

# VÄRMEPUMPAR I PRAKTIKEN

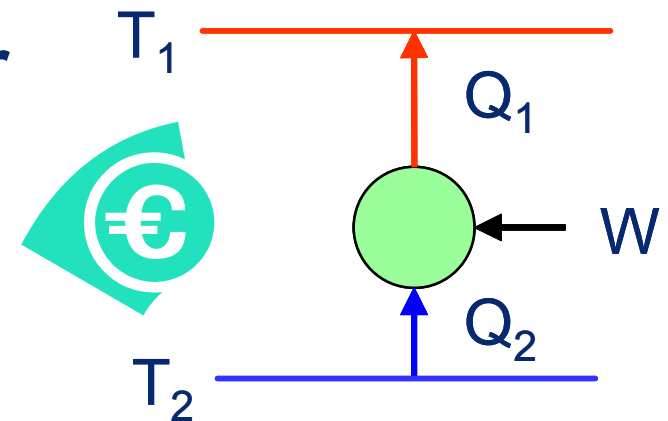
- Termodynamik i samverkan med byggnaders installationer

Per Fahlén

Chalmers tekniska högskola

# VÄRMEPUMPAR – LITE GOTT OCH BLANDAT

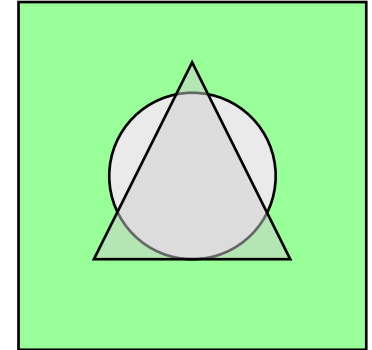
- **Behov och tillämpningar**
- **Ekonomi**
- **Termodynamik**
- **Praktikfall 1: Ombyggnad av kontorshus**
- **Praktikfall 2: Ombyggnad av småhus**
- **Framtiden?**



## Behov 1

# INTE BARA TEKNIK

- **Teknik måste ge svar på relevanta frågor!**
  - Vilka behov ska täckas?
  - Fördelar mot alternativ?
  - Funktion primär, teknisk lösning sekundär
- **Hur passar värmepumpen i samhället?**
  - Termodynamik: teori, ingenjörskonst, politisk/fiskal
- **Brukare, fastighetsägare, energiföretag, samhälle**
  - Ekonomi, tillgänglighet, bekymmersfrihet, valfrihet, miljöfrågor



## Behov 2

# GRUNDLÄGGANDE BEHOV

- **Mat:** Livsmedelskyla (1900-talet) *Jättestort!*
  - 30-40 % av hushållens energiförbrukning ligger på mat
  - Omsättning kylda livsmedel:  $100 \cdot 10^9$  kr i Sverige,  $1000 \cdot 10^9$  kr i Europa,  $10\,000 \cdot 10^9$  kr globalt.
- **Komfort:** Luftkonditionering (1940-talet) *Stort!*
  - $> 20 \cdot 10^6$  RAC per år i världen
- **Energibesparing:** Värmepumpar (1970-talet) *Litet!*
  - Ca.  $60 \cdot 10^3$  värmepumpar per år i Sverige
  - Ca.  $1 \cdot 10^6$  värmepumpar totalt installerade i Sverige
- **Kelvin 1852** (förutseende!):  
”On the economy of heating and cooling buildings”

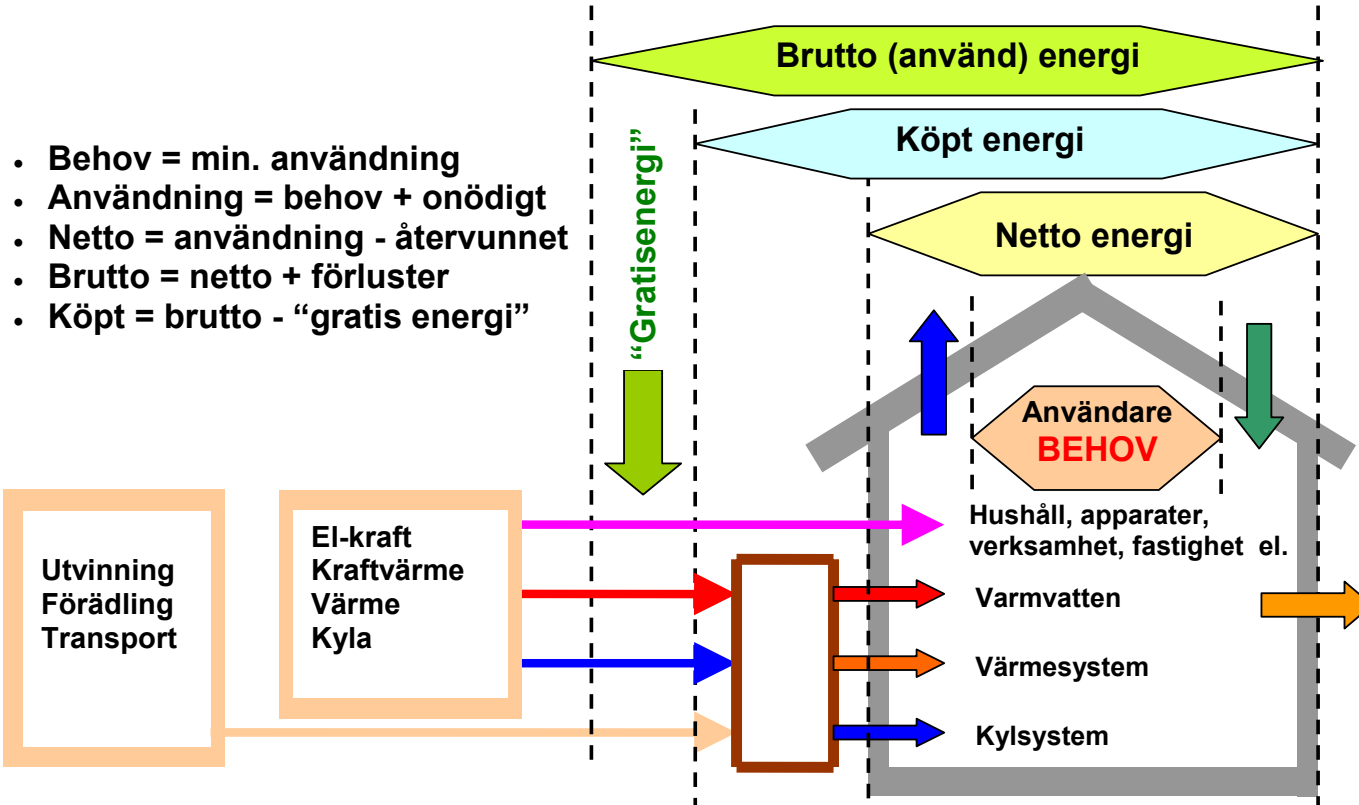
## Behov 3

# TILLÄMPNINGAR

- **Industriella värmepumpar och kommersiell kyla**
  - Bortkylning av överskott, utnyttjande av spillvärme
  - Processer: livsmedel (whisky!), petrokemi ("pinch"), torkning, temperaturhöjning (värmetransformator), processånga, kryoteknik (gaser, gastransport), frysning av mark)
  - Lagring: Livsmedel, övrig klimatstyrd förvaring
- ***Klimatisering av byggnader m.m.***
  - **Rum:** värmning (minskar), kylning (ökar)
  - **Ventilationsluft:** värmning, kylning,
  - **Värmeåtervinning:** ventilation, avlopp
  - **Tappvatten:** värmning
  - Kyl och frys, torktumlare, torkskåp

## Behov 4

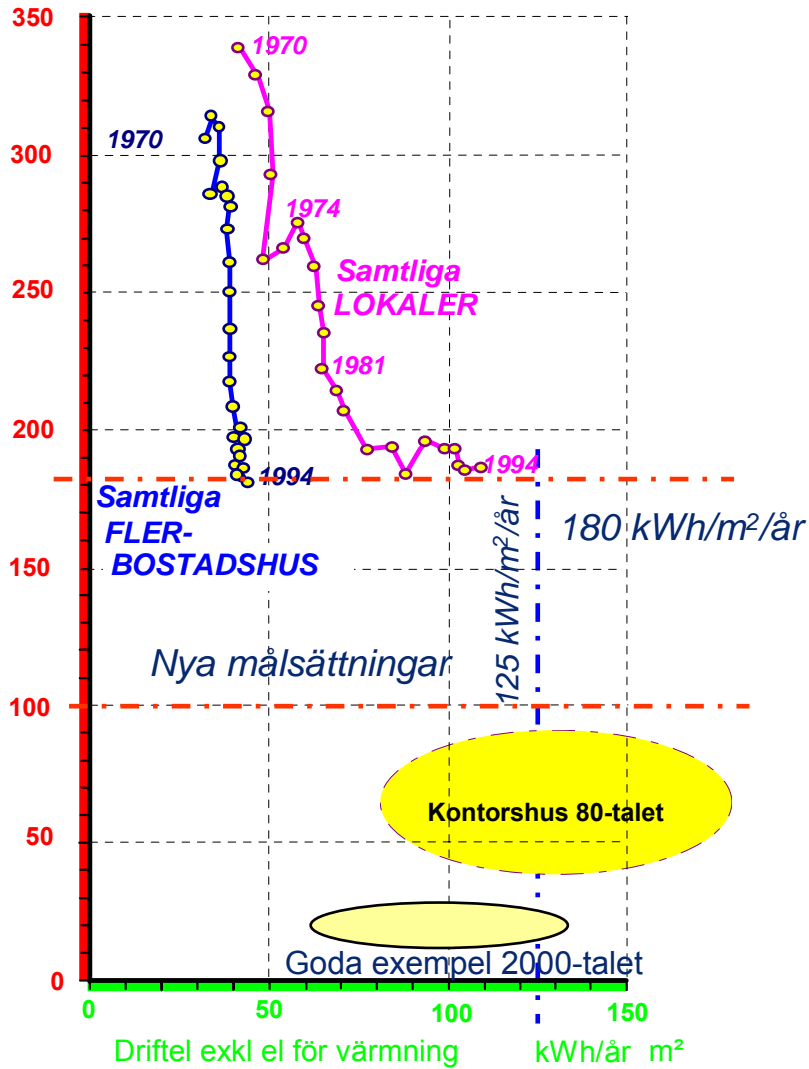
## ENERGI I BYGGNADER



- Skilj på behov, användning, tillförd och köpt energi!
- Statistiken redovisar bara köpt energi; 14 TWh saknas för vp

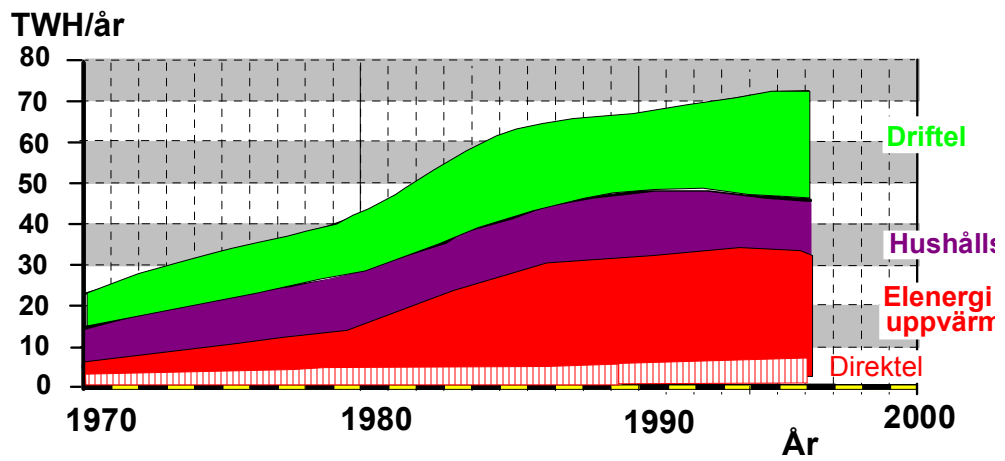
Uppvärmning och tappvarmvatten inkl elvärme  
kWh/år m<sup>2</sup>

Behov 5



# BYGGNADERS ENERGIANVÄNDNING

- Värme minskar
- Kyla ökar
- El ökar



## Behov 6

# MÖJLIGHETER ATT MINSKA DEN KÖPTA ENERGIN

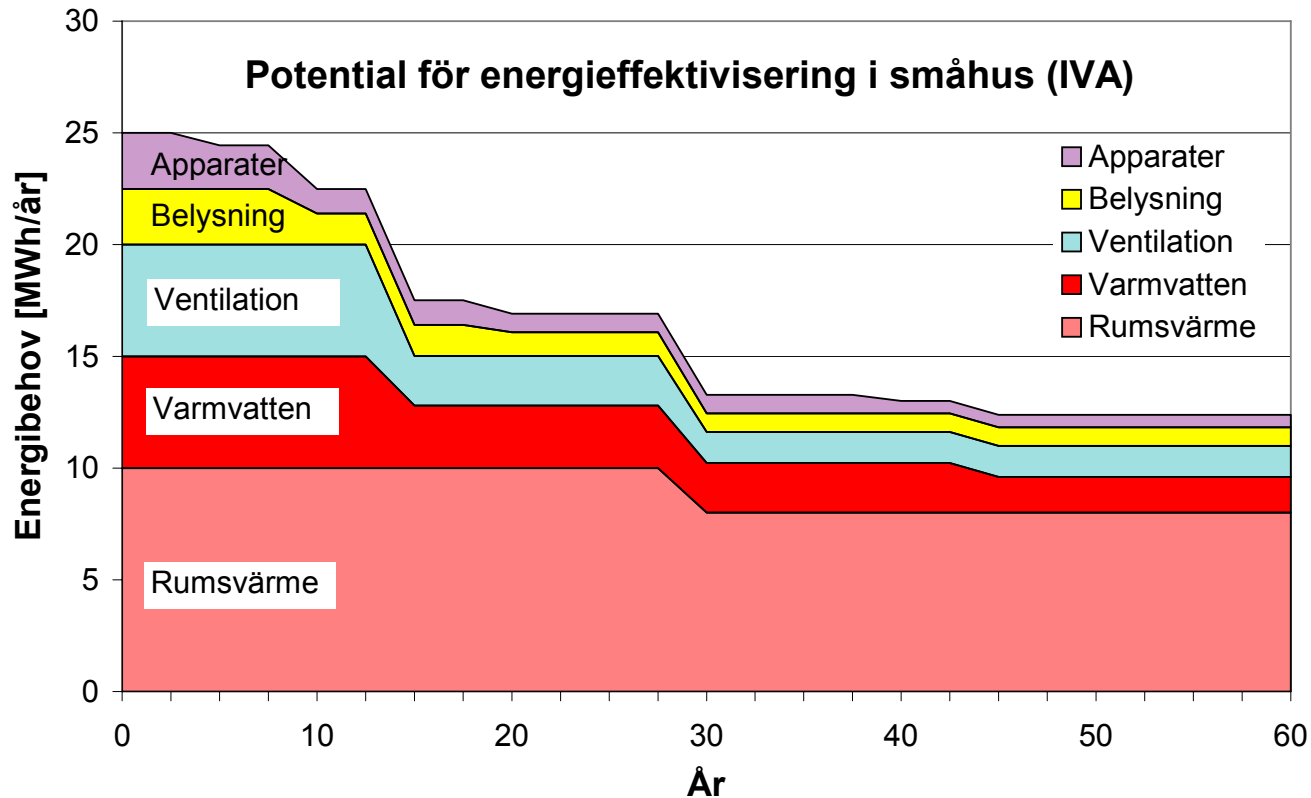


- **Minska behovet**
  - beteende (apparater, belysning, varmvatten, rumstemperatur, vädring ...)
  - byggnad (fönster, isolering)
  - installationer (värme, ventilation, belysning, vitvaror ...)
- **Byt tillförselsystem** (något med "gratisvärme")
  - egen ved
  - solvärme (direkt)
  - solvärme (indirekt, t.ex. lagrad i mark)
- **Vad har **marken** att erbjuda? Svar kommer senare!**



## Behov 7

## IVA's Energiframsyn

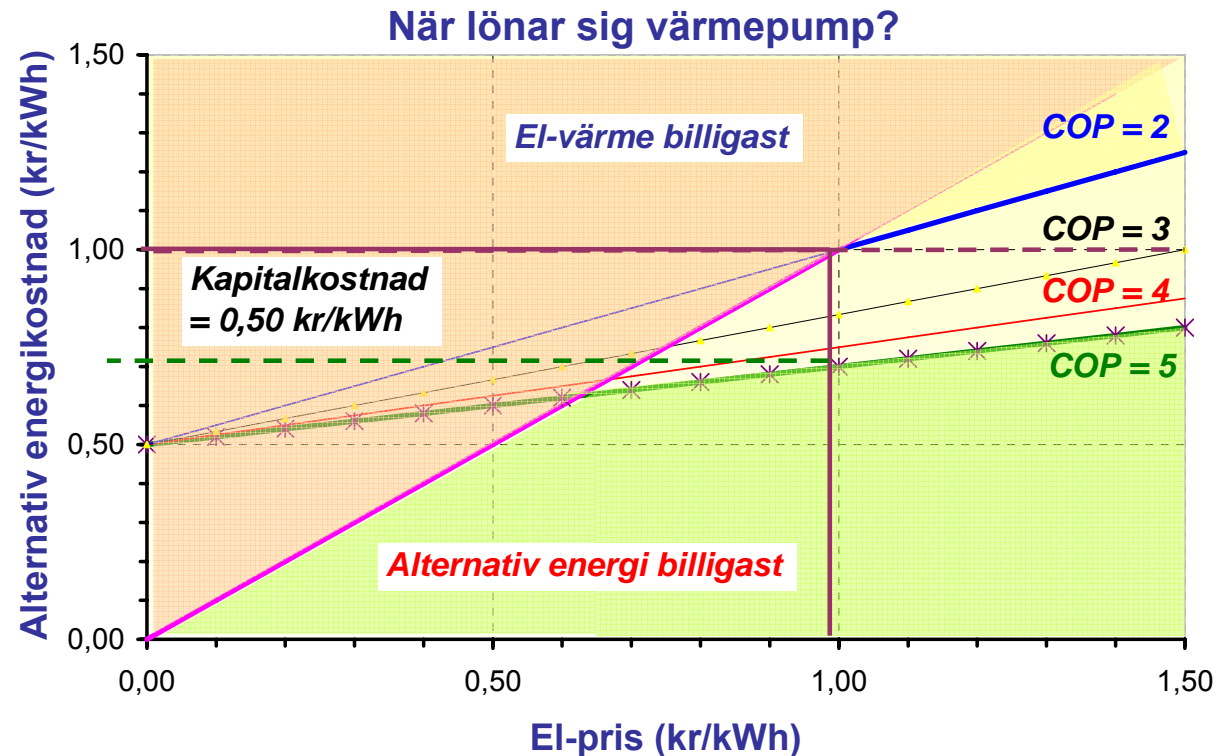


- Halvering av dagens **energianvändning** till år 2050
- Halvering av **köpt energi** är lätt redan idag!

## Ekonomi 1

## KONKURRERANDE ALTERNATIV

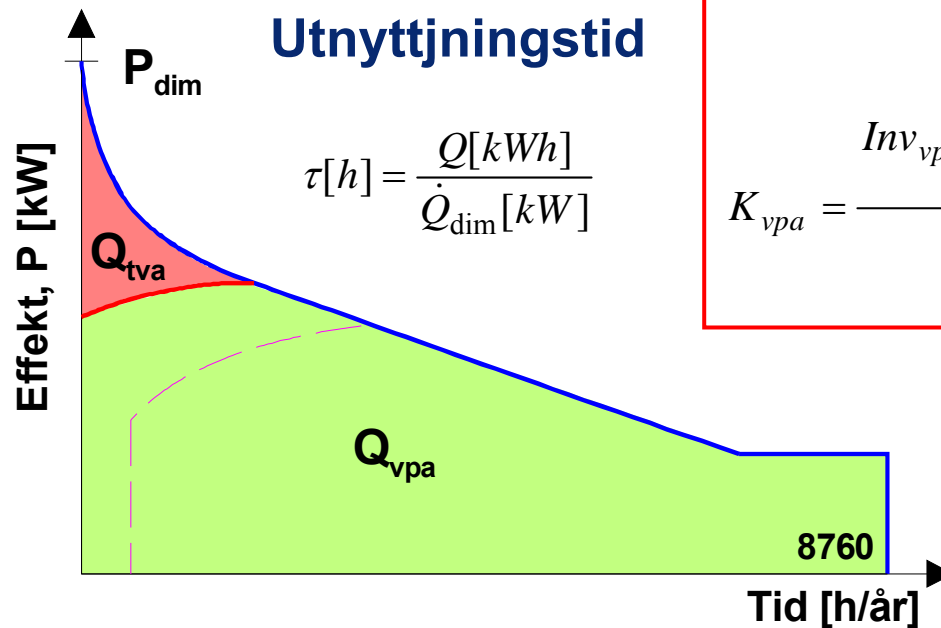
- **Investering**  
Värmefaktor  
eller pris?
- **Typ av  
lösning?**
- **Kostnad för  
alternativ till  
värmepump?**
- **Dimensionering? Jämför skiftet 1985!**



## Ekonomi 2

## DIMENSIONERING

Värmekostnad = Investering • annuitetsfaktor + rörlig kostnad



## Värmepump

$$K_{vpa} = \frac{Inv_{vpa} \cdot \left(1 + \frac{x_{vpa}}{a_{vpa}}\right)}{\tau_{vpa}} \cdot a_{vpa} + \frac{K_{el,vpa}}{SPF} \quad [kr / kWh]$$

Inv = inv. kostnad [kr/kW]  
 x = andel underhåll av inv.  
 τ = utnyttjningstid [h]

## Tillsatsvärme p.s.s.

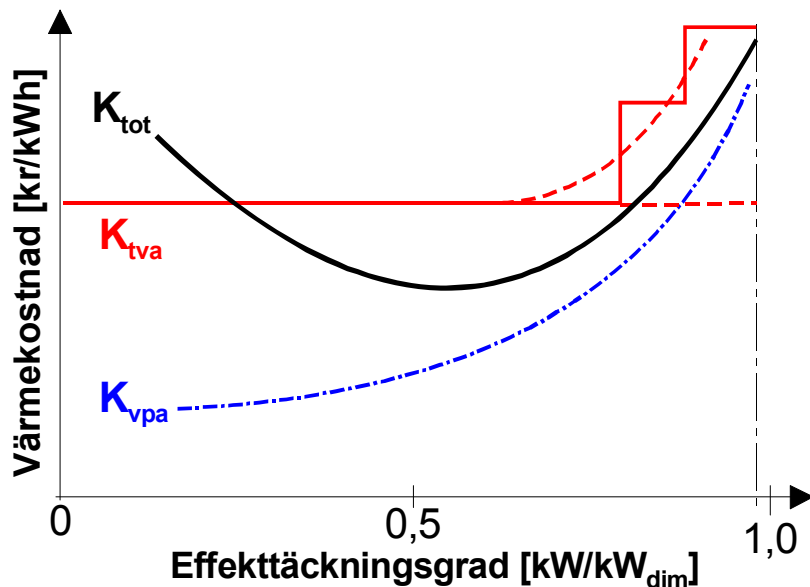
- **OBS!** Både effekt och *temperatur* kan begränsa täckningsgraden

## Ekonomi 3

## OPTIMAL EKONOMISK DIMENSIONERING

Total kostnad

$$K_{tot} = \frac{Q_{vpa}}{Q_{tot}} \cdot \left[ K_{vpa} + \left( \frac{Q_{tot}}{Q_{vpa}} - 1 \right) \cdot K_{tva} \right] \quad [kr / kWh]$$



- VP sparar bara vid drift!
- Kostnad för VP, värmekälla och värmesänka ökar med storlek
- Övereffekt  $\Rightarrow$  låg utnyttjningstid
- Tumregel: 50 % effekt  $\Rightarrow$  80-90 % energitäckning
- Kapacitetsreglering ger alternativ till TVA

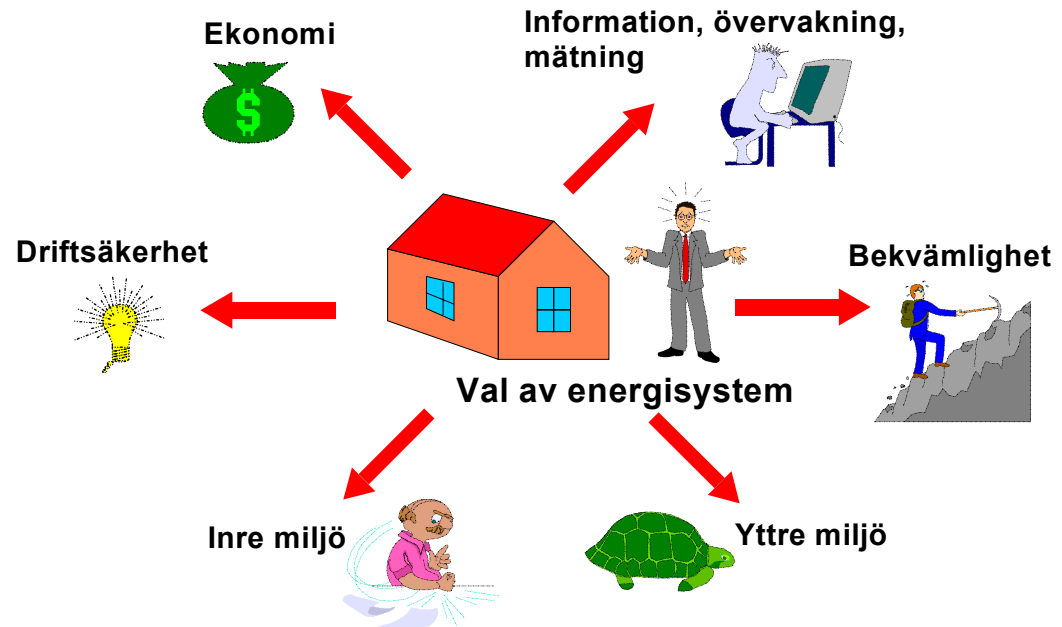
- Effekttaxa kan premiera täckningsgrad

## Ekonomi 4

**TEKNIKDRIVANDE FAKTORER**

*Många lösningar är möjliga, få blir verkliga*

- **Ekonomi**
  - Pris på el/värme,
  - Energi/effekt
- **Miljö** (ökande krav)
  - Inomhusmiljö
  - Utomhusmiljö (lokal/global)
- **Normer**
  - Byggnormer, energideklaration, ...
- **Samhällsförändringar**
  - Teknik inom andra områden (jämför IT, 3G, ...)

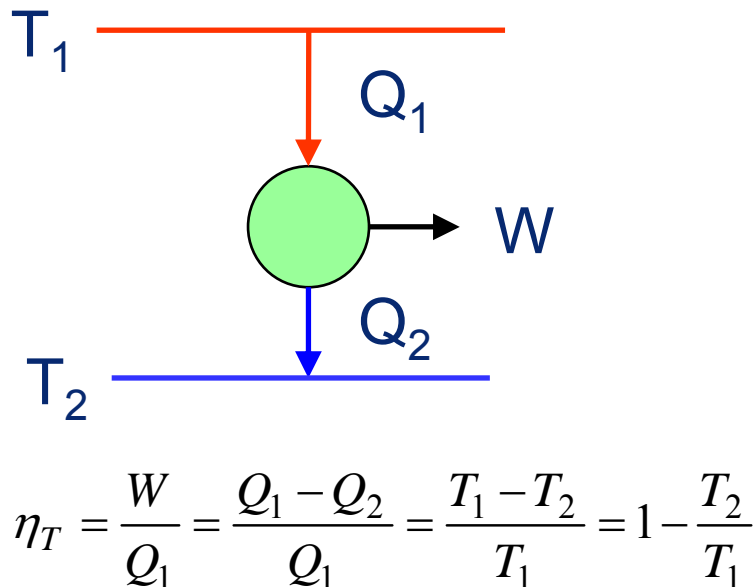


## Teori 1

# VÄRMEPUMPAR OCH TERMODYNAMIKENS 2:a HUVUDSATS

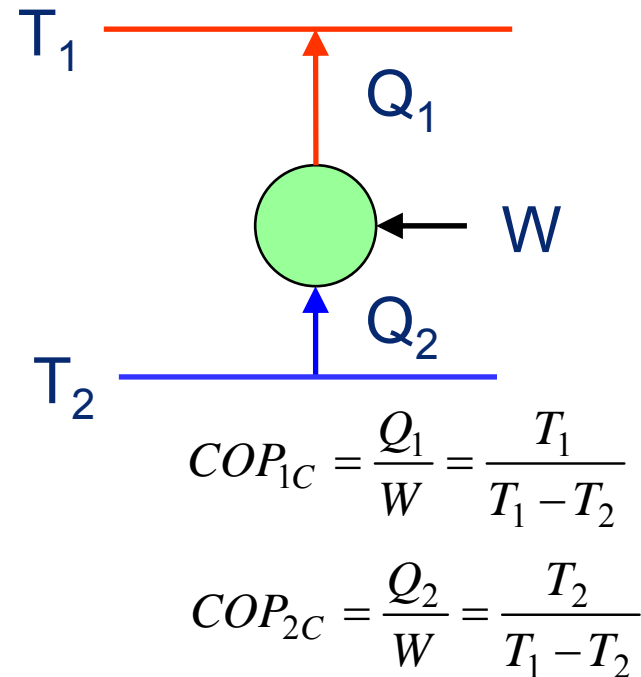
- **Värmekraftprocess**

- Värme kan inte helt omvandlas till arbete (det blir alltid spillvärme)



- **Värmepumpsprocess**

- Värme kan inte gå från låg till hög temperatur utan tillsats av arbete

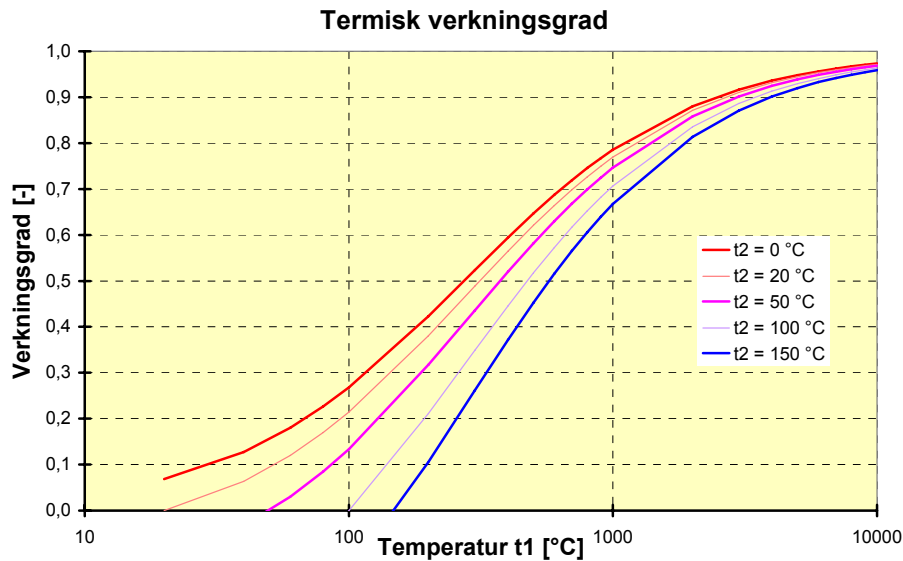


## Teori 2

# TEMPERATUR ↔ VERKNINGSGRAD

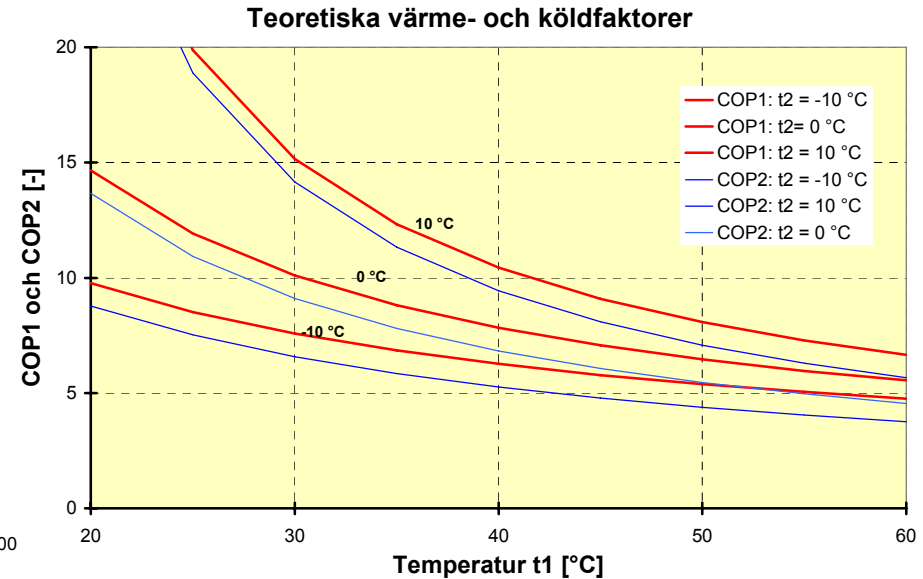
$COP$  = Coefficient Of Performance = värme/arbete

- **Värmekraftprocess**



$$\eta_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

- **Värmepumpsprocess**



$$COR_1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = 1 + \frac{T_2}{T_1 - T_2} = 1 + COP_2$$

Teori 3

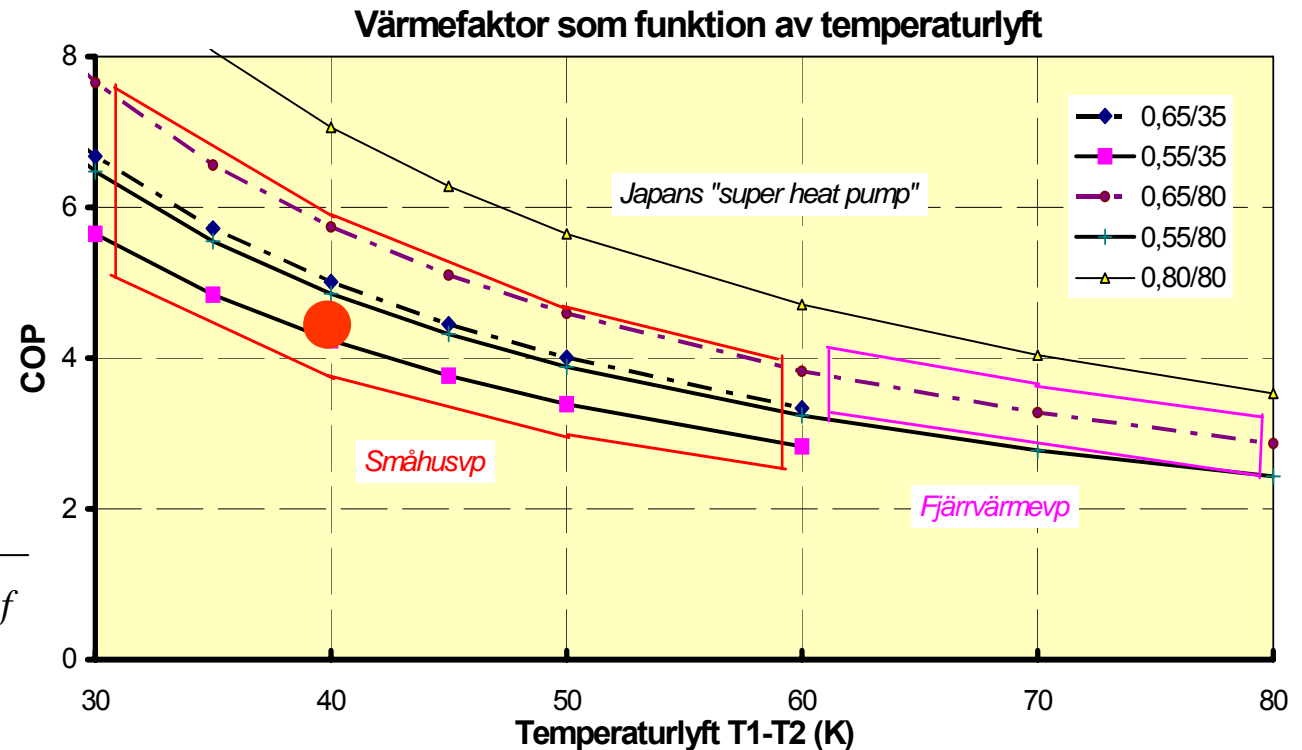
# VÄRMEFAKTORNS TEMPERATURBEROENDE

- Värmefaktor COP (Coefficient Of Performance)

$$COP_1 = \frac{\text{Avgiven värme}}{\text{Tillförd el}}$$

$$COP_{1C} = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$$COP_{vpa} = \frac{Q_{1vpa}}{W_{e,vp} + W_{e,p+f}}$$

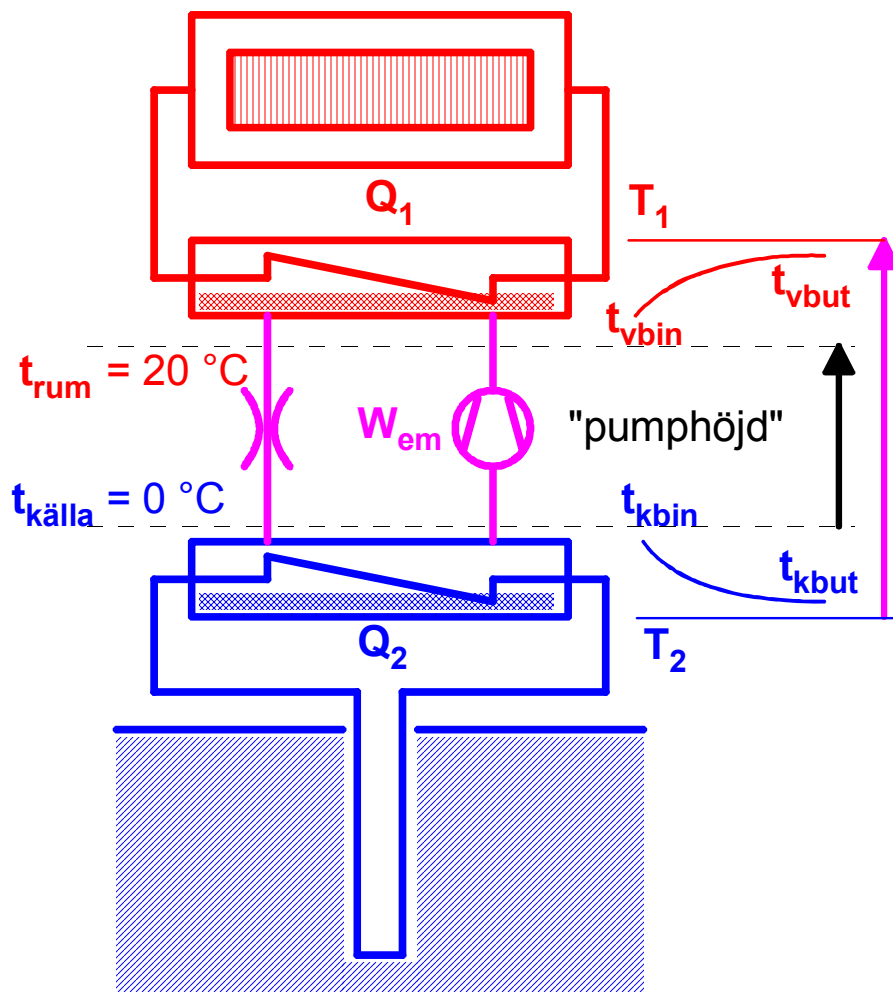


● Bergvärmepump med golvvärme



## Teori 4

## EXEMPEL



- $COP_{C1} = T_1 / (T_1 - T_2)$

- $t_1 = 20 \text{ °C}$ ,  $t_2 = 0 \text{ °C}$

- $\Rightarrow COP_{1C} = 14,7$

- $t_1 = 50 \text{ °C}$ ,  $t_2 = -10 \text{ °C}$

- $\Rightarrow COP_{1C} = 5,4$

- $COP_{1vp} = Q_1 / W_{em}$

- $\eta_{C1} = COP_{1vp} / COP_{1C}$

Komponenter

- $\Rightarrow \eta_{C1} = 0,5 \text{ till } 0,8$

- $\Rightarrow COP_{1vp} = 2,7 \text{ till } 4,3$

## Teori 5

## TEMPERATURNIVÅ OCH HJÄLPEFFEKTER

- Inverkan på **COP**
- Temperaturnivåer och drivenergier:

$$\frac{\Delta COP_1}{COP_1} = - \frac{\Delta \dot{W}_{e,vp}}{\dot{W}_{e,vp}} = \left[ \frac{\Delta T_{kb}}{T_1 - T_2} - \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{\Delta T_{vb}}{T_1 - T_2} - \frac{\dot{W}_{e,p}}{\dot{W}_{e,vp}} \right]$$

- **Exempel med återladdning**
- $\Delta T_{kb} = +4$  K borde ge  $\Delta COP/COP \approx +10$  %
- Men  $\Delta T_{vb} > +4$  K,  $\Delta W_{e,p}/W_{e,vp} = -9-10-24 \approx -43$  %
- Total minskning 40 - 60 %!

## Teori 5

## NYCKELFAKTORER FÖR EFFEKTIVITET

- **Temperaturnivåer** (COP ändrar sig med 2-3 % per °C!)
- **Värmeväxlare** (temperaturdifferenser, tryckfall, materialval, trycknivå)
- **Kompressor** (rätt typ för tillämpningen, dimensionering, *lastanpassning - kapacitetsreglering*)
- **Pumpar och fläktar**  
(verkningsgrader, drifftider, kapacitetsreglering)
- **Köldmedium** (effektivitet, långsiktigt acceptabelt, kostnad, säkerhet)
- **Köldbärare** (effektivitet, korrosivitet, stabilitet, kostnad, säkerhet, miljö)

$$COP_{vpa,medel} = \frac{\dot{Q}_{vpa} + \frac{R_{p1}}{R_{vpa}} \cdot \dot{W}_{e,p1}}{\dot{W}_{e,m} + \frac{R_{p1}}{R_{vpa}} \cdot \dot{W}_{e,p1} + \frac{R_{p2}}{R_{vpa}} \cdot \dot{W}_{e,p2}}$$

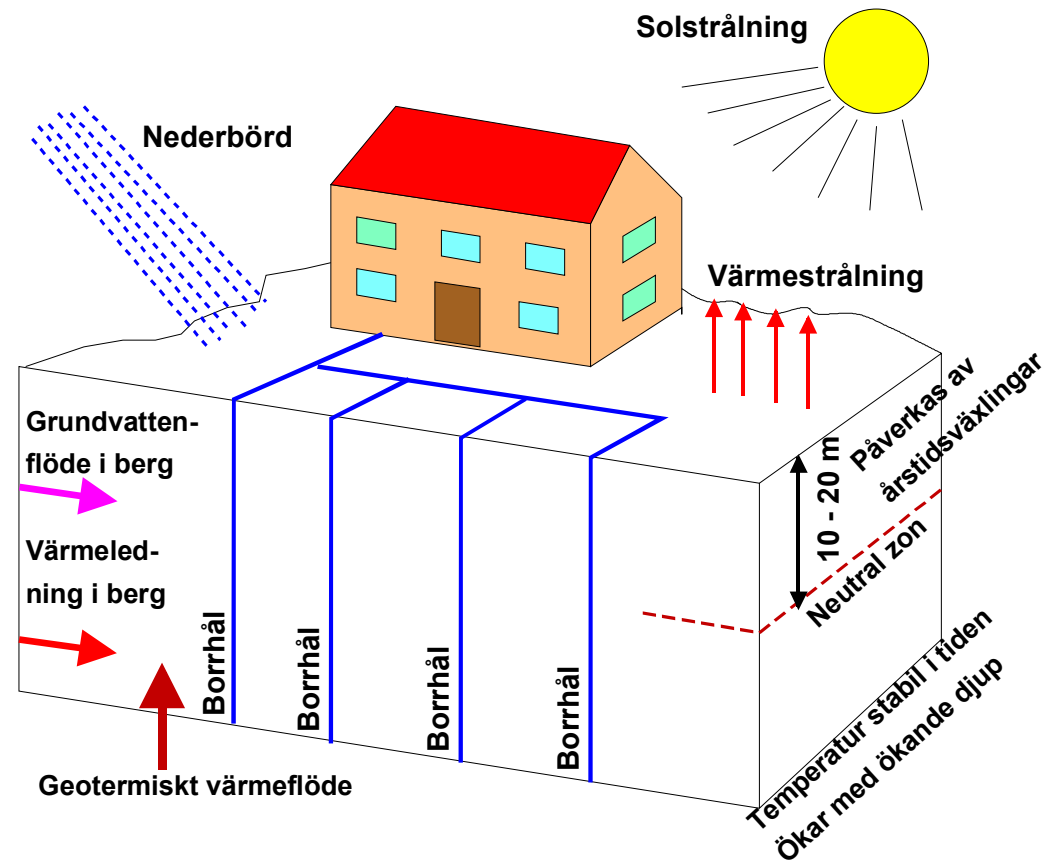
## Praktik 1

# MARKVÄRME MED VÄRMEPUMP

## - Värme, kyla (frikyla) och lagring i berg



- **Värmekälla**
- **Värmesänka**
- **Värmelager**

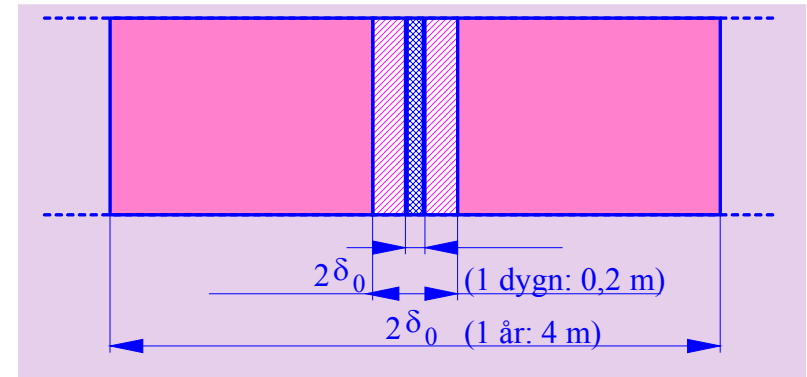


## Praktik 2

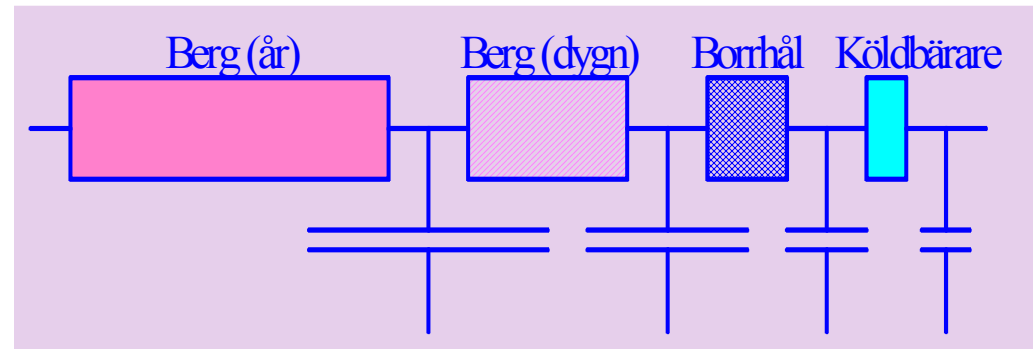
## BERGVÄRMESYSTEM

- **Fördelar**
  - Relativt god tillgänglighet; liten plats
  - Väl skyddad, lång livslängd
  - Relativt hög och jämn temperatur
  - Fungerar som lager (inträngningsdjup:  $\delta_0 = 0,2$  m för variationer över dygn  
 $\delta_0 = 4$  m över år;  
 $H = 100$  m ger  $1255$  m<sup>3</sup>!)
  - Möjlighet till frikyla, FTX
- **Nackdelar**
  - Kostnad (ca 250 kr/m)
  - Anmälan/tillstånd

## Egenskaper för enskilda borrhål



## Dynamisk ekvivalent

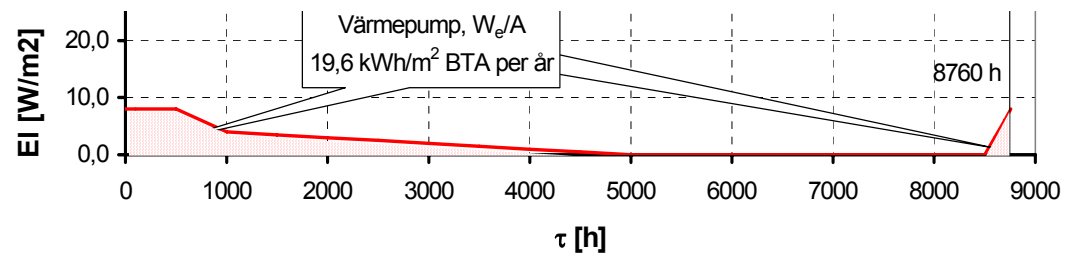
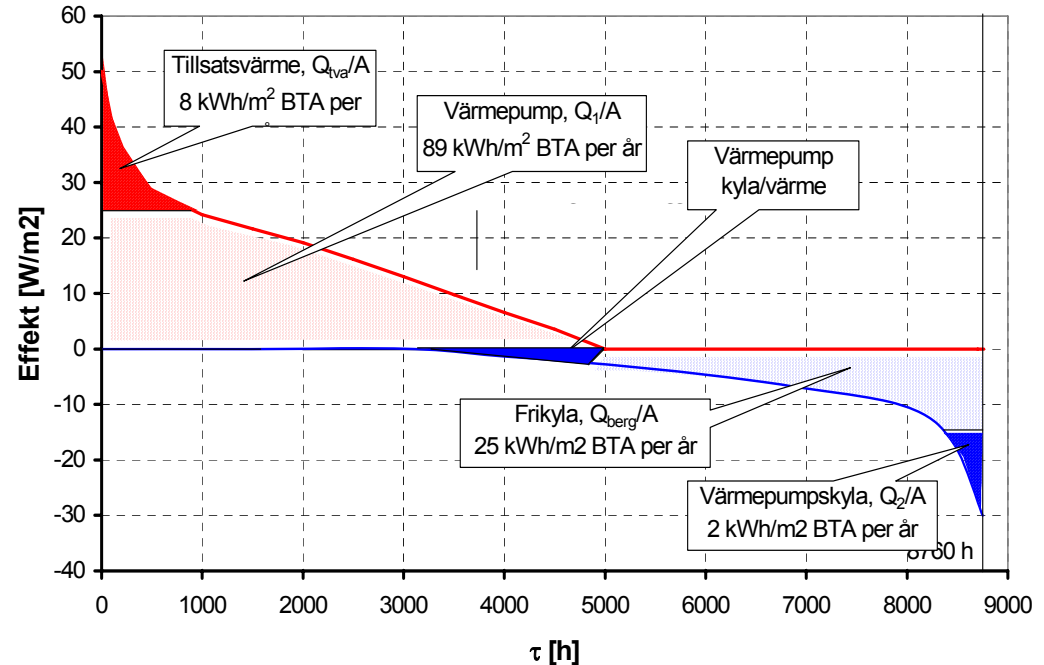


## Praktik 3

## KONTORSHUS: TILLÄMPNING MED FRIKYLA

- Rätt förhållande mellan värme- och kylbehov ger stor andel frikyla
- Rektangulära borrhålssystem
- Astronomihuset i Lund:  
 $< 28 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ ;  
 $< 10 \text{ W/m}^2$ !  
**1/10 av normalt!**
- Värmepump som spets för kyla/värme?

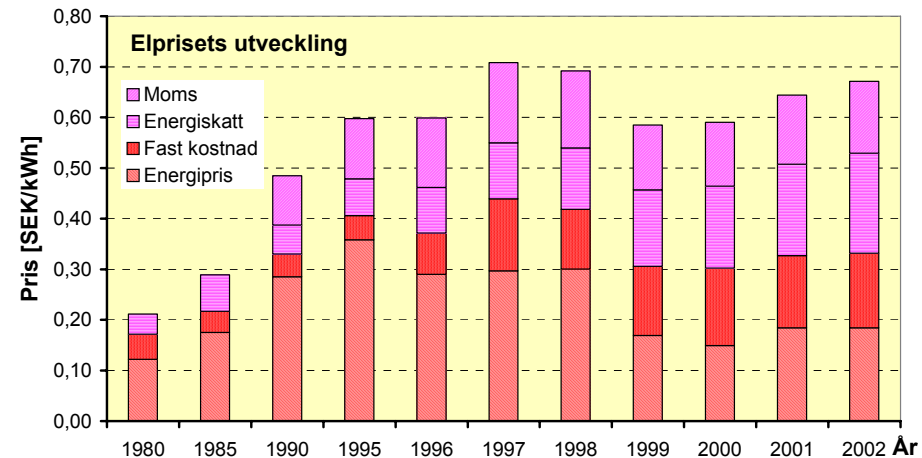
Varaktighetsdiagram för kyl- och värmeeffekt



## Praktik 4

## SMÅHUS: FÖRUTSÄTTNINGAR

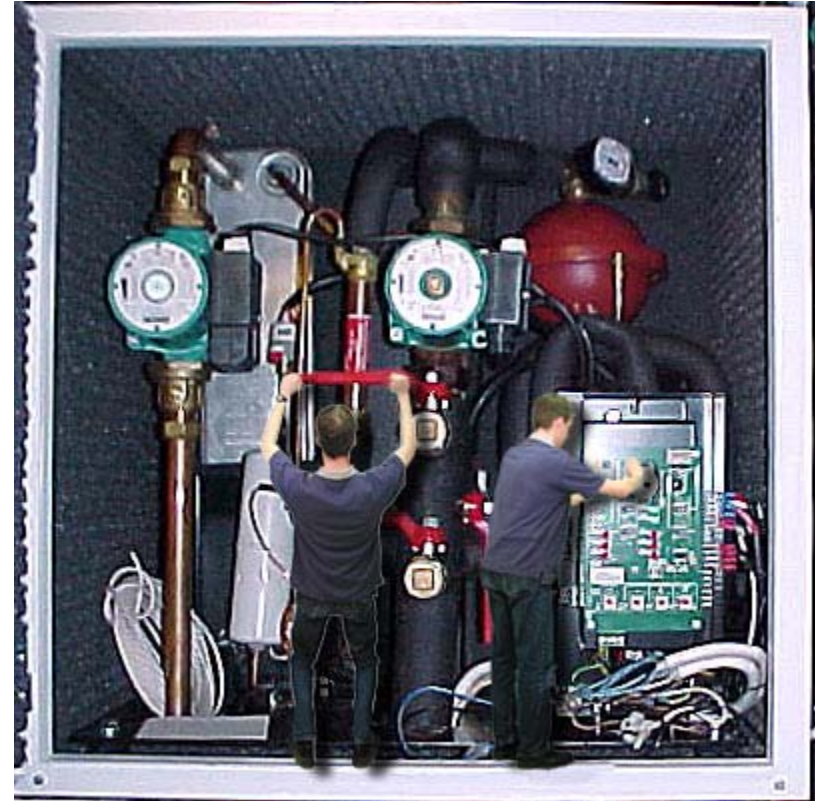
- **Borås** (Nutek/STEM referens)
  - Klimatzon 4,  $t_{\text{år}} = +5,8 \text{ } ^\circ\text{C}$
- **Byggnad:** 1977, fristående
  - BRA = 140 + 10 m<sup>2</sup>
  - torpargrund
  - isolering 12 cm ( $U \approx 0,35 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ),
  - fönster 2-glas ( $U \approx 2 \text{ W/m}^2/\text{K}$ )
- **Installationer:**
  - F-ventilation, 165 m<sup>3</sup>/h (0,5 oms/h)
  - Direktel , 10,3 kW
  - El-beredare, 300 liter, 1,5/3 kW
- **Totalt köpt energi:**  
25 MWh/år, 167 kWh/m<sup>2</sup>/år



## Praktik 5

## VINNARKONCEPT

- **Fast pris 39 000 SEK**
  - värmepump ca. 4 kW
  - borrhål 60 m
  - flätkonvektor ca. 4 kW
- **Tillägg 3 000 SEK**
  - större flätkonvektor
  - en radiator
- **Förväntad besparing**
  - 9000 kWh/år (uppvärmning)
- **Utvärdering + förberedelse av framtida modifieringar**

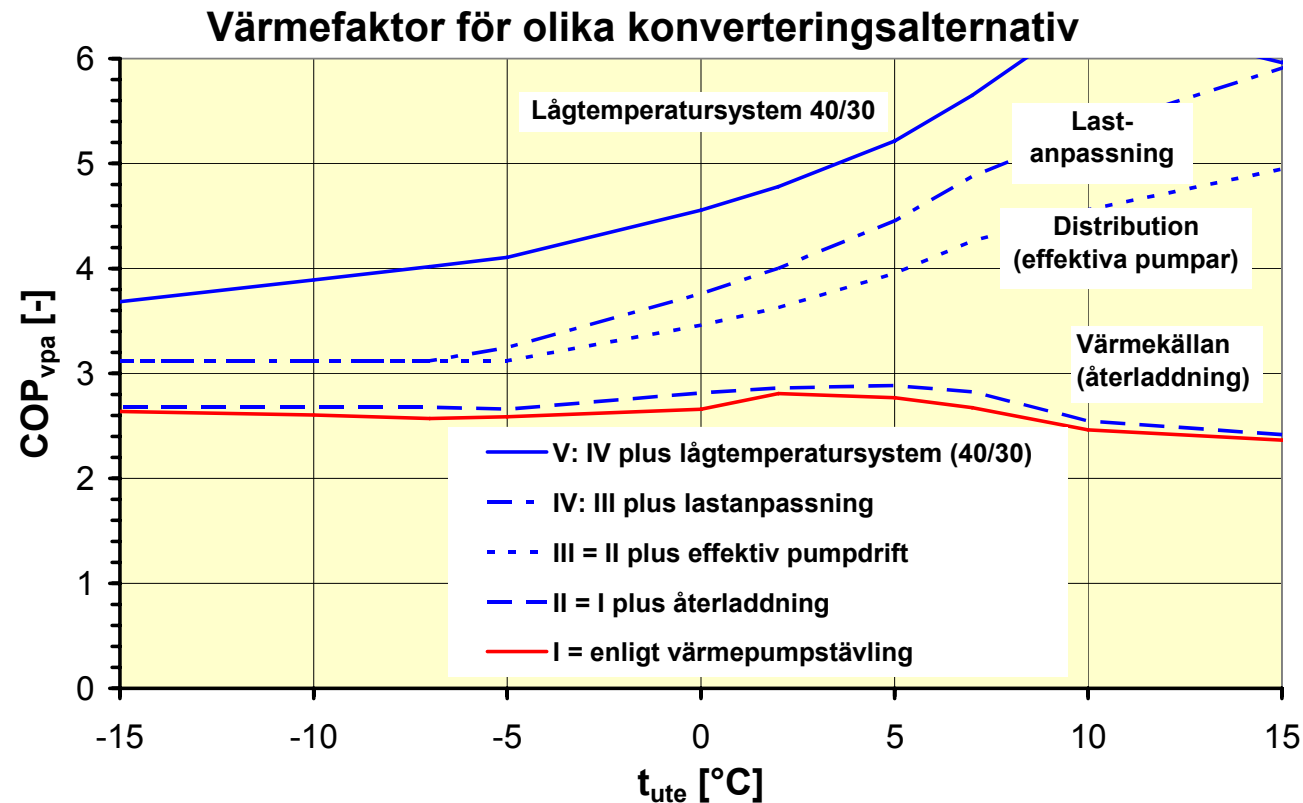




## Praktik 6

# BERÄKNAD SPF FÖR VINNARKONCEPTET + TÄNKBARA FÖRBÄTTRINGAR

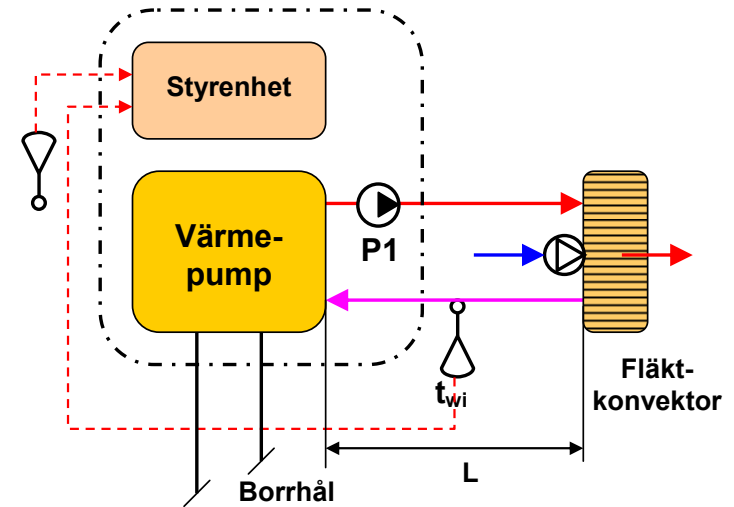
1. Tävlingsförslag
2. Återladdning
3. Pumpdrift
4. Lastanpassning (ackumulator)
5. Lågtemperatursystem



## Praktik 7

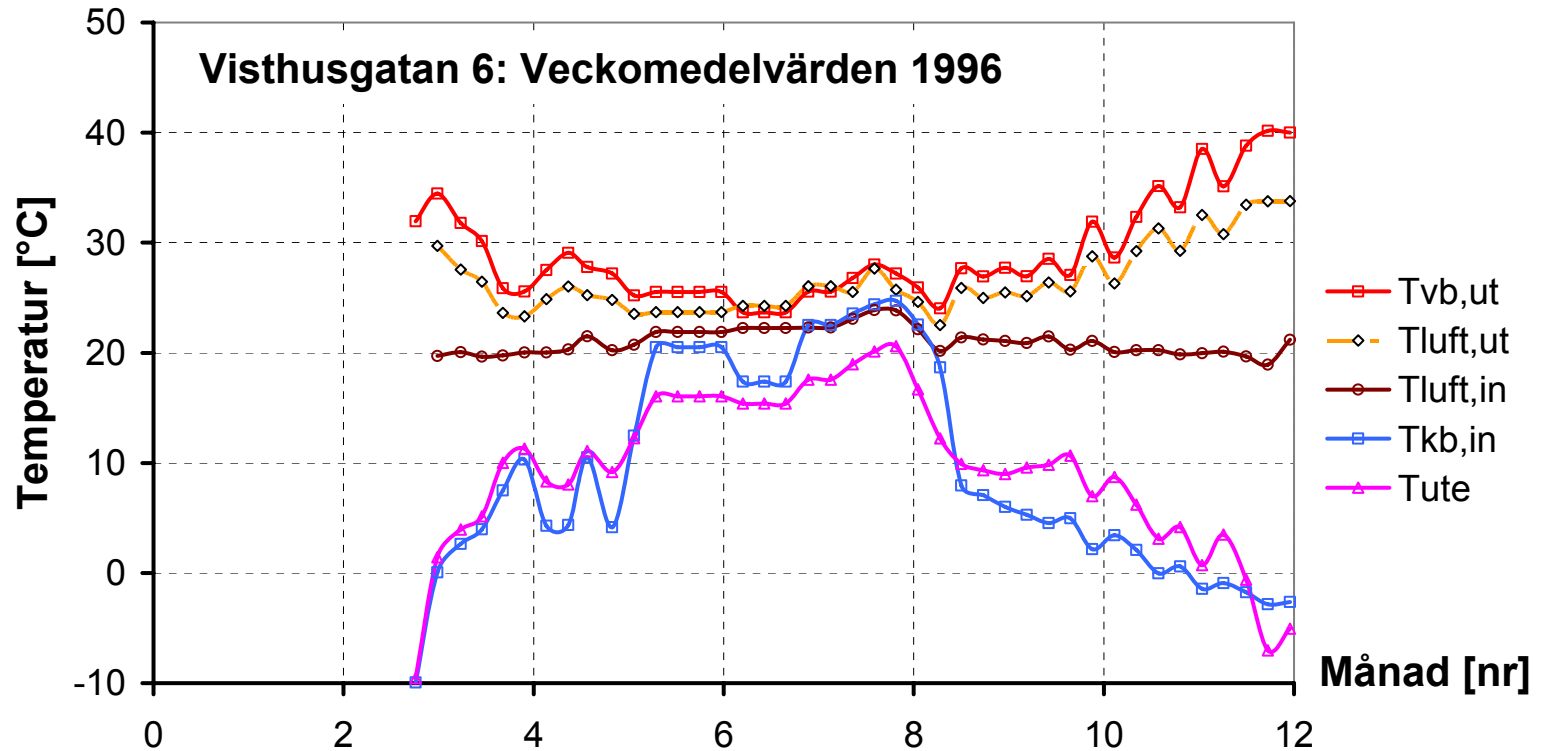
## OMBYGGNAD 1: "VINNARKONCEPTET"

- **Enkel värmepump**  
("kylskåpsmodul"  
0,6x0,6x0,6 m)
- **Enkel styrning**  
(utetemperaturbaserad  
"kurvstyrning")
- **Enkelt värmesystem**  
(fläktkonvektor +  
bibehållna el-radiatorer)
- **Bibehållen el-beredare**



## Praktik 8

## OMBYGGNAD 1: RESULTAT



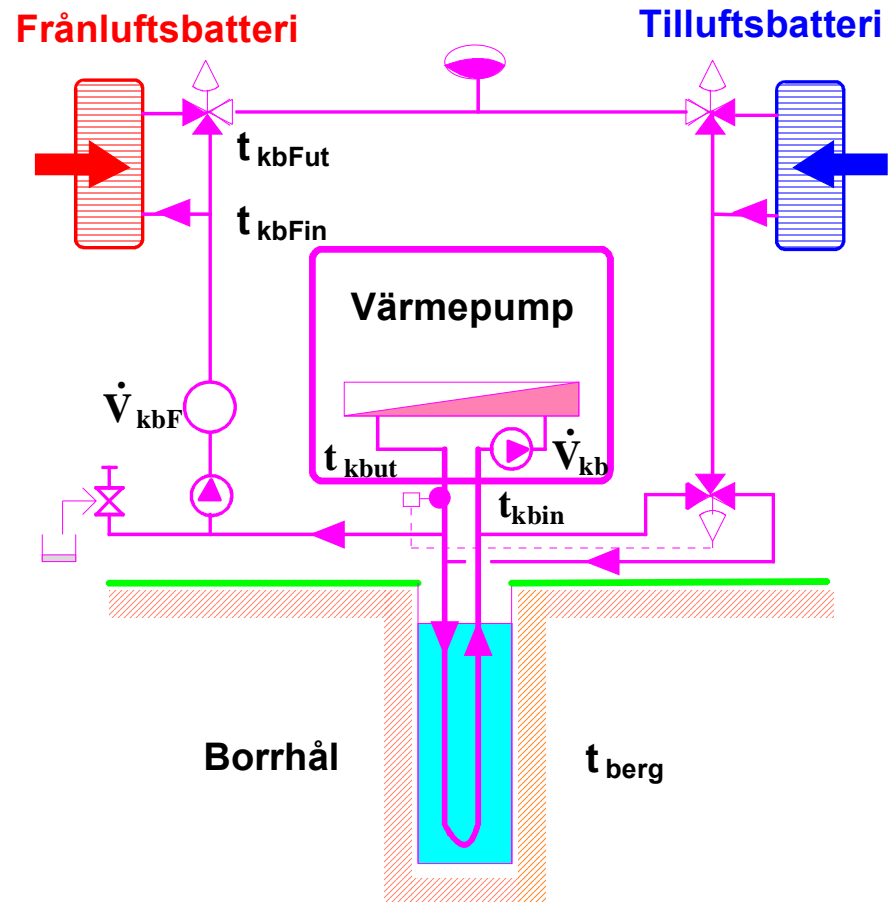
- **Besparing ca. 9000 kWh på uppvärmning**

## Praktik 9

## OMBYGGNAD 2: ÅTERLADDNING

## Värme – kyla - ventilation

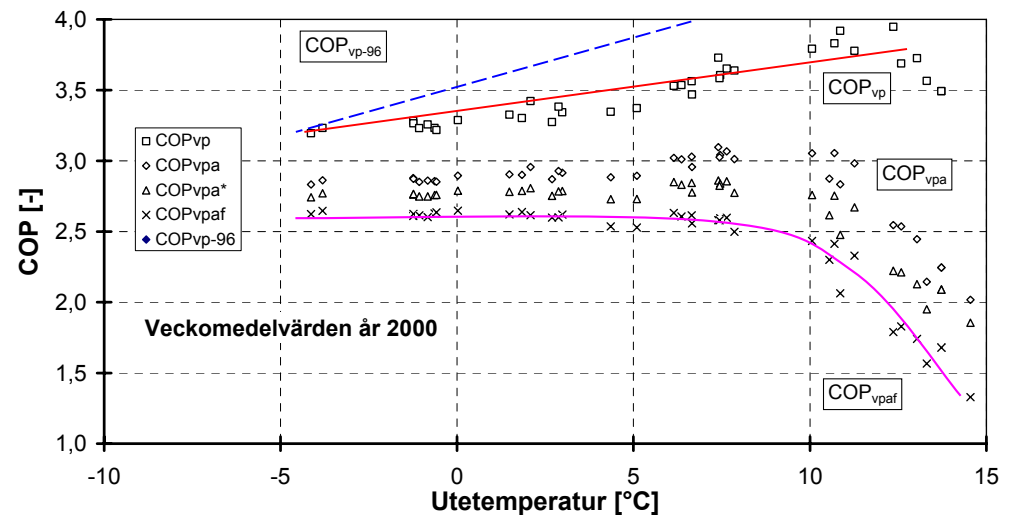
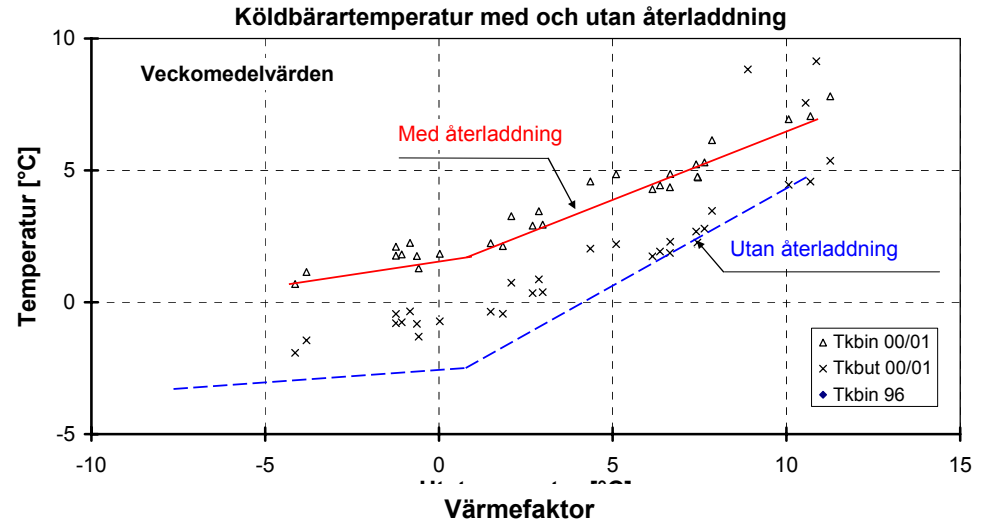
- **Återladdning:**
  - frånluftsbatteri **TILL**
  - tilluftsbatteri **FRÅN**
- **Komfortkyla**
  - frånluftsbatteri **FRÅN**
  - tilluftsbatteri **TILL**
- **Värmeåtervinning**
  - frånluftsbatteri **TILL**
  - tilluftsbatteri **TILL**



Praktik 10

# OMBYGGNAD 2: RESULTAT

- Köldbärartemperaturen ökar
- Men värmefaktorn minskar!
- Varför?



## Praktik 11

## OMBYGNAD 2: RESULTAT

Funktion	Driv- effekt [W]	Drifftid		Driv- energi [kWh]	Parasit- kvot [-]
		timmar [h]	relativ [-]		
Kompressor	1055	2995	0.34	3159	1.00
Köldbärarpump	96	2995	0.34	288	0.09
Värmebärarpump	48	6595	0.75	317	0.10
Fläktkonvektor	61	6595	0.75	402	0.13
Återladdningspump	37	5498	0.63	203	0.06
<b>Parasitsumma</b>	<b>242</b>			<b>1210</b>	<b>0.38</b>
<b>Total summa</b>	<b>1297</b>			<b>4369</b>	

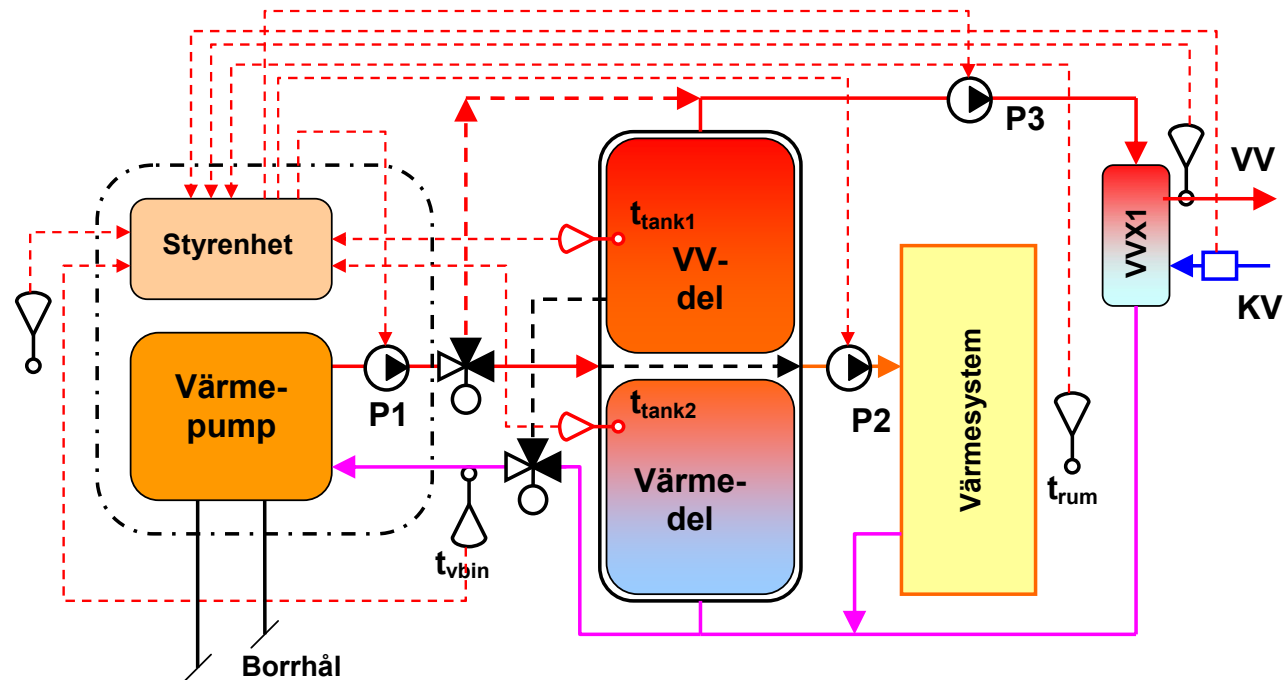
- **Parasitkvot: 0.5 → 0.38 → 0.08** ("state-of-the-art")

## Praktik 12

# OMBYGGNAD 3+4: STYRNING OCH LASTANPASSNING

”Varför enkelt när man kan göra det så vackert komplicerat?”

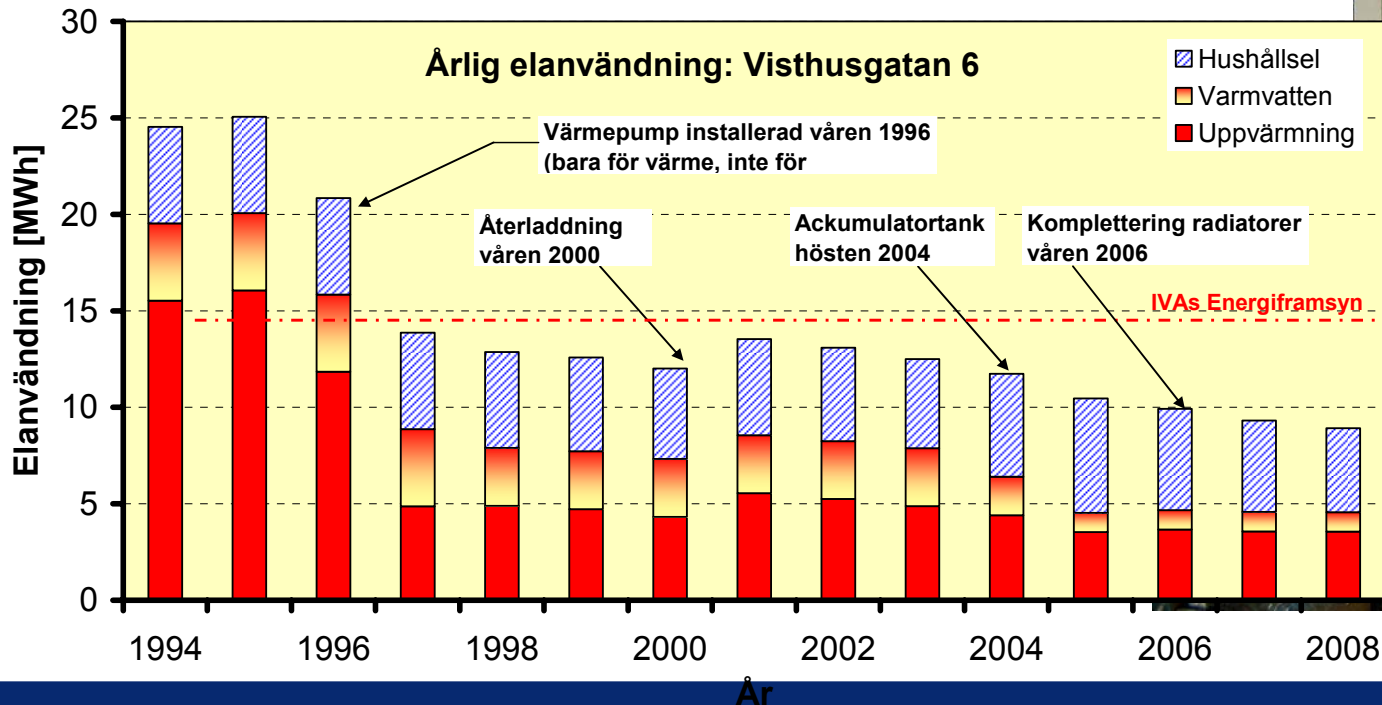
- 1 Värmepump
- 2 Återladdning
- 3 Pumpdrift
- 4.1 Specialtank
- 4.2 Styrsystem



## Praktik 13

## OMBYGGNAD 3+4: RESULTAT

- **Ökad besparing:** SPF = 2,7 → SPF = 3,7  
(varmvatten + lägre värmesystemtemperatur)
- **Längre drifttider, färre starter** (tillförlitlighet)
- **Bättre reglerbarhet**





## SAMMANFATTNING

- **Naturen ställer upp som värmekälla och lager**
  - Kraftigt minskat behov av *köpt* energi
- **Besparing: 25 MWh/år → 9-10 MWh /år**
  - 4,5 MWh/år för värme och varmvatten
  - 167 kWh/m<sup>2</sup>/år → 63 kWh/m<sup>2</sup>/år
- **Typiskt 70-tals direktelvärt småhus med lägre specifik energianvändning än moderna "passivhus"**
- **Bättre styrning av inomhusklimatet än i "passivhus"**
- **Ekonomi: Rak pay-off 5 år, nuvärde 260 000 SEK**
  - Investering ca. 80 000 SEK, besparing ca. 16 000 SEK/år



## Framtid 1

# FRAMTIDEN

## - FÖR 15 ÅR SEDAN (1996-2005)

- **System**

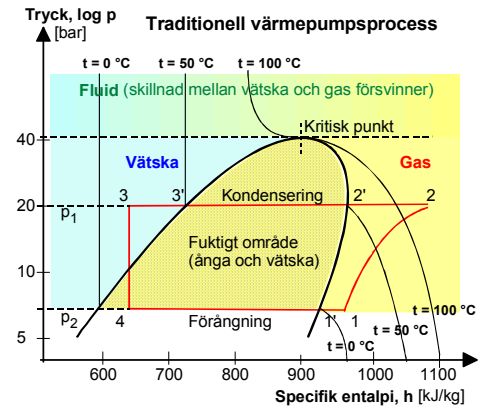
- Köldmedier (akut, nya och/eller naturliga?)
- Billig, indirekt bergvärme (direktel-hus)
- Fjärrvärme/fjärrkyla

- **Komponenter** (villavp 2-25 kW värme)

- Kolv/rotationskolv/Scrollkompressor: effektivare, nya köldmedier
- Vidareutveckling av frekvensstyrning, elektronisk expansionsventil
- Plattvärmväxlare, nya ytstrukturer, "bilkylare" (luftvärmväxlare)

- **Prestanda**

- Villavärmevp:  $\eta_{C1} = 0,50-0,65$ ; SPF = 3-4 (mark), 2-3 (uteluft), 3-4 (frånluft)
- Fjärrvärmevp:  $\eta_{C1} = 0,65-0,70$ ; SPF = 2,5-3,5 (avloppsvatten), 4-6 (fjärrvärme + fjärrkyla)

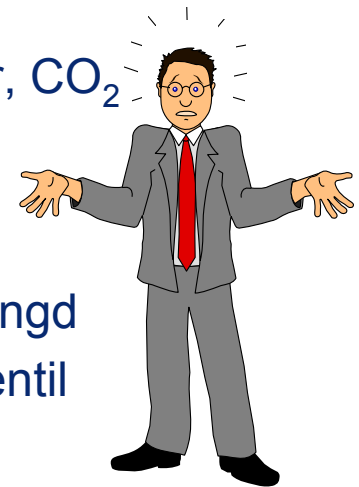


# NUTID OCH FRAMTID

## - PÅ KORT SIKT (2005-2015)

Tillämpningar: En- och flerbostadshus, lokaler

- **System**
  - **Integrerade system:** "kallfjärrvärme", flytta värme i tid och rum
  - **Konvertering:** direktel-hus, flerbostadshus
  - **Täckningsgrad:** ökar, värmepump som tillsats?
  - **Tappvatten och ventilation:** relativ ökning, systemlösningar, CO<sub>2</sub>
  - **Optimering:** drift och dimensionering ("parasiteffekter")
- **Komponenter**
  - **Kompressorer:** effektivare, naturliga köldmedier, oljor, livslängd
  - **Styr- och regler:** frekvensstyrning, elektronisk expansionsventil
  - **Motorer:** effektiva för kompressorer, pumpar, fläktar
  - **Värmeväxlare:** "bilkylare" (luft, laminärströmning)
- **Prestanda:**  $\eta_{C1} = 0,6-0,7$ ;  $\eta_{C1} = 0,7-0,8$  (>1 MW); SPF = > 4



## Framtid 3

# FRAMTIDEN - PÅ LÅNG SIKT (2050)

- **System**
  - Ny försörjningsteknik: Förgasning, transmutation, ...
  - Alternativa värmepumpsprocesser: Rankine<sup>-1</sup>, Brayton<sup>-1</sup>, Stirling<sup>-1</sup>, Carré<sup>-1</sup>, *magnetisk*, termoelektrisk, ...
  - Integrerade system: "Trigeneration, "energikombinat", ...
  - Självoptimerande styrsystem med diagnostik
- **Komponenter**
  - Högeffektiva el-motorer, linjärmotorer
  - Effektiva och billiga frekvensstyrningar och elektroniska expansionsventiler
  - Högeffektiva luftvärmeväxlare (inklusive avfrostningsteknik)
- **Prestanda:**  $\eta_{C1} > 0,8$ ;  $\eta_t > 0,7$ . *Tekniksprång?*