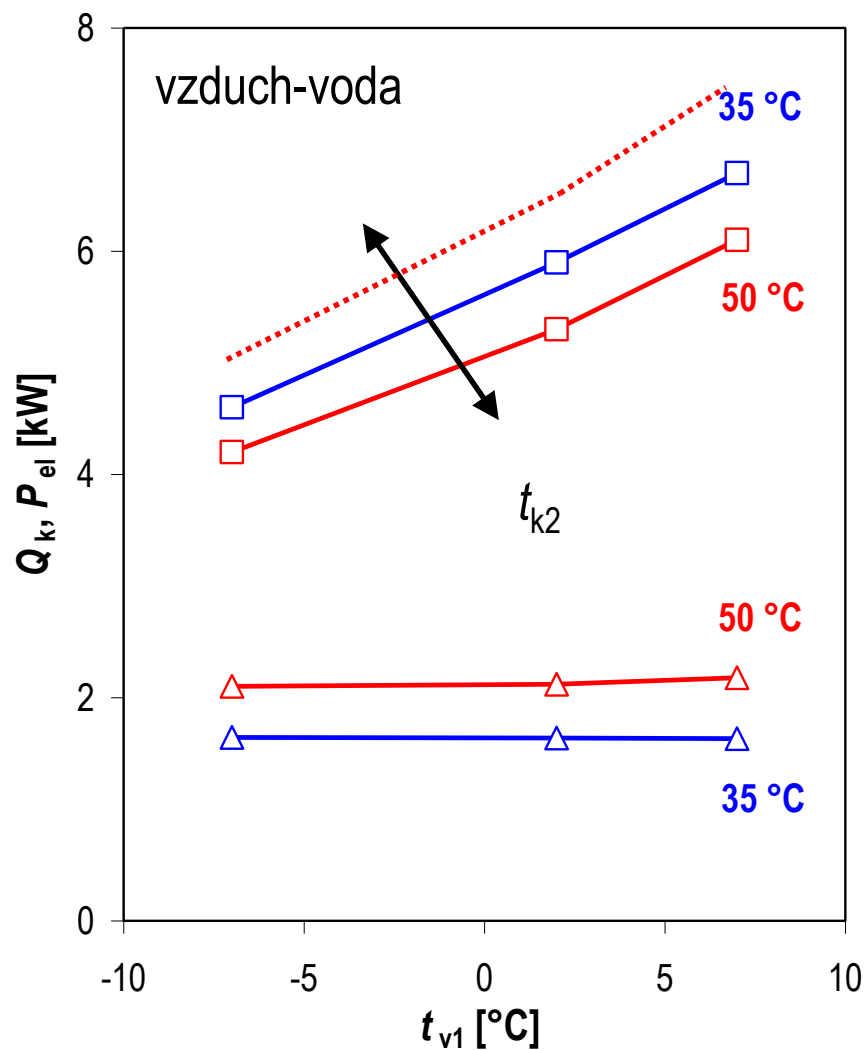


$$\dot{Q}_k = P_{el} + \dot{Q}_v \quad COP = \frac{\dot{Q}_k}{P_{el}} \quad COP = (0,4 \text{ až } 0,6) \frac{T_k}{T_k - T_v}$$

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_k - P_{el} = \dot{Q}_k \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right) = P_{el} \cdot (COP - 1)$$

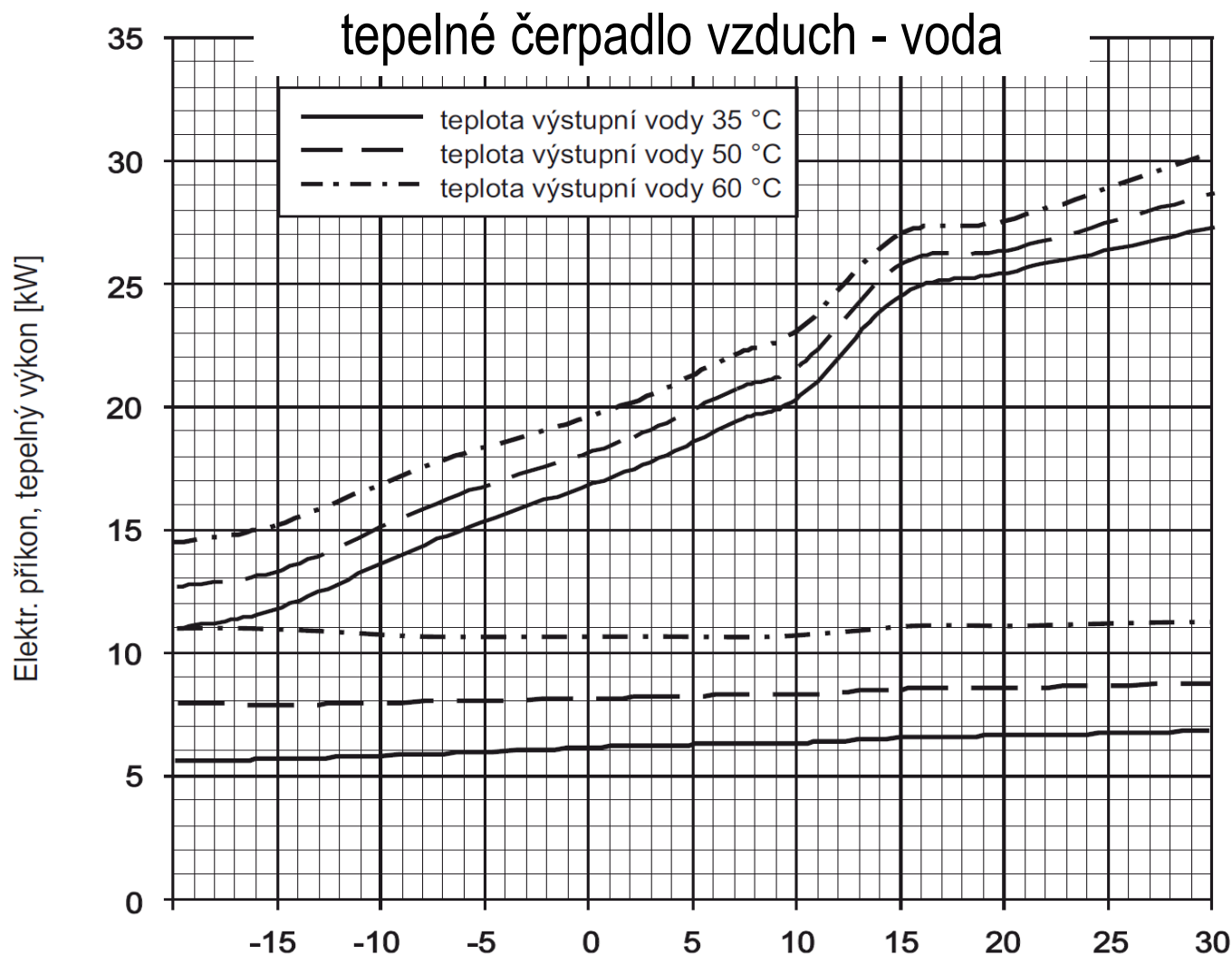


Parametry tepelného čerpadla





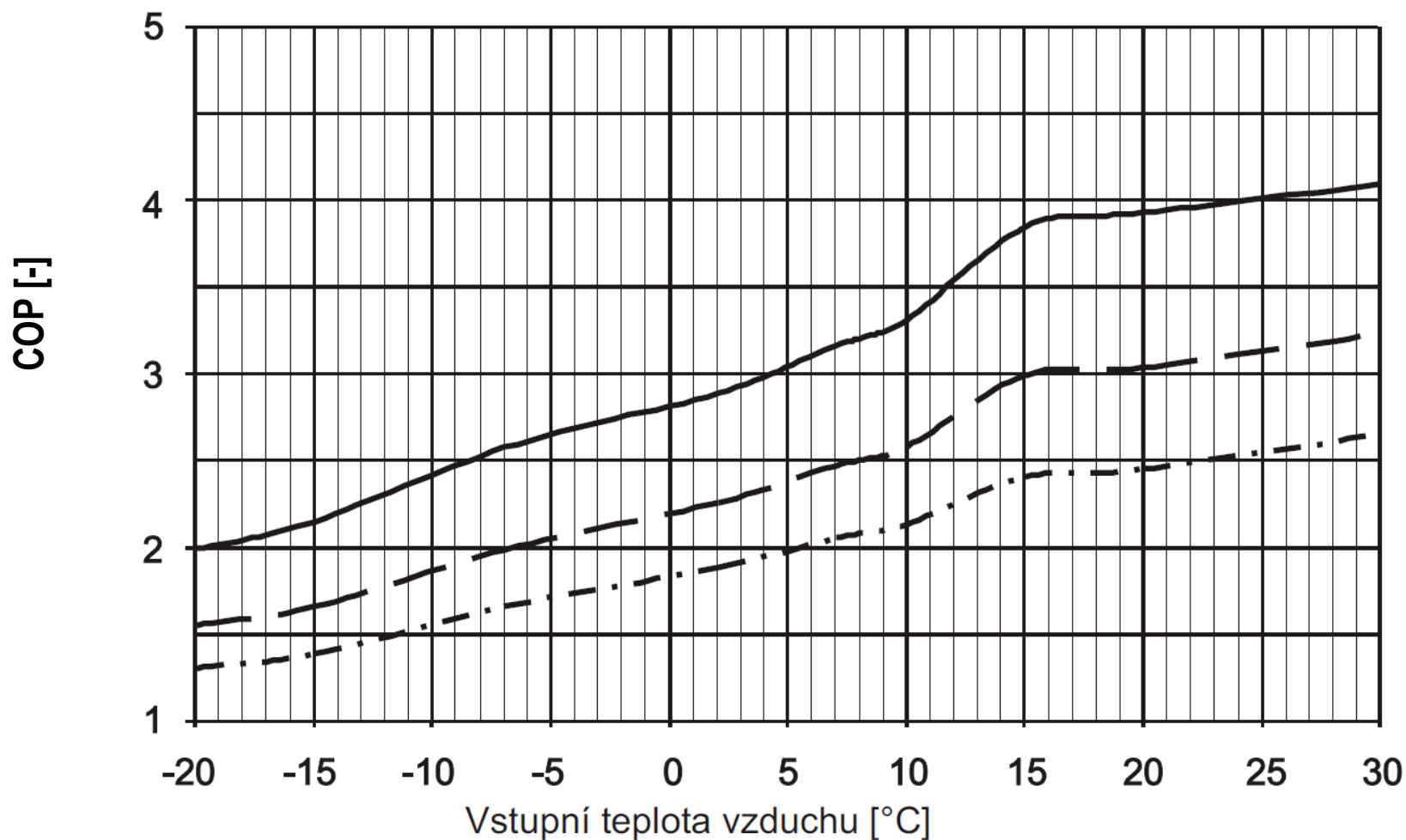
Parametry tepelného čerpadla





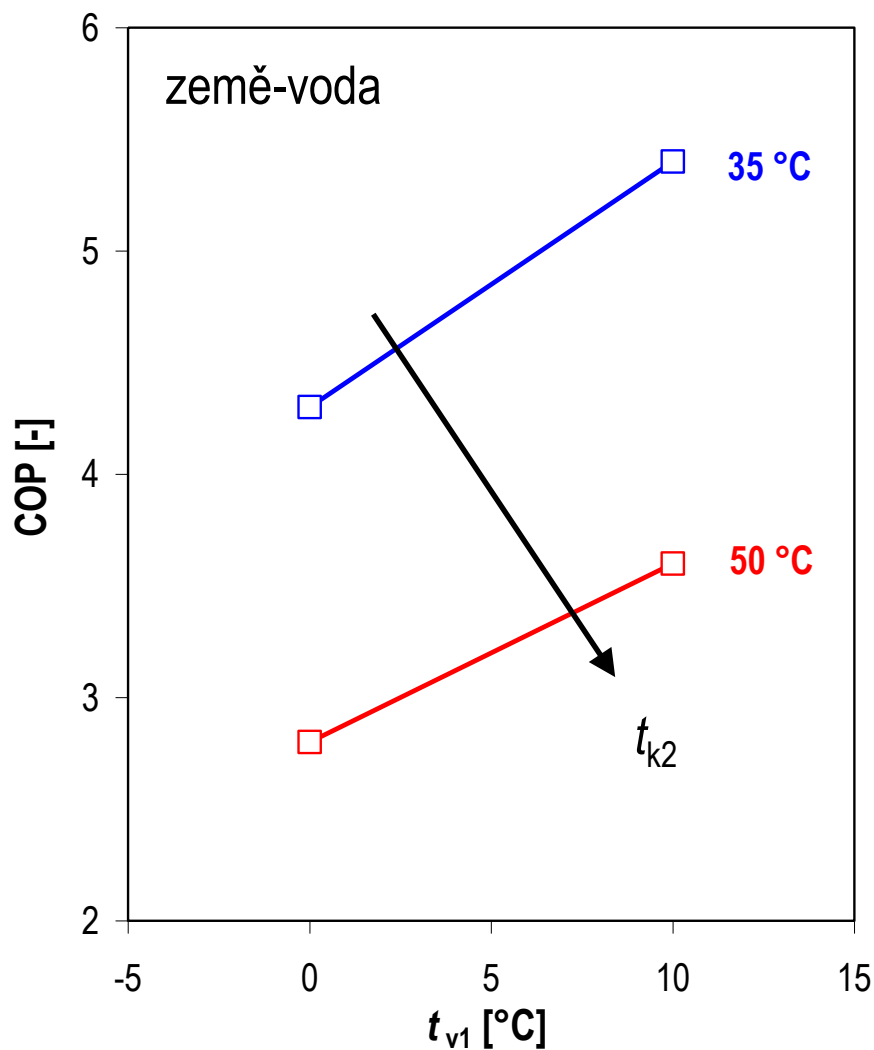
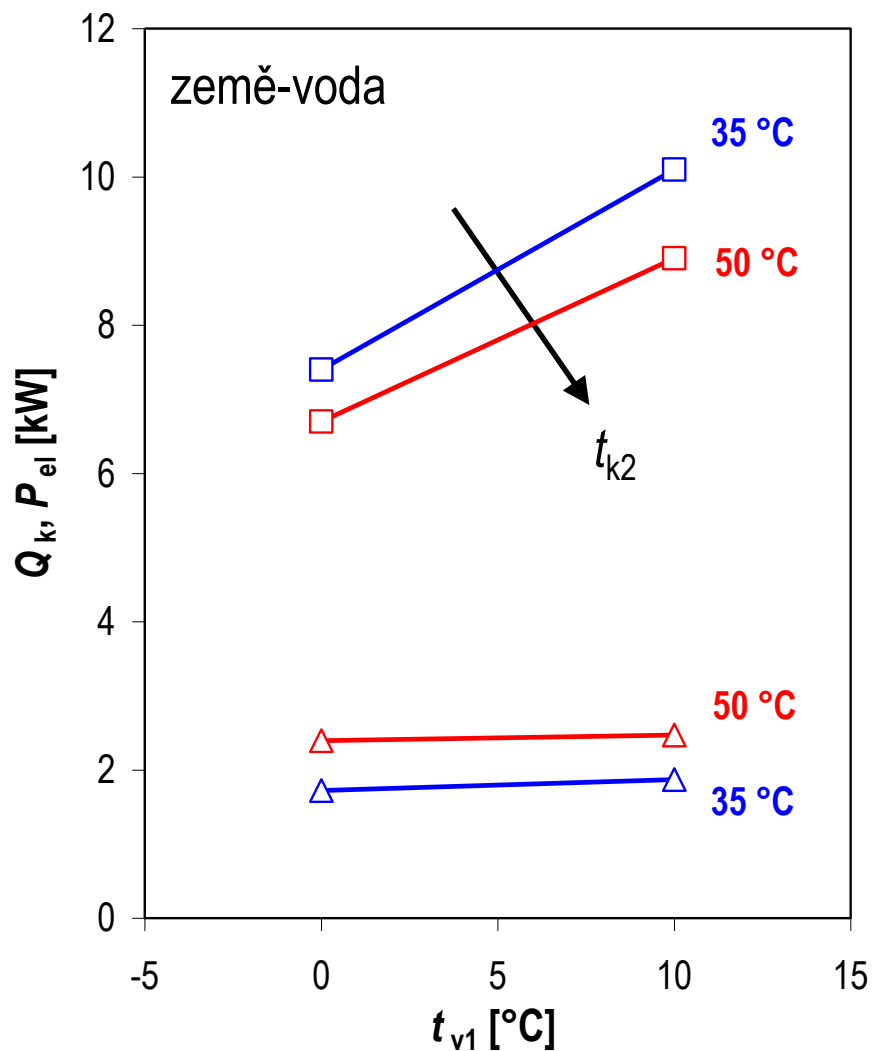
Parametry tepelného čerpadla

tepelné čerpadlo vzduch - voda





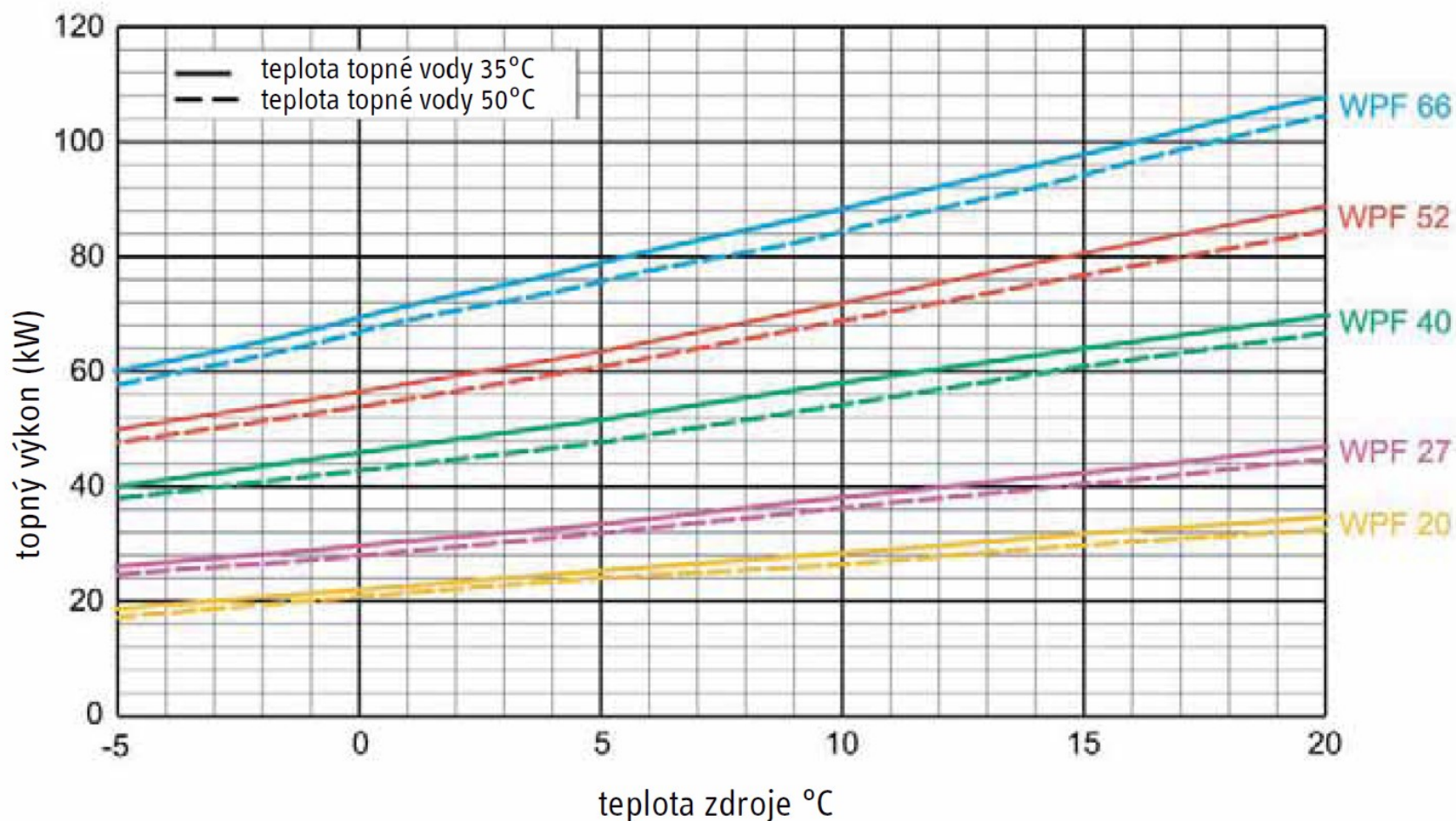
Parametry tepelného čerpadla





Parametry tepelného čerpadla

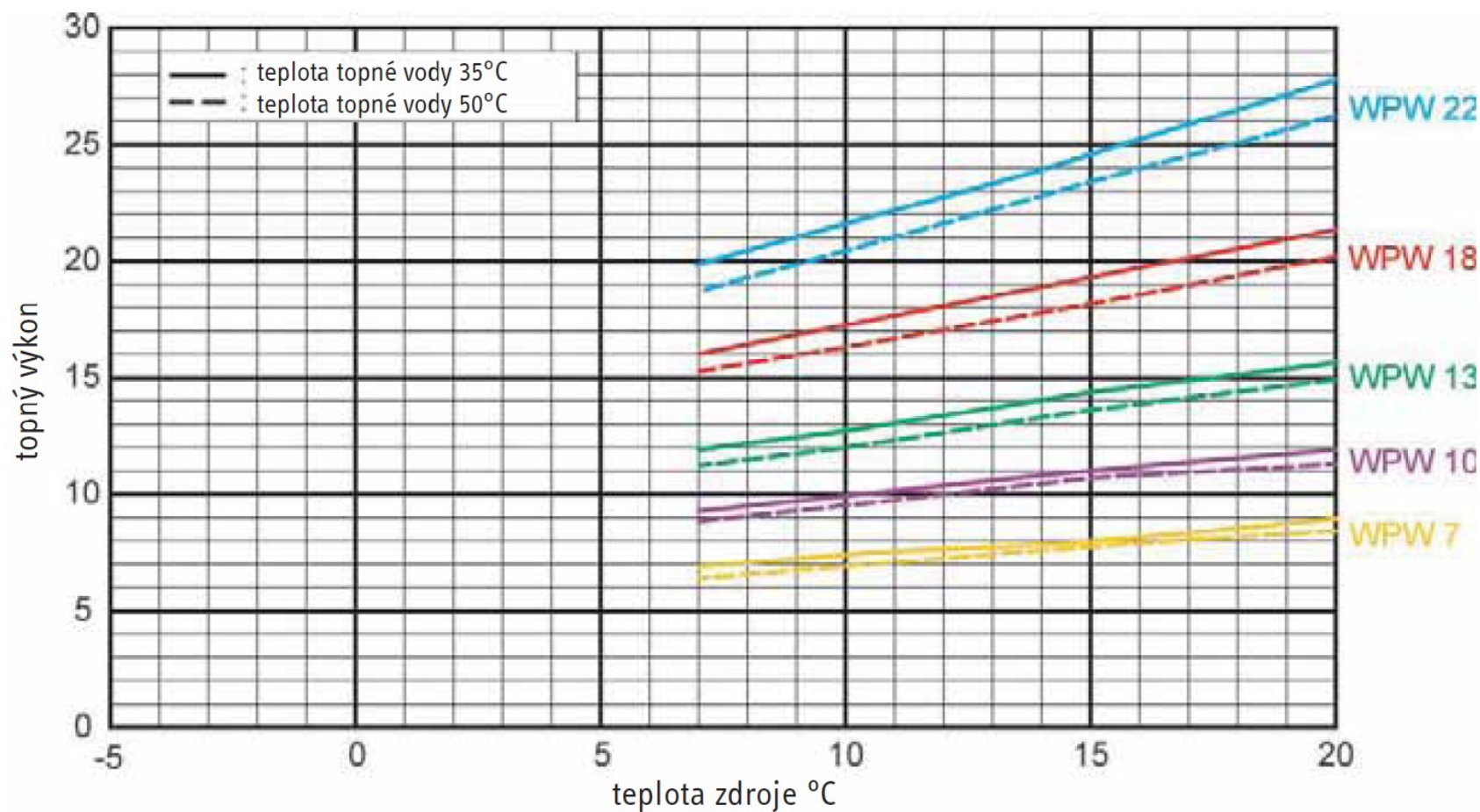
tepelné čerpadlo země - voda





Parametry tepelného čerpadla

tepelné čerpadlo voda - voda





Topný faktor – zkušební normy

- ČSN EN 255 - Klimatizátory vzduchu, jednotky pro chlazení kapalin a tepelná čerpadla s elektricky poháněnými kompresory - Režim ohřívání
 - ČSN EN 255-1: dtto - Termíny, definice a označování
 - ČSN EN 255-1: dtto - Zkoušení a požadavky na značení jednotek prostorového vytápění
 - ČSN EN 255-3: dtto - Zkoušení a požadavky na značení **jednotek pro teplou užitkovou vodu**
 - ČSN EN 255-4: dtto - Požadavky na jednotky prostorového vytápění a pro teplou užitkovou vodu

EN 255 je zrušena



Topný faktor – zkušební normy

- ČSN EN 14511 - Klimatizátory vzduchu, jednotky pro chlazení kapalin a tepelná čerpadla s elektricky poháněnými kompresory pro ohřívání a chlazení prostoru
 - ČSN EN 14511-1: dtto - Termíny a definice
 - ČSN EN 14511-2: dtto - Zkušební podmínky
 - ČSN EN 14511-3: dtto - Zkušební metody
 - ČSN EN 14511-4: dtto - Požadavky

EN 14511 v současné době nahradila EN 255

řada výrobců má platné certifikáty z měření podle EN 255



Topný faktor – zkušební podmínky

- ČSN EN 14511: voda-voda
 - jmenovité: **10/35 °C** 10/45 °C
 - provozní: 15/45 °C 10/55 °C
- ČSN EN 14511: nemrznoucí směs-voda (země-voda)
 - jmenovité: **0/35 °C** 0/45 °C
 - provozní: 5/35 °C 5/45 °C 0/55 °C
-5/45 °C
- ČSN EN 14511: vzduch-voda (venkovní vzduch)
 - jmenovité: **7/35 °C** 7/45 °C
 - provozní: **2/35 °C** 2/45 °C 7/55 °C
-7/35 °C -7/45 °C -7/55 °C
-15/35 °C -15/45 °C



Topný faktor EN 14511 x EN 255

- Značení:

země-voda S0/W35, vzduch-voda A2/W35, voda-voda W10/W35

- podle ČSN EN 14511:

- otopná voda vstupující do tepelného čerpadla daná **30 °C**, vystupující 35 °C, teplotní spád 5 K

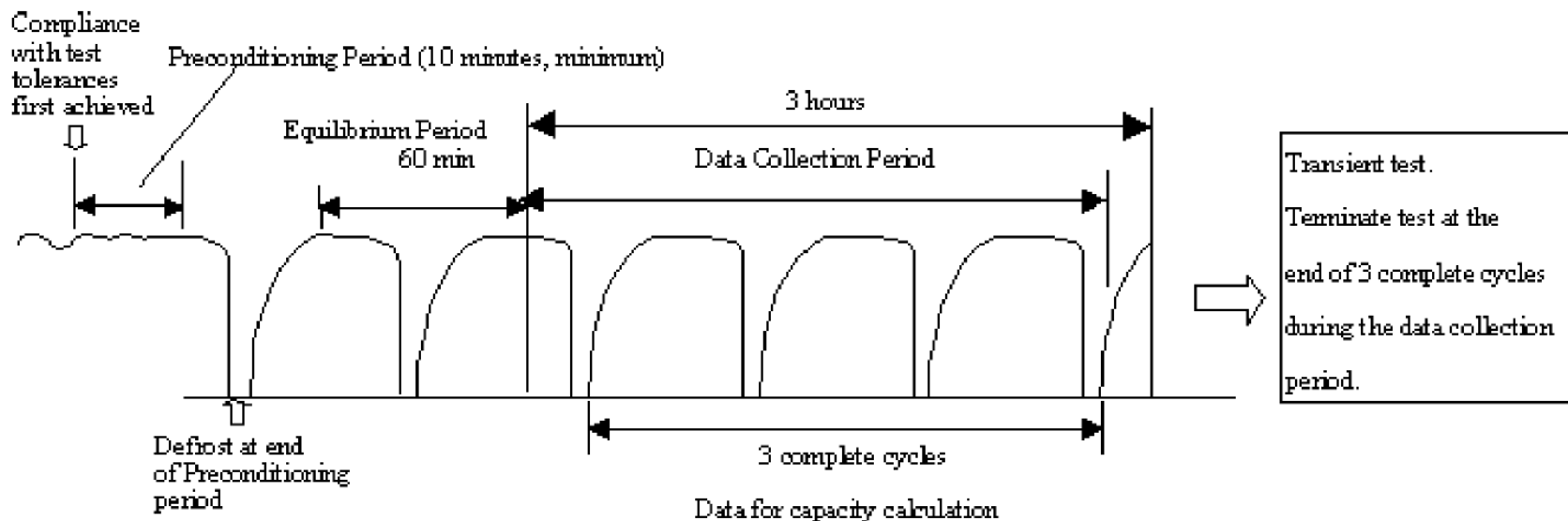
- podle ČSN EN 255:

- otopná voda vstupující do tepelného čerpadla neurčena (**25 °C**), vystupující 35 °C, výrobci mohli udávat teplotní spád 10 K

podle EN 255 lepší topné faktory od několik desetin !!!



Topný faktor EN 14511



zkušební sekvence tepelného čerpadla musí odpovídat jeho funkci v provozu

tepelná čerpadla vzduch-voda: **včetně odmrazovacího cyklu**