

# SÅ MYCKET ENERGI KAN VI SPARA KOSTNADSEFFEKTIVT

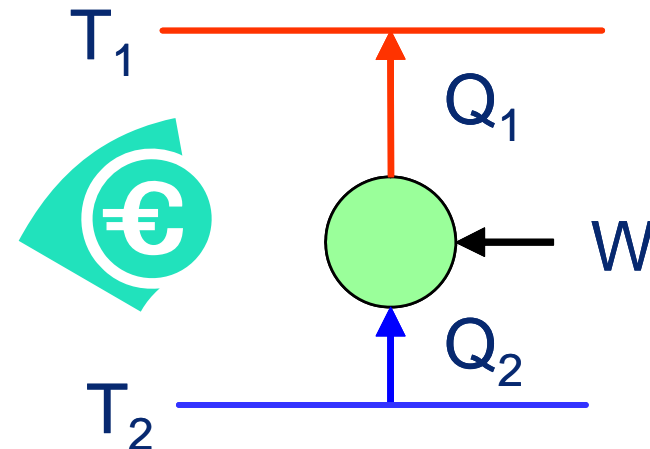
- Lite teori och två praktikexempel  
med värmepump

Per Fahlén

Chalmers tekniska högskola

# OLIKA PERSPEKTIV PÅ BESPARING

- **Energibesparing**
  - Köpt, använd eller primär?
- **Ekonomisk besparing**
  - Privat/företagsekonomi
  - Samhällsekonomi:  
Regering, IVA

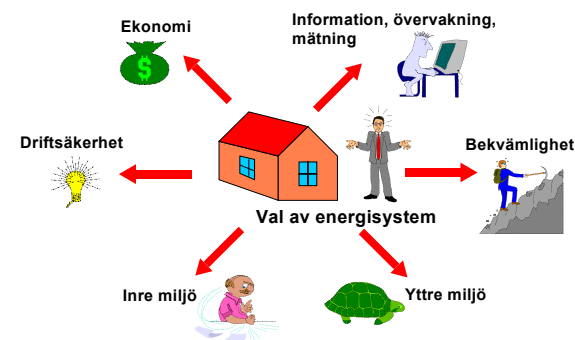


- **Tekniska förutsättningar: Temperatur och hjälpeffekt**

- **EXEMPEL FRÅN PRAKTIKEN**

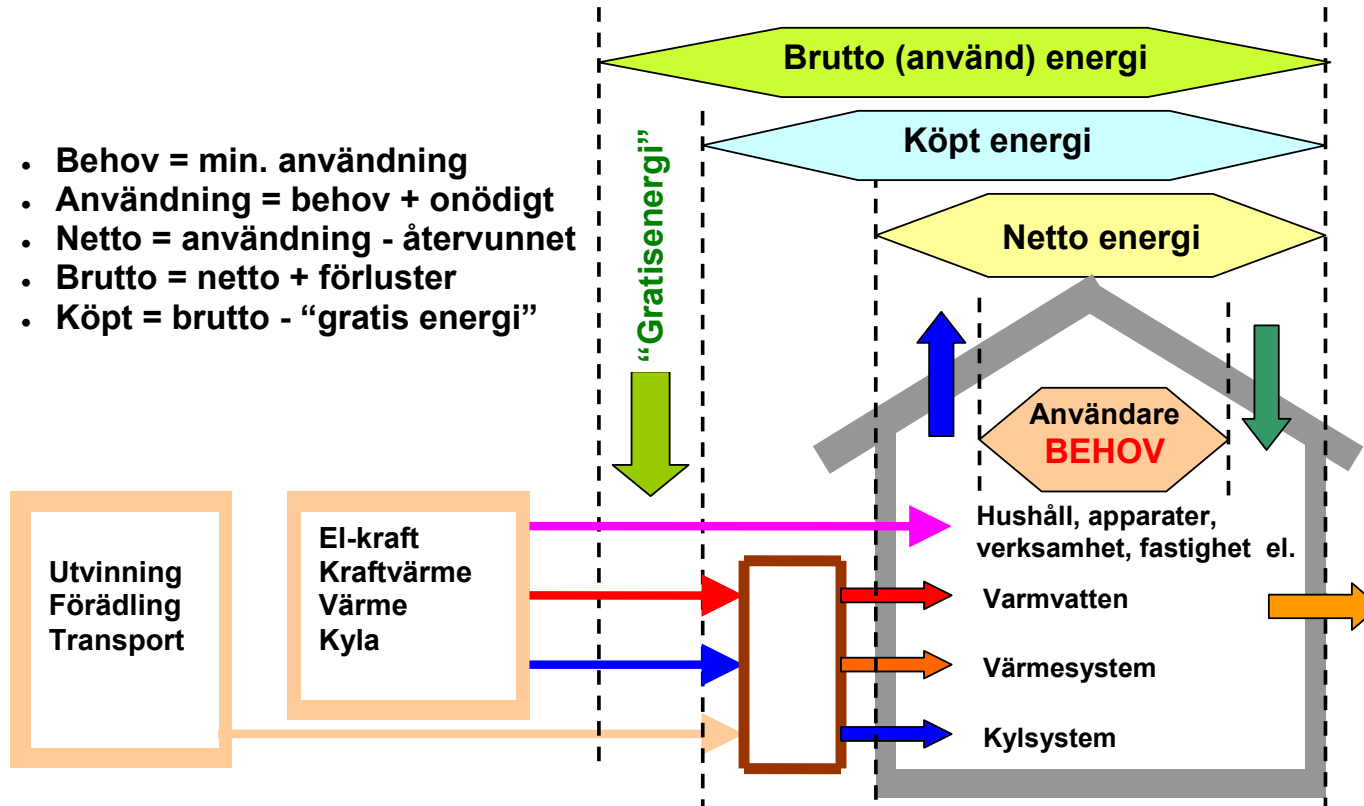
1: Ombyggnad av småhus

2: Ombyggnad av kontorshus



## Energi 1

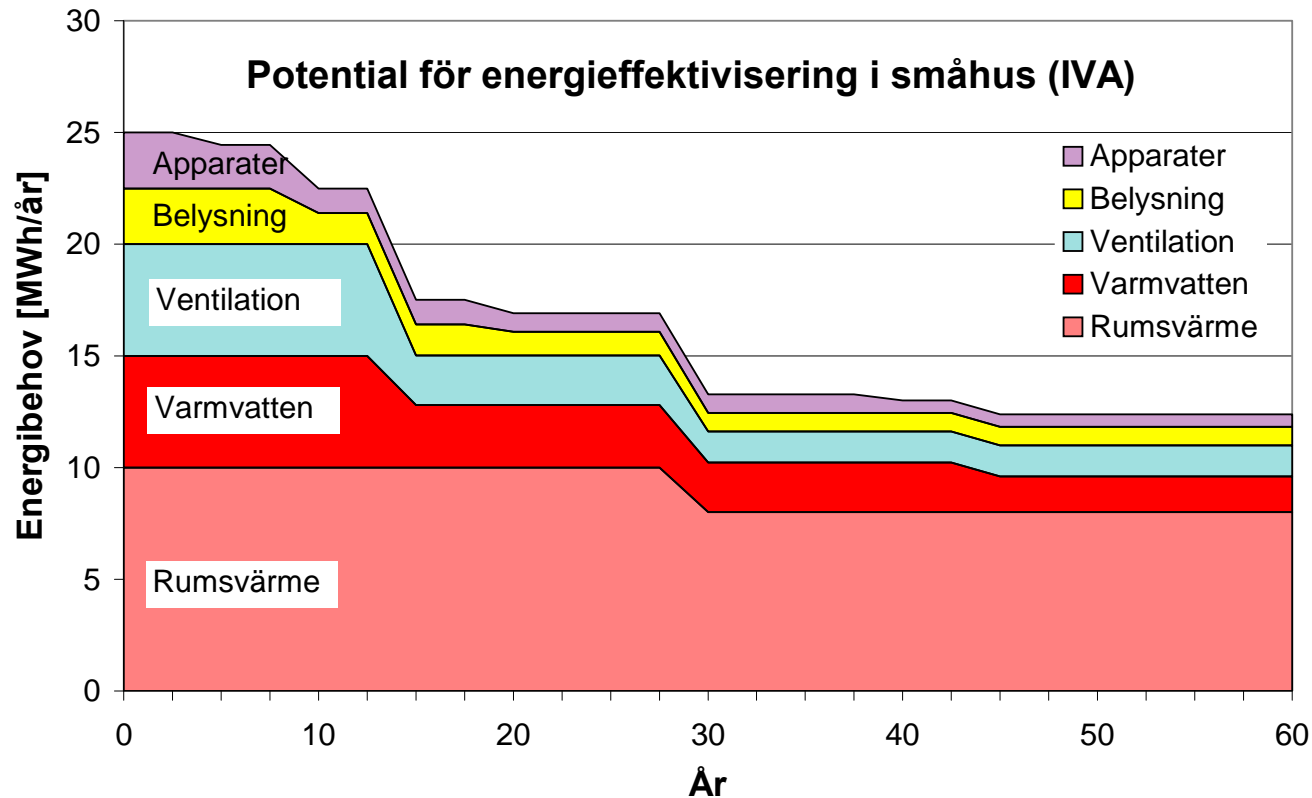
## ENERGI I BYGGNADER



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

## Energi 2

## IVA's Energiframsyn, svensk framtid?

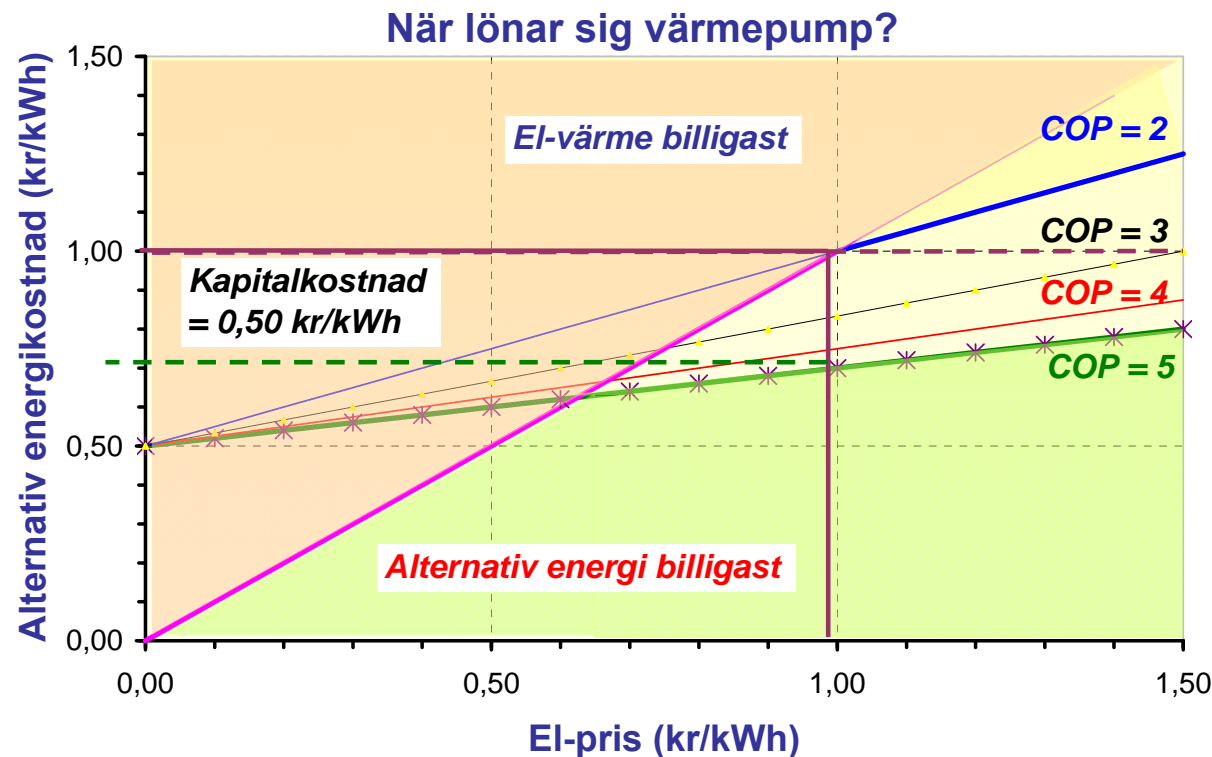


- Halvering av dagens **energianvändning** till år 2050
- Halvering av **köpt energi** är lätt redan idag!

## Ekonomi 1

# KONKURRERANDE ALTERNATIV

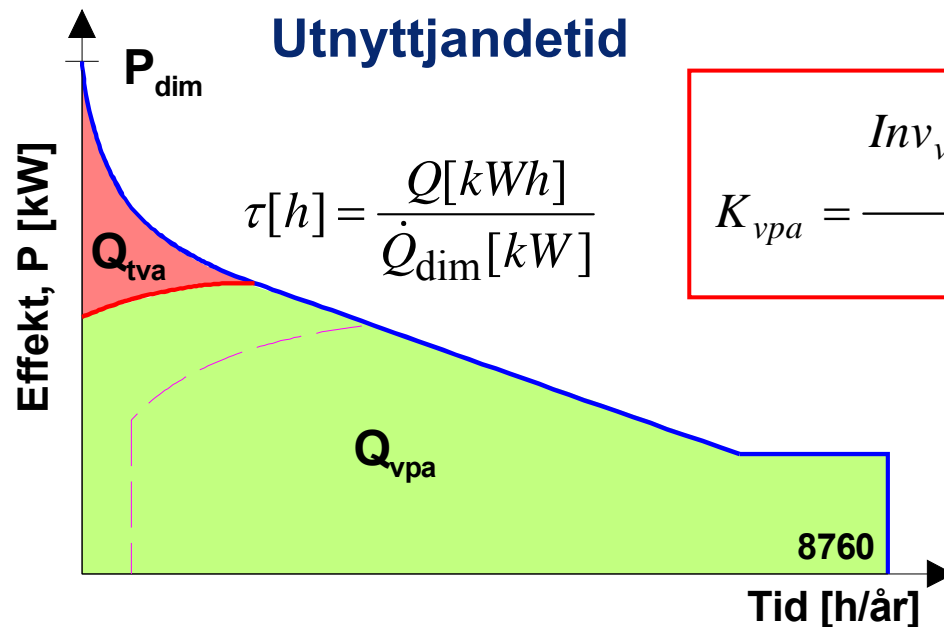
- **Investering**
  - värmepump
  - värmekälla
  - värmesänka
- **Elpris**
  - rak taxa
  - tariff taxa
- **Kostnad för alternativ till värmepump**
- **Dimensionering? Jämför skiftet 1985!**



## 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]  
 SPF = årsvärmefaktor [-]

Tillsatsvärme p.s.s.

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

## Ekonomi 3

## UTNYTTJANDETID

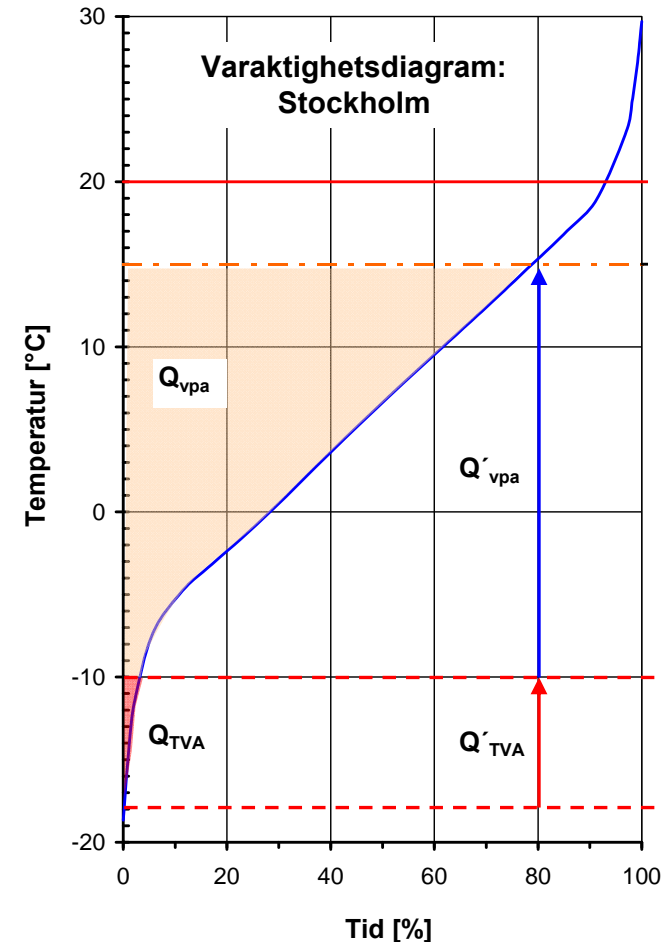
- Utnyttjandetid för värmeanläggning

$$\tau_{u,va} = \frac{Q_{va,D}}{\dot{Q}_{va,D}} \quad \text{T.ex. } \tau_{u,va} = 2629 \text{ [h/år]}$$

- Utnyttjandetid för värmepumpsanläggning

$$\tau_{u,vpa} [h] = \frac{Q_{vpa} [kWh]}{\dot{Q}_{vpa} [kW]}$$

$$\tau_{u,vpa} = \frac{q_{vpa} (P_{vpa})}{P_{vpa}} \cdot \tau_{u,va}$$



## Ekonomi 4

# DIMENSIONERING

## - Effekt och energi

- **Effektäckning värme**

$$p_{vpa} \text{ [kW}_{vpa}/\text{kW}_{va,D}]$$

- Effektkostnad

$$I_{vpa} \text{ [SEK/kW}_{vpa}]$$

- **Energitäckning värme**

$$q_{vpa} = q_{vpa}(p_{vpa}) \text{ [-]}$$

- Klimat

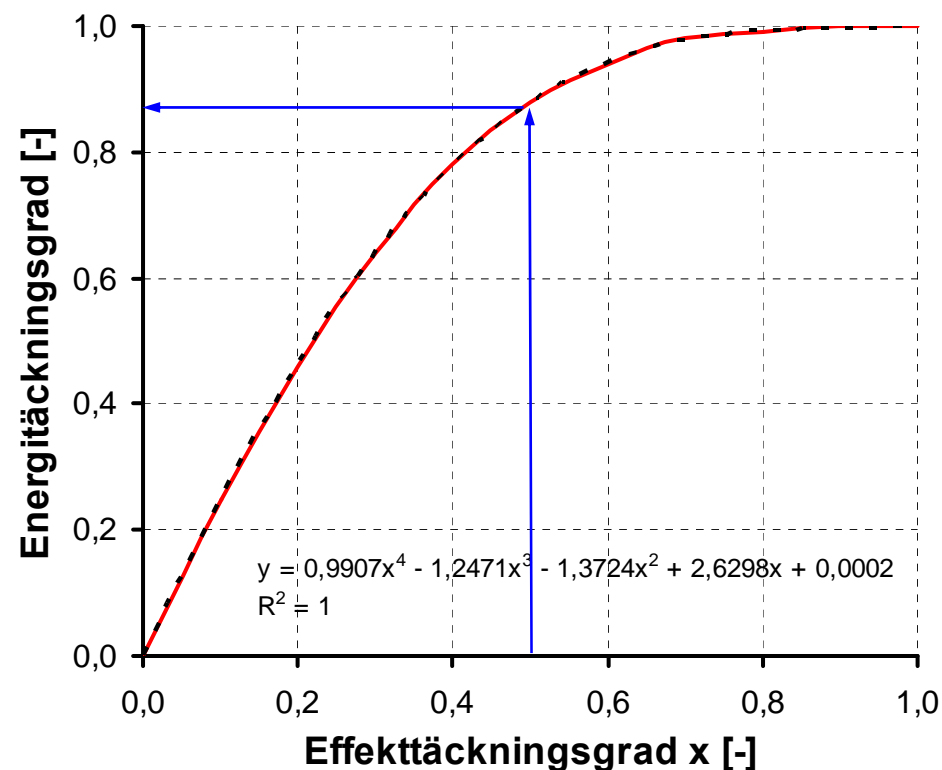
- Byggnad

- Dimensionering

- Energifkostnad

$$K_{vpa} \text{ [SEK/kWh}_{vpa}]$$

- **T.ex. Stockholm**





## Ekonomi 5

## DIMENSIONERING

- Kapitalkostnad för **värmepumpsvärme**• **Investeringskostnad**

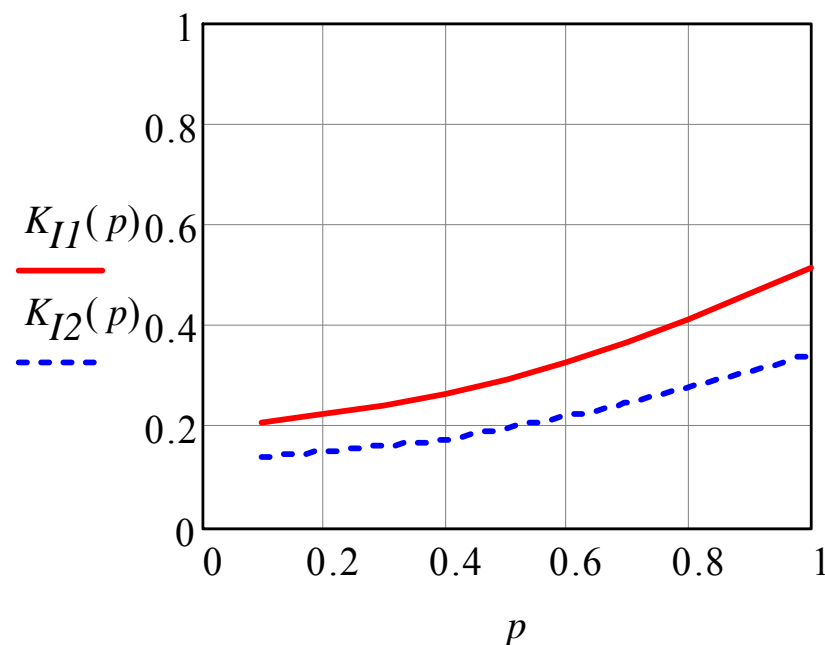
- $I_{vpa1} = 15\ 000\ \text{SEK/kW}_{vpa}$
- $I_{vpa2} = 10\ 000\ \text{SEK/kW}_{vpa}$

• **Kapitalkostnad för värme**

$$K_{vpa} = K_{vpa}(p_{vpa})$$

$$K_{vpa} = I_{vpa} \cdot a \cdot \frac{p_{vpa}}{q_{vpa}(p_{vpa}) \cdot \tau_{u,va}}$$

## Kapitalkostnad för värme som funktion av effekttäckningen



## Ekonomi 6

## DIMENSIONERING

- Total kostnad för **värmepumpsvärme**

- **Investeringskostnad**

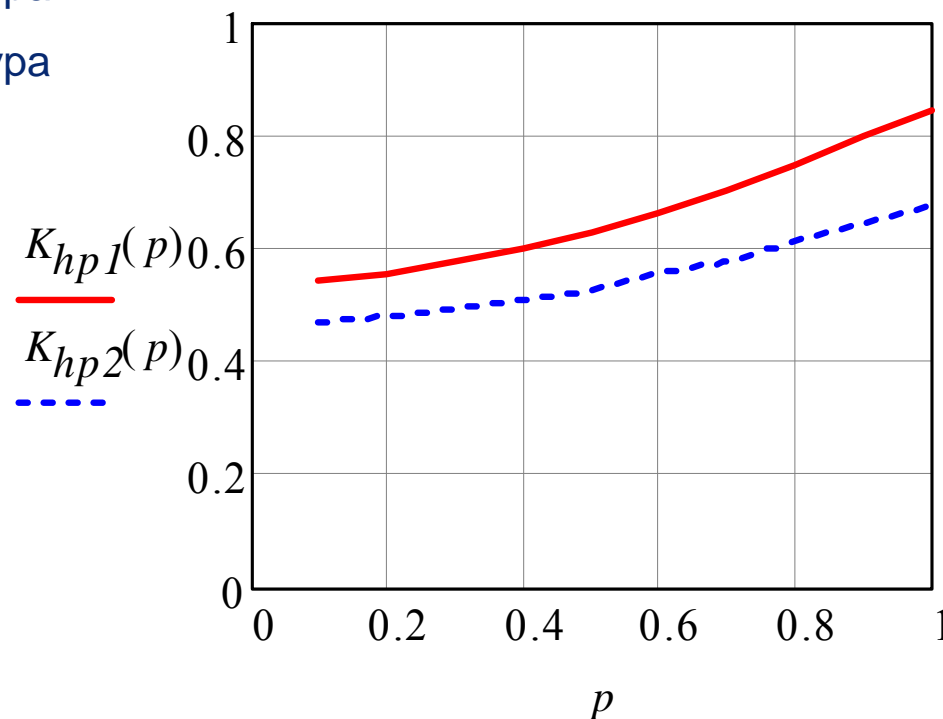
- $I_{vpa1} = 15\ 000\ \text{SEK/kW}_{vpa}$
- $I_{vpa2} = 10\ 000\ \text{SEK/kW}_{vpa}$

- **Driftskostnad**

- drift (el),  $K_{el}$   
 $SFP_{vpa} = 3$
- underhåll

$$K_{vpa} = K_{I,vpa} + \frac{K_{el}}{SFP_{vpa}}$$

Värmekostnad som funktion av effektäckning



## Ekonomi 7

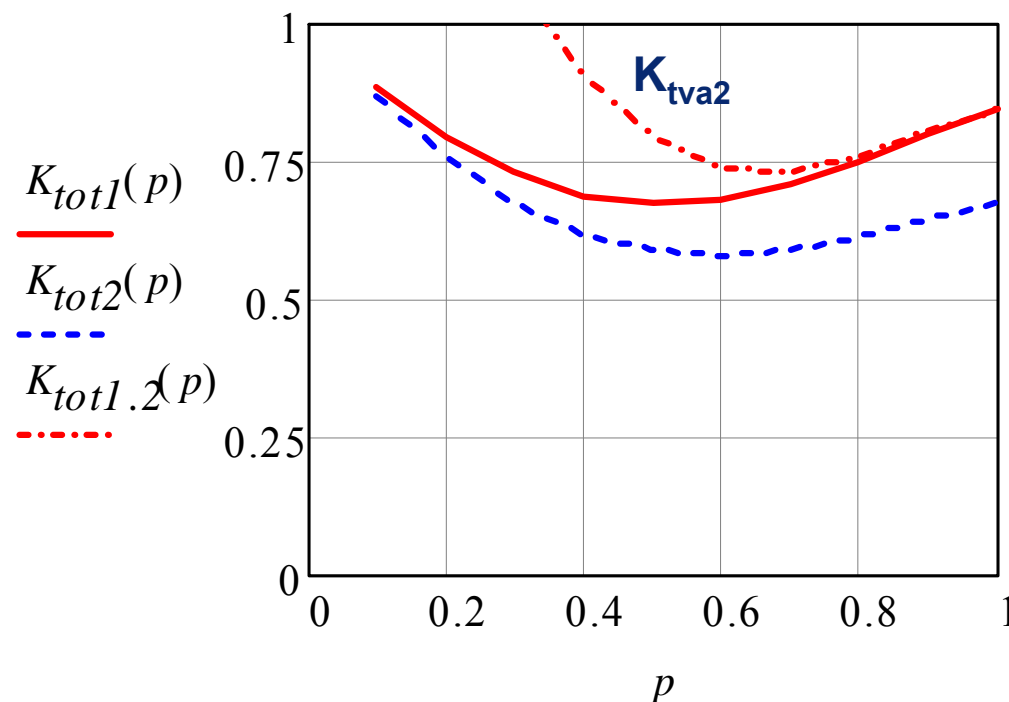
# DIMENSIONERING

## - Total värmekostnad

$$K_{tot} = q_{vpa}(p_{vpa}) \cdot \left[ K_{vpa}(p_{vpa}) + \left( \frac{1}{q_{vpa}(p_{vpa})} - 1 \right) \cdot K_{tva} \right]$$

Värmekostnad

- **Värmepumpsvärme,  $K_{vpa}$** 
  - Kapital (hög)
  - Drift (låg); SFP = 3
- **Tillsatsvärme,  $K_{tva}$** 
  - Kapital (låg)
  - Drift (hög)
    - Alt. 1: 1 SEK/kWh,
    - Alt. 2: 2 SEK/kWh

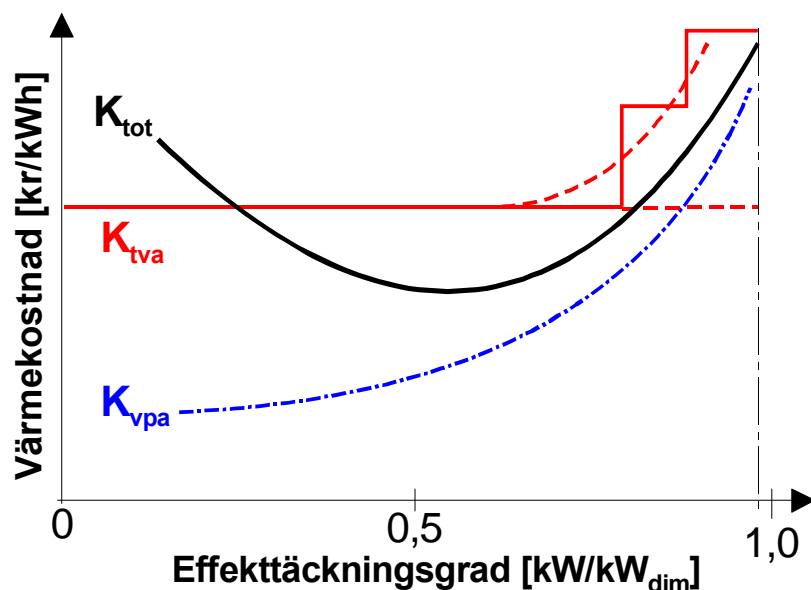


## Ekonomi 8

## 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

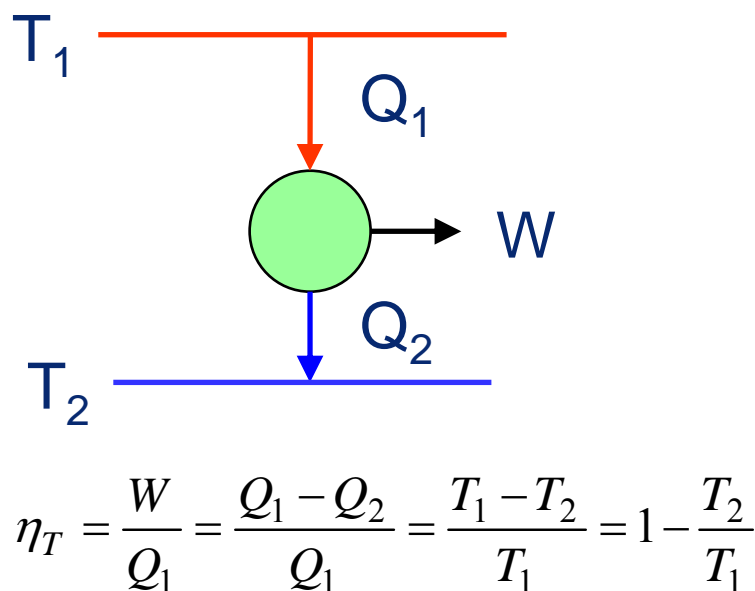
- Effekttaxa kan premiera täckningsgrad

## Teori 1

# VÄRMEPUMPAR OCH TERMODYNAMIKENS 2:a HUVUDSATS

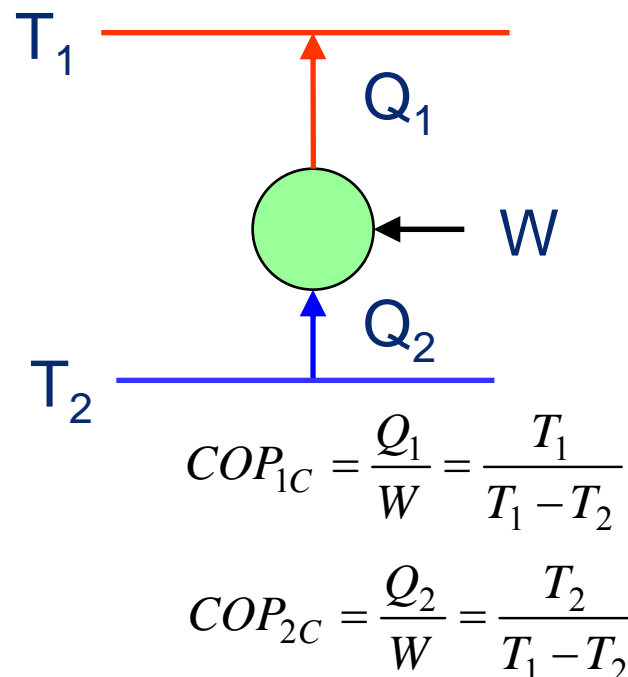
- **Värmekraftprocess**

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



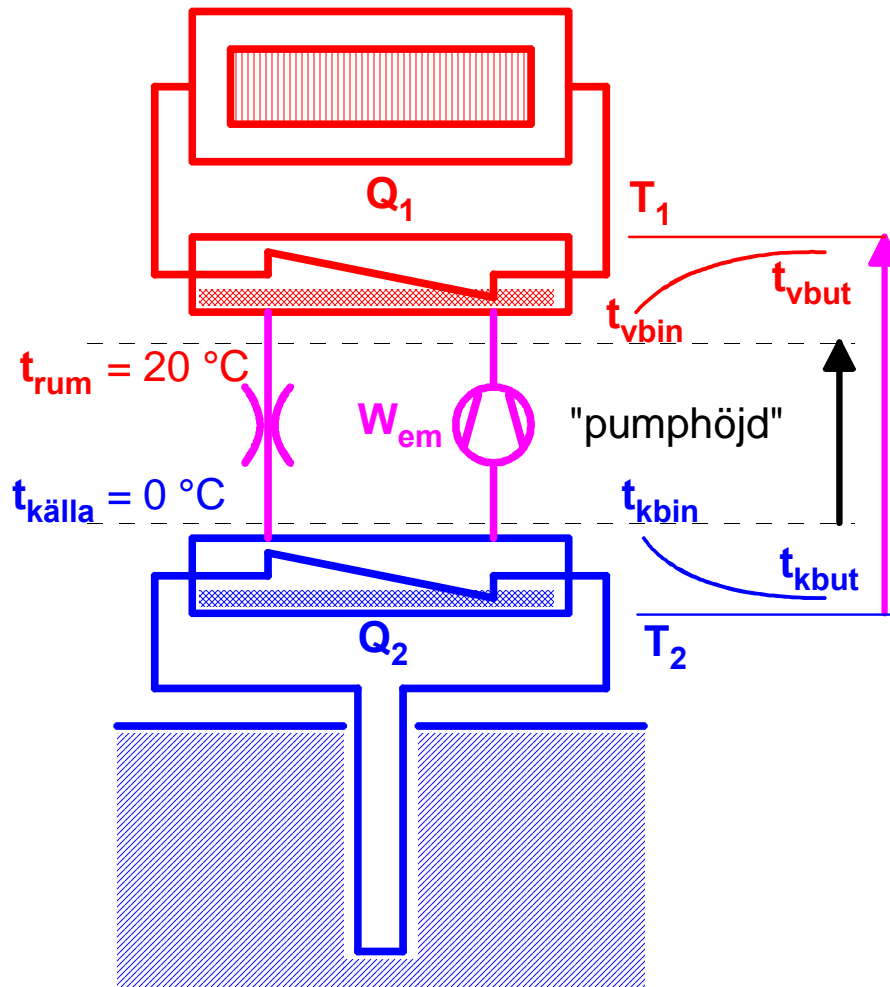
- **Värmepumpsprocess**

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



## Teori 2

## EXEMPEL



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

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

- ⇒  $COP_{1C} = 14,7$

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

- ⇒  $COP_{1C} = 5,4$

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

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

Komponenter

- ⇒  $\eta_{C1} = 0,5$  till  $0,8$

- ⇒  $COP_{1vp} = 2,7$  till  $4,3$

## Teori 3

**BEHOV AV KÖPT ENERGI****- TEMPERATURNIVÅ OCH HJÄLPEFFEKTER**

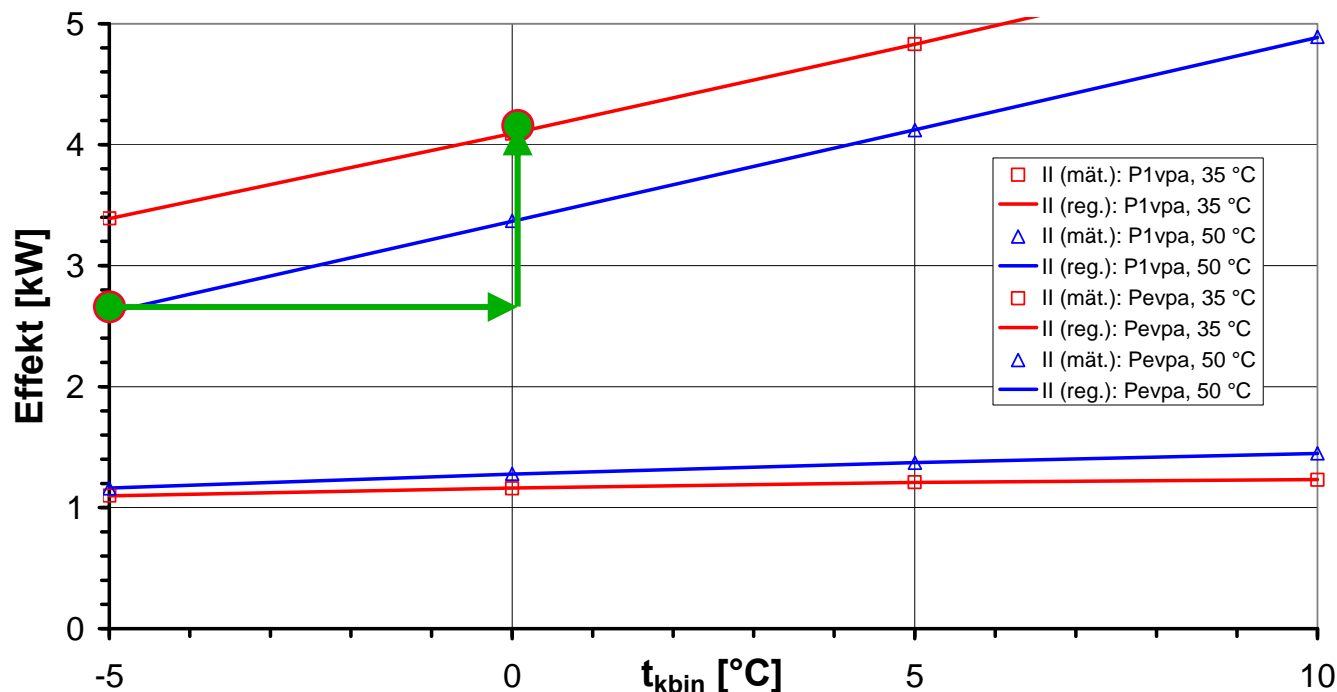
- **Köpt energi =  $Q/COP$ ; Inverkan på  $COP$**
- **Temperaturnivåer och drivenergi:**

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

- **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 4

# HUR STOR ÄR EN VÄRMEPUMP?



- Dimensionera upp värmekälla och värmesänka → större vp
- Ex. ovan → ökning 2,5 kW (56 %) → ökat investeringsutrymme 37 500 SEK med  $I_{vpa} = 15\ 000\ \text{SEK/kW}$   
(t.ex. 60 → 110 m borrhål + 5 extra radiatorer)



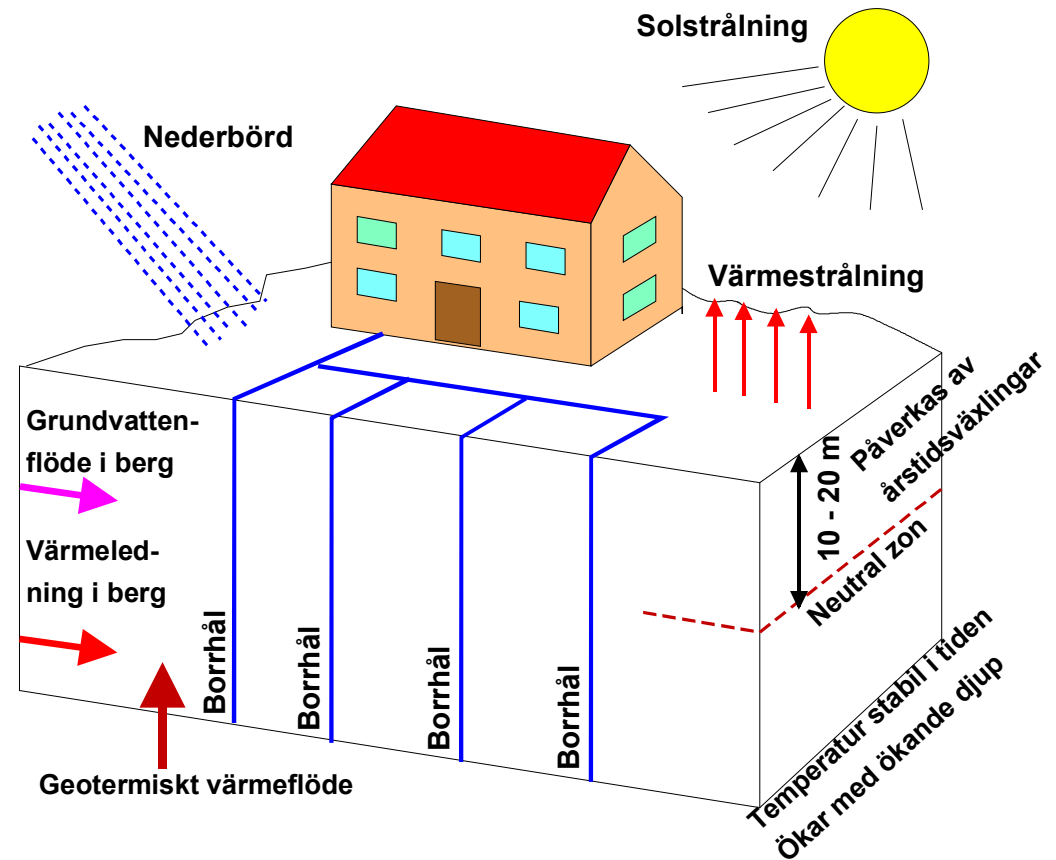
## Praktik 1

# MARKVÄRME MED VÄRMEPUMP

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



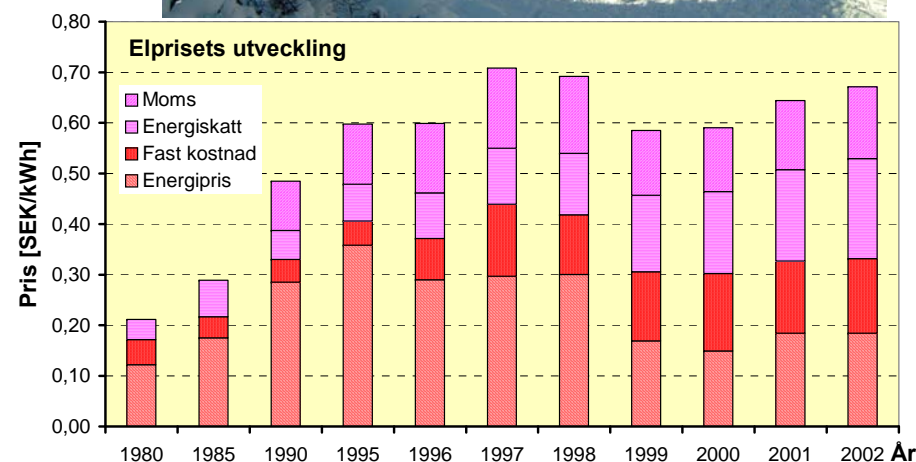
- **Värmekälla**
- **Värmesänka**
- **Värmelager**



## Praktik I-2

## SMÅHUS: FÖRUTSÄTTNINGAR

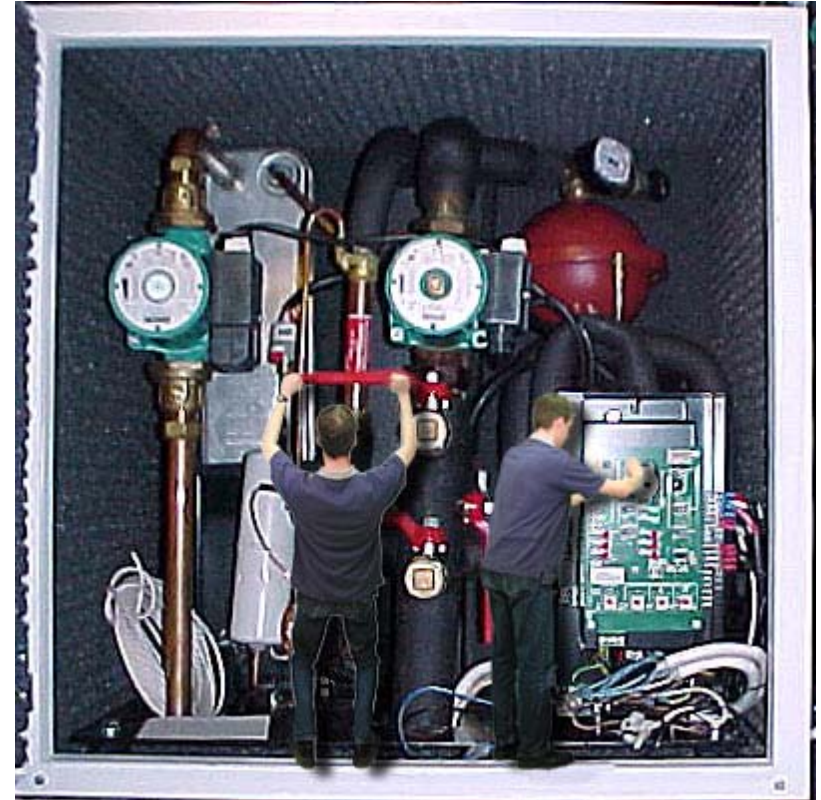
- **Borås** (Nutek/STEM referens)
  - Klimatzon 4,  $t_{\text{år}} = +5,8 \text{ } ^\circ\text{C}$
- **Byggnad:** 1977, fristående
  - BRA = 140 + 10 m<sup>2</sup>
  - torpargrund
  - isolering 12 cm ( $U \approx 0,35 \text{ W/m}^2\text{/K}$ ),
  - fönster 2-glas ( $U \approx 2 \text{ W/m}^2\text{/K}$ )
- **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 I-3

## VINNARKONCEPT

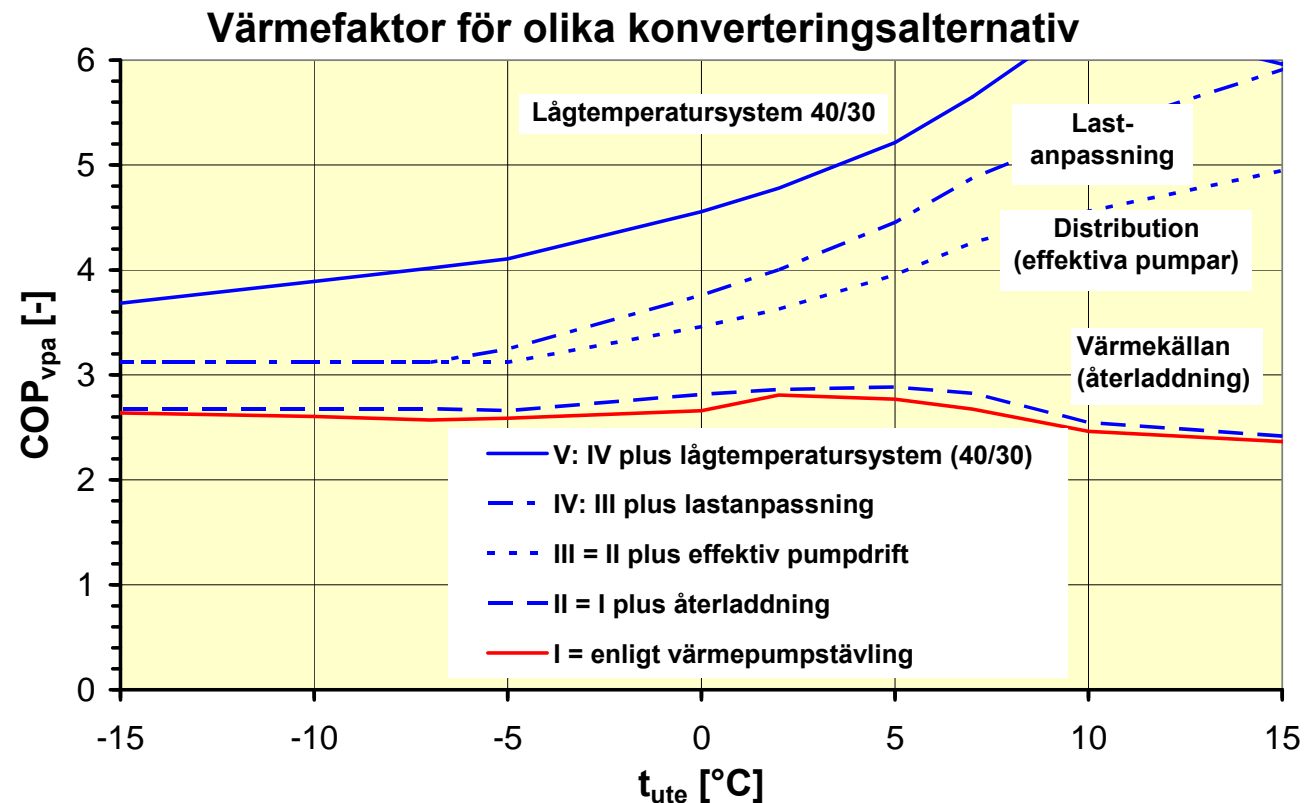
- **Fast pris 39 000 SEK**
  - värmepump ca. 4 kW
  - borrhål 60 m
  - fläktkonvektor ca. 4 kW
- **Tillägg 3 000 SEK**
  - större fläktkonvektor
  - en radiator
- **Förväntad besparing**
  - 9000 kWh/år (uppvärmning)
- **Utvärdering + förberedelse av framtida modifieringar**



## Praktik I-4

# BERÄKNAD SPF FÖR VINNARKONCEPTET + TÄNKBARA FÖRBÄTTRINGAR

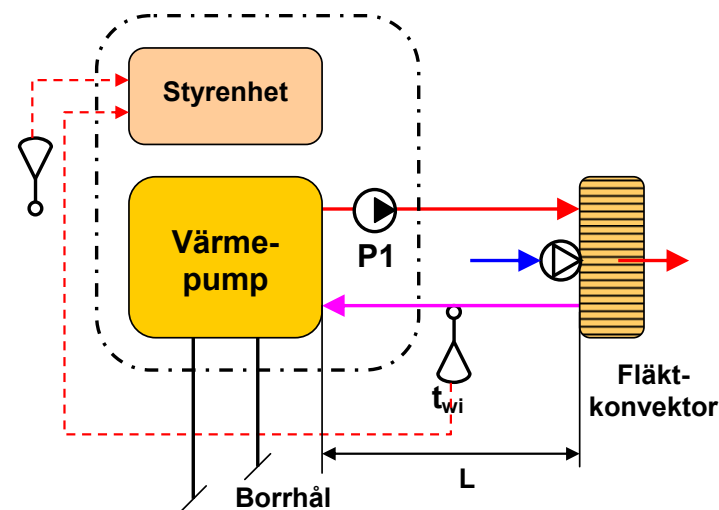
1. Tävlingsförslag
2. Återladdning
3. Pumpdrift
4. Lastanpassning (ackumulator)
5. Lågtemperatursystem



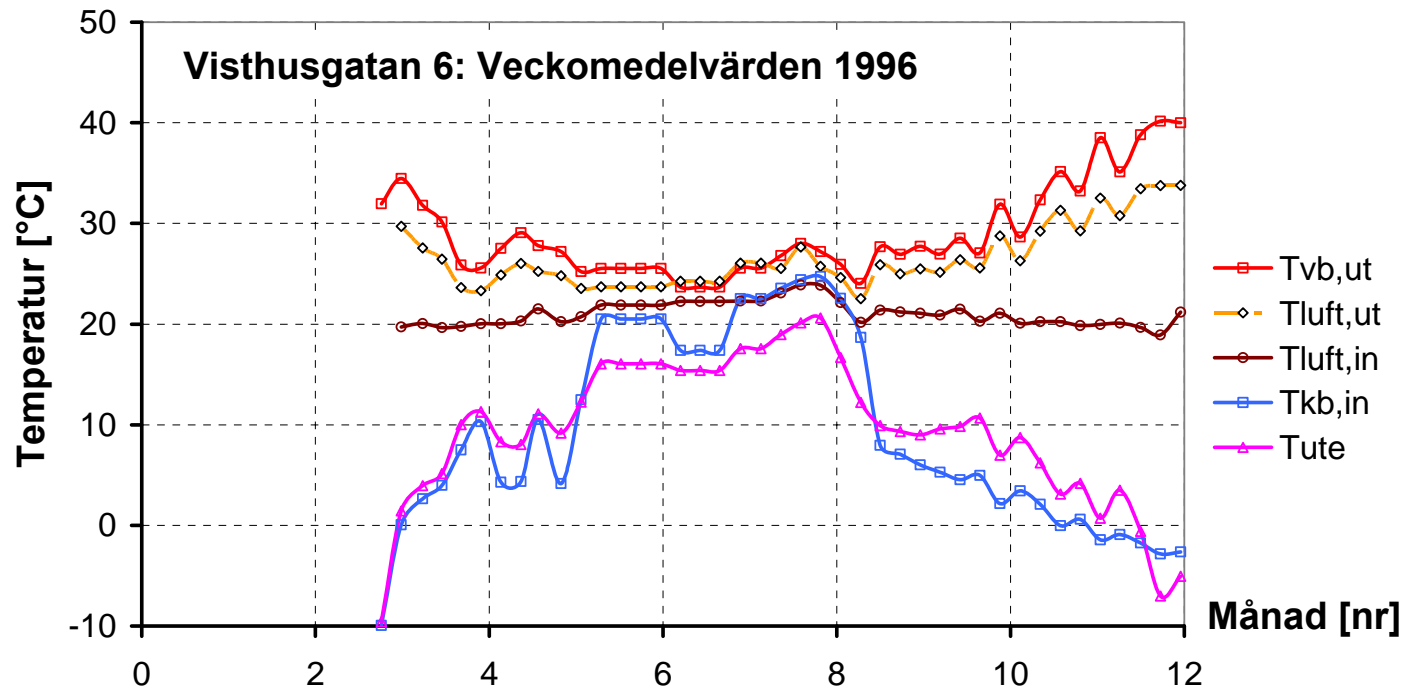
## Praktik I-5

## OMBYGGNAD 1: "VINNARKONCEPTET"

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



# OMBYGGNAD 1: RESULTAT



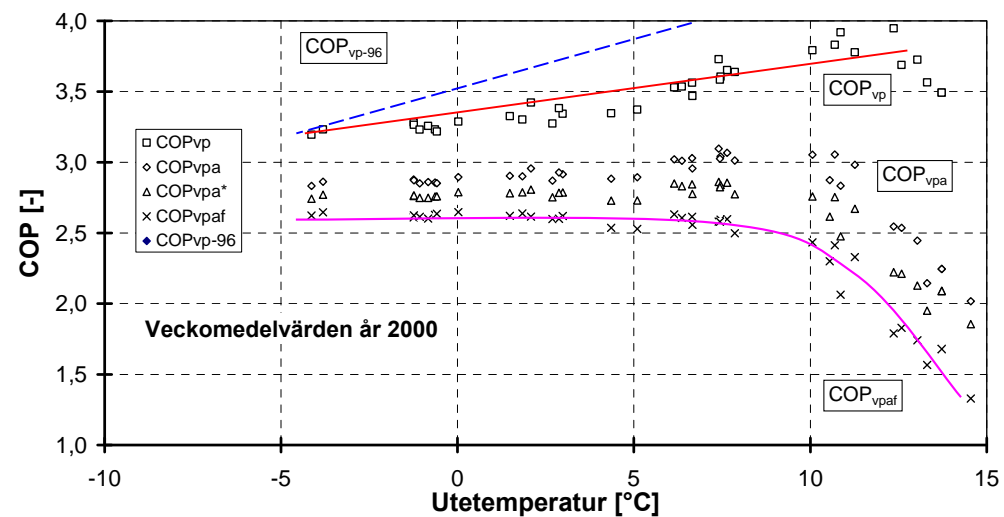
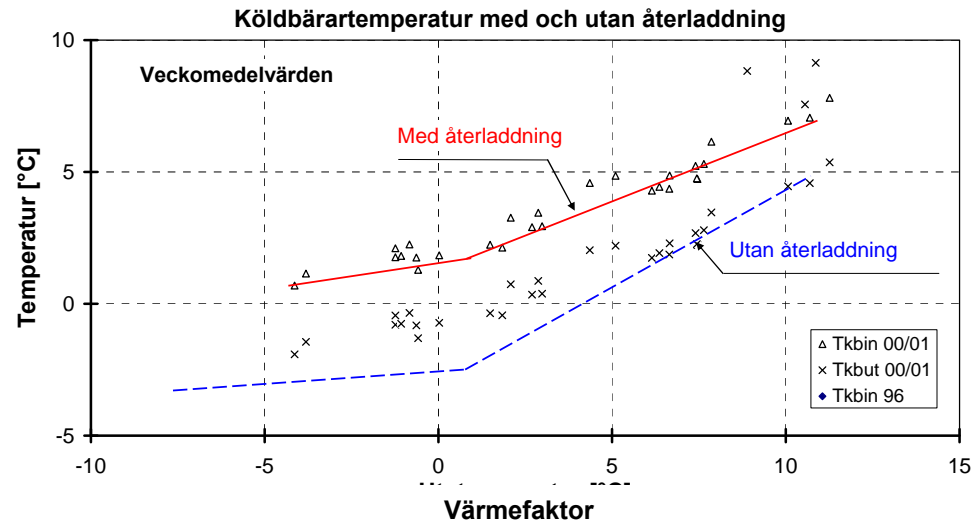
- **Besparing ca. 9000 kWh på uppvärmning**
- **Nuvärde 100 000 SEK (1 SEK/kWh, 15 år)**
- **Investering 42 000 SEK**



Praktik I-7

# OMBYGGNAD 2: RESULTAT

- Köldbärartemperaturen ökar
- Men värmefaktorn minskar!
- Varför?

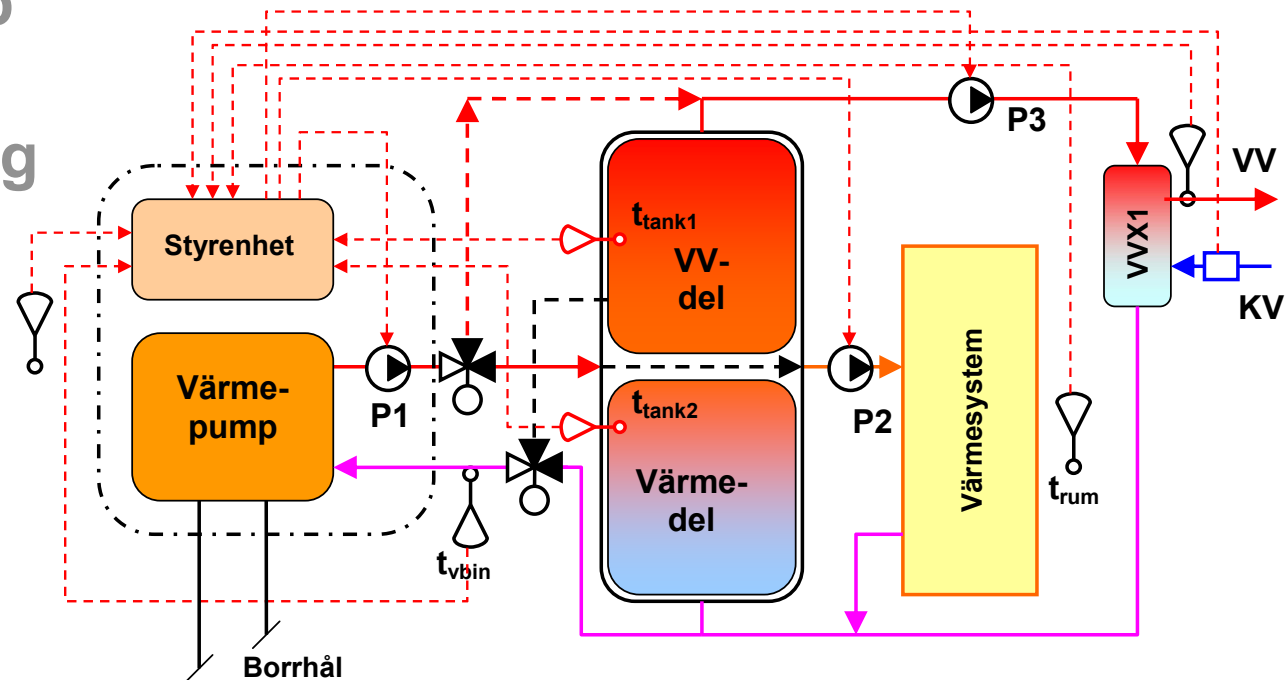


## Praktik I-8

# 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





## SAMMANFATTNING EXEMPEL 1

- **Typiskt 70-tals direktelvärt småhus med lägre specifik energianvändning än moderna ”passivhus”**
- **Besparing: 25 MWh/år → 9 MWh /år**
  - 4,5 MWh/år för värme och varmvatten
  - 133 kWh/m<sup>2</sup>/år → 30 kWh/m<sup>2</sup>/år
  - 167 kWh/m<sup>2</sup>/år → 60 kWh/m<sup>2</sup>/år
- **Bättre styrning av inomhusklimatet än i ”passivhus”**
- **Ekonomi: Rak pay-off 5 år, nuvärde 178 000 SEK**
  - Investering ca. 80 000 SEK, besparing ca. 16 000 SEK/år



## Praktik II-1

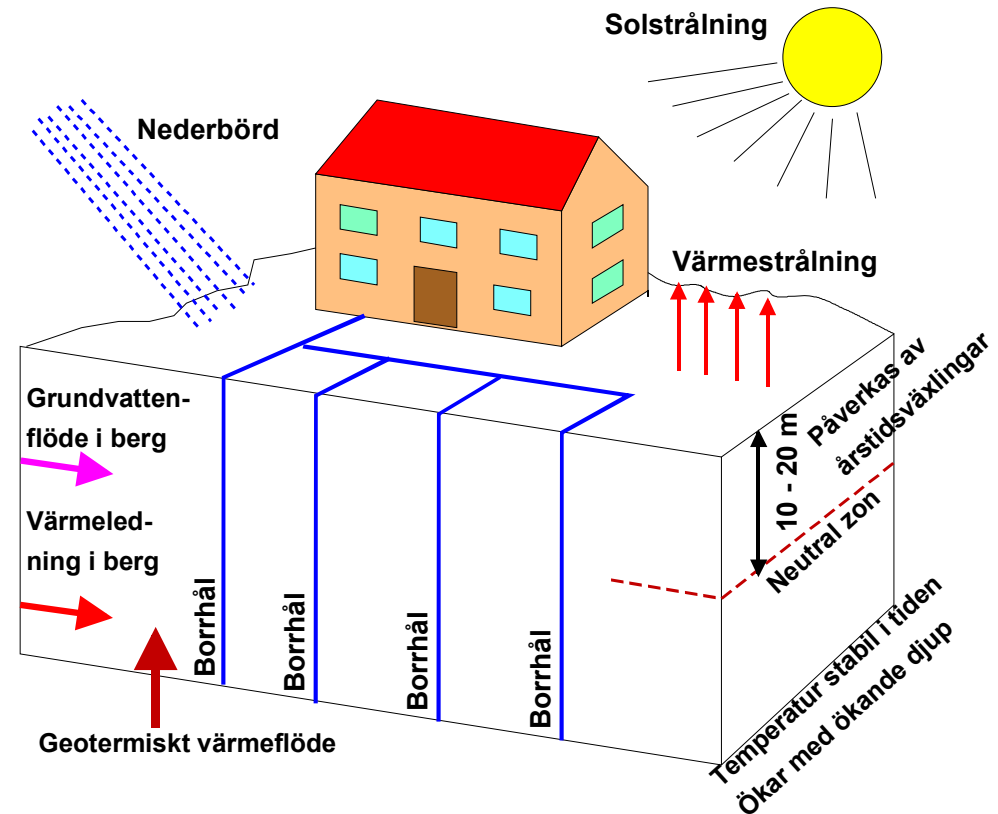
## KONTORSBYGGNAD I LUND

## Byggnadsbeskrivning

- Byggnad: 5 300 m<sup>2</sup>
- Ventilation: VAV/CAV med FTX
- Värme: Radiatorer
- Kyla: Kyld tilluft

## Besparing (köpt energi)

- Värmeåtervinning
- VAV/DCV
- Värme ur mark
- Frikyla: uteluft
- Frikyla: låg marktemperatur med säsongslager

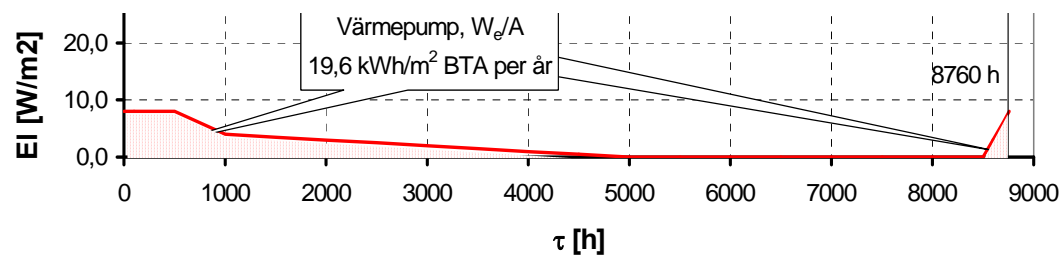
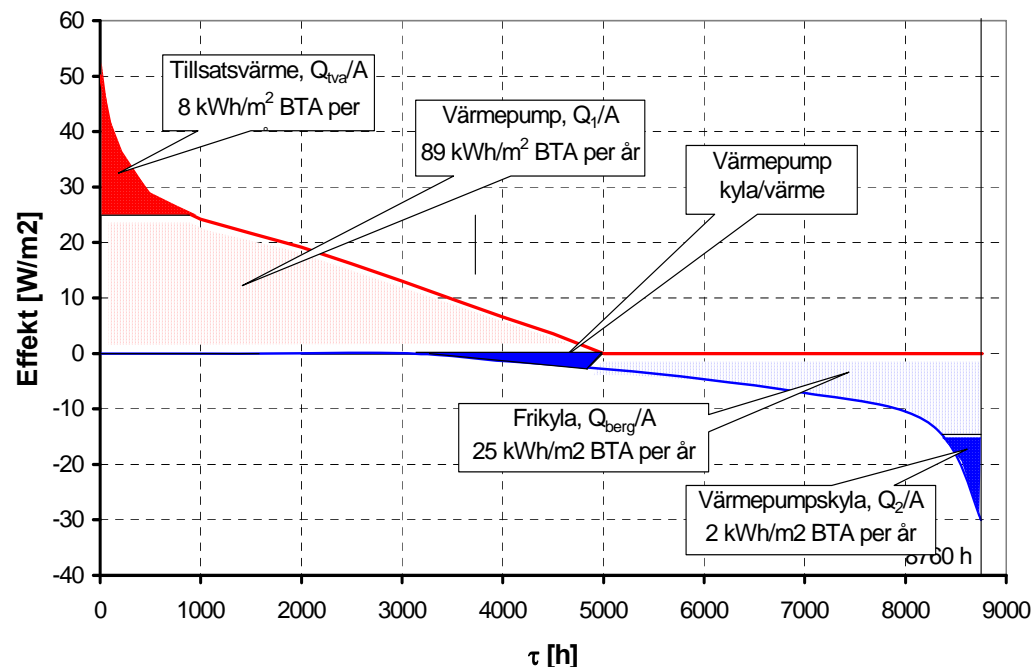


## Praktik II-2

## KONTORSHUS: TILLÄMPNING MED FRIKYLA

- Rätt förhållande mellan värme- och kylbehov ger stor andel frikyla
- Rektangulära borrhålssystem
- Astronomihuset i Lund (köpt kyla + värme):  
< 28 kWh/m<sup>2</sup>/år;  
< 10 W/m<sup>2</sup>!  
1/10 av normalt!
- Värmepump som spets för kyla/värme?

Varaktighetsdiagram för kyl- och värmeeffekt



## Praktik II-3

## RESULTAT

Årlig energianvändning	MWh	kWh per m <sup>2</sup>
<b>Värmebehov</b>	<b>515</b>	<b>97</b>
<b>Värmetillförsel</b>		
Värmepump	475	89
Tillsats	40	8
<b>Kylbehov</b>	<b>155</b>	<b>29</b>
<b>Värmebortförsl</b>		
Frikyla	130	25
Värmepump (v+k)	15	3
Värmepump (k)	10	2
<b>EI</b>		
Kompressor	104	19.6
Pumpar	7	1.3

- Värme**

$$SPF_{vp} = 4,6$$

$$SPF_{vpa} = 4,3$$

$$SPF_{va} = 3,4$$

- Kyla**

$$SPF_{ka} = 17$$

- Värme + kyla**

$$SPF_{v+k,a} = 4,4$$

## Praktik II-4

**SAMMANFATTNING EXEMPEL 2**

- **Investeringskostnad 10-15 000 SEK/kW<sub>värme</sub>**
- **Värme + kyla ger stor besparing och hög utnyttjandetid**
- **Mycket stor minskning av köpt energi**
- **Besparing av köpt energi i förhållande till fjärrvärme + fjärrkyla ca. 270 000 SEK/år**
- **Investeringsutrymme > 20 000 SEK/kW<sub>värme</sub>**
- **GRATISENERGI FINNS INTE!**  
(Kapitalkostnad och drivenergi till hjälpapparater)

