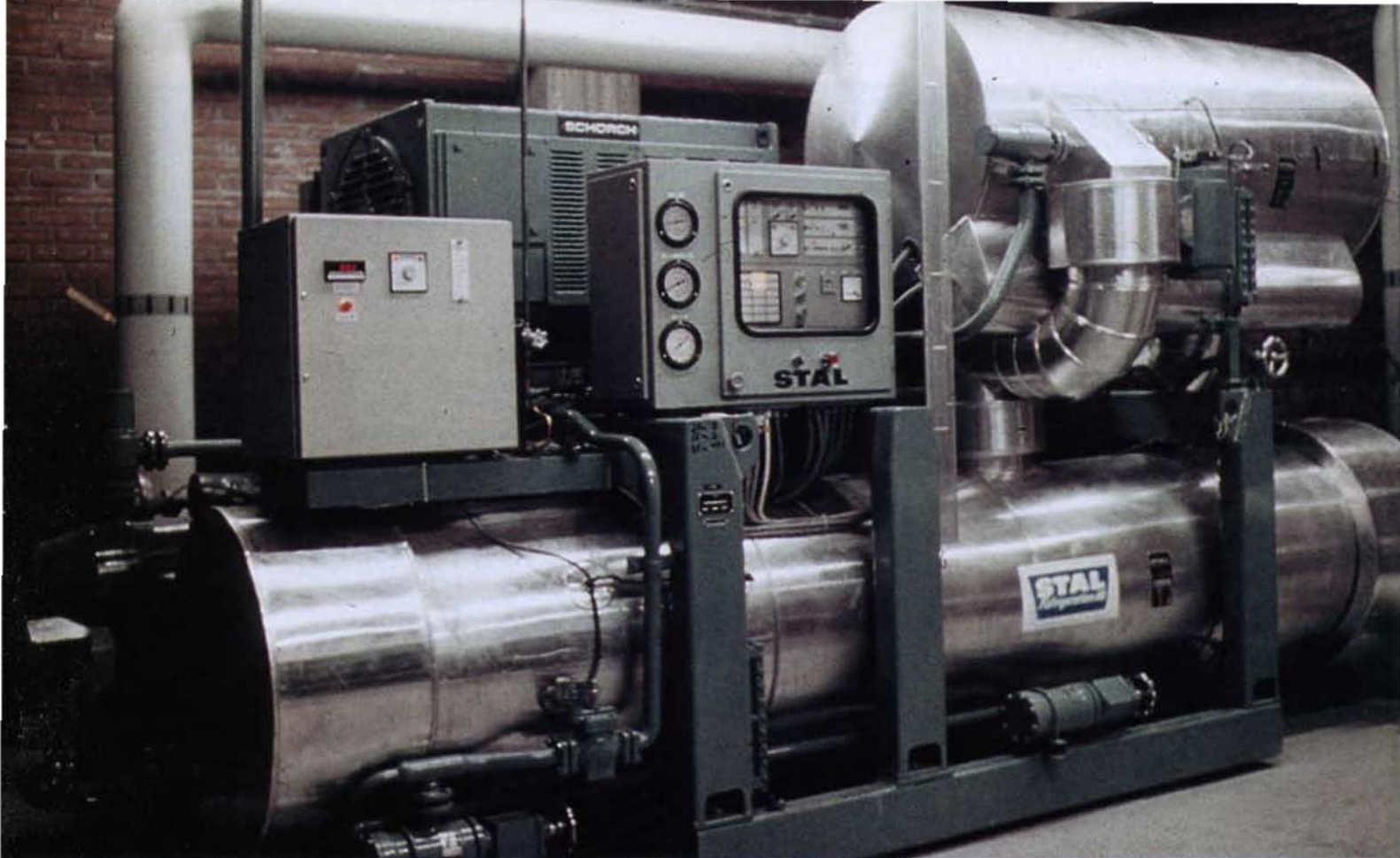




Termoekonomisk optimering av en värmepumpprocess

av Göran Wall, CTH, Göteborg

Termoekonomi är en effektiv metod för att effektivisera tekniska system. Inom ramen för vad som är tekniskt möjligt finner metoden den mest ekonomiska lösningen. Den kan samtidigt ge information om hur forskningen bör inriktas. En enkel värmepumpprocess har valts som exempel för att beskriva metoden. Resultatet visar bl a att drivkällan bör göras mer effektiv, vilket spar både pengar och exergi. Studien är finansierad av STU.

Termoekonomi

Myron Tribus och Yehia M. El-Sayed, vid The Center for Advanced Engineering Study, MIT, har under ett flertal år utvecklat en metod de kallar "Thermoeconomics", vilken optimerar kostnaden vid rådande termodynamiska villkor. Metoden har med stor framgång tillämpats på industriella processer inom processindustrin. Syftet med termoekonomi är att förbättra analyser av system genom att introducera möjligheter att samtidigt föreslå förbättringar av det analyserade systemet. Myron Tribus motiverar bl a metoden på följande sätt:

"It is much more important to be able to survey the set of possible systems ap-

proximately than to examine the wrong system exactly. It is better to be approximately right than precisely wrong."

Utgångspunkten är att betrakta ett system omgivet av dels en fysisk, dels en ekonomisk omgivning, se figur 1. Den fysiska omgivningen beskrivs med hjälp av tryck, temperatur och kemiska potentialer för aktuella ämnen. Den ekonomiska omgivningen beskrivs av priser för aktuella varor och räntor för lån.

De båda omgivningarna binds samman genom kostnadsrelationer som beskriver hur kostnaderna beror av fysiska storheter.

Kort kan metoden beskrivas på följande sätt:

- 1 Upprätta en koncis beskrivning av den studerade processen.
- 2 Definiera systemet, systemgränserna, olika systemzoner, komponenter etc (detaljerat flödesschema alternativt skiss av processen).
- 3 Definiera den fysiska omgivningen, alternativt den lokala fysiska omgivningen.
- 4 Ange källor för termodynamiska data.
- 5 Upprätta en termodynamisk beräkningsalgoritm med klart identifierbara in- och utflöden. Denna baseras på bl a material- och energibalanser för systemet. Denna skall utgöra en fullständig (under angivna förutsättningar) termodynamisk beskrivning av systemet.
- 6 Ange kostnadsfunktioner för de aktuella zonerna eller komponenterna samt ange systemets målfunktion (optimeringsvillkor).
- 7 Beräkna exergiflödena i processen och ange entropikällorna dvs var exergin går förlorad i systemet. Relatera sedan dessa förluster till in- och utflödet av exergi.

- 8 Beräkna värdeflödena (baserade på internpriser) i processen.
- 9 Ange eventuella förslag, baserade på punkt 7 och 8, till förbättringar av systemets konfiguration och justera berörda relationer (punkt 5).
- 10 Genomför en optimering av processen.
- 11 Genomför en känslighetsanalys.
- 12 Föreslå förbättringar och forsknings- och utvecklingsinsatser.

Denna arbetsmetod är i de inledande delarna naturligtvis självklar och allmänt vedertagen. Den viktigaste förbättringen är introduktionen av omgivningen och dess effekter på processen. Exergibegreppet, som då kan tillämpas, ger då bl a möjlighet att beräkna de tekniska förlusterna i systemet, punkt 7.

En ingenjör som konstruerar ett system förväntas eftersträva högsta möjliga tekniska effektivitet till lägsta kostnad under rådande tekniska, ekonomiska och juridiska villkor (ibland även med hänsyn till etiska, ekologiska och sociala konsekvenser.) Vid detta arbete skall iaktas möjligheter till:

- Olika drifttillstånd (olika tryck, flöden, etc)
- Olika konfigurationer (tillförsel alternativt borttagande av komponenter, omflyttningar, etc)
- Olika syften (biprodukter, spillvärme för avsalu, etc)
- Olika omgivningar (ändring av omgivningsvillkor, energipris, miljökrav, etc)

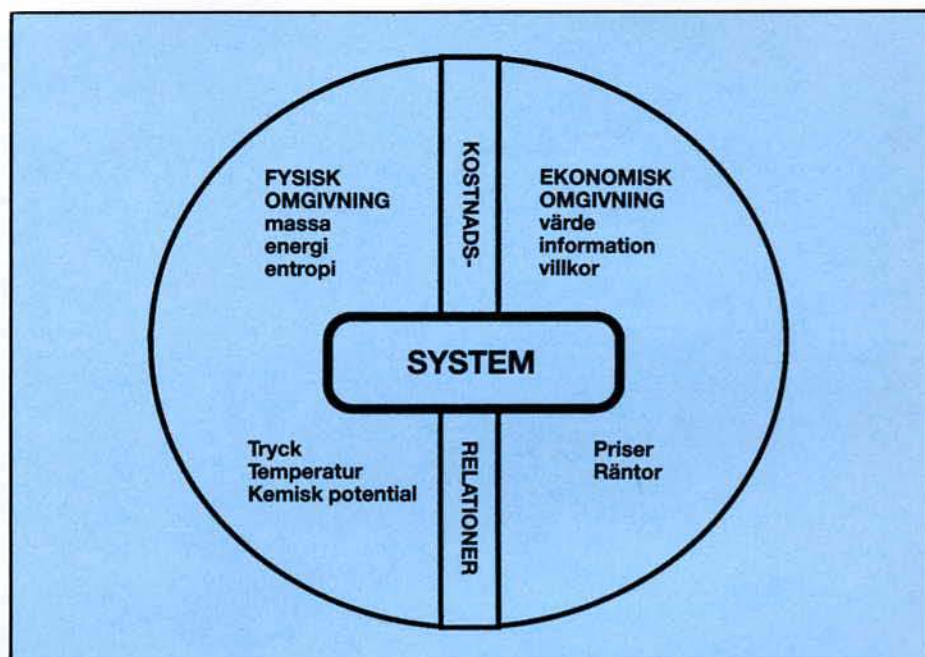
Termoekonomi är en analysmetod som väsentligt underlättar detta arbete.

Värmepumpen

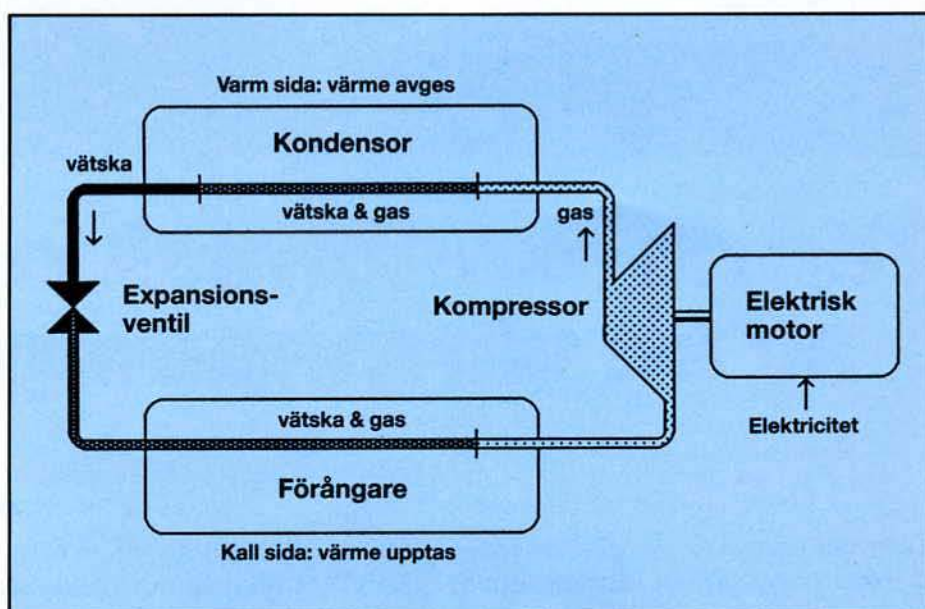
Att använda en värmepump för att producera värme är tekniskt vida överlägset de traditionella sätten med eldning eller elektrisk kortslutning. Värmepumpsystem har därför blivit allt vanligare vid uppvärmning då energipriset ökat. I figur 2 återfinns det studerade systemet.

Det består av kompressor, kondensor, expansionsventil, förångare och en elektrisk motor som drivkälla. Arbetsmediet är R12 och det värmebärande mediet till omgivningen i kondensorn och förångaren är vatten. Omgivningstemperaturen och omgivningstrycket antas vara 0 °C respektive 1 atm. Efter som inga kemiska reaktioner förekommer i processen saknar andra uppgifter om omgivningen betydelse.

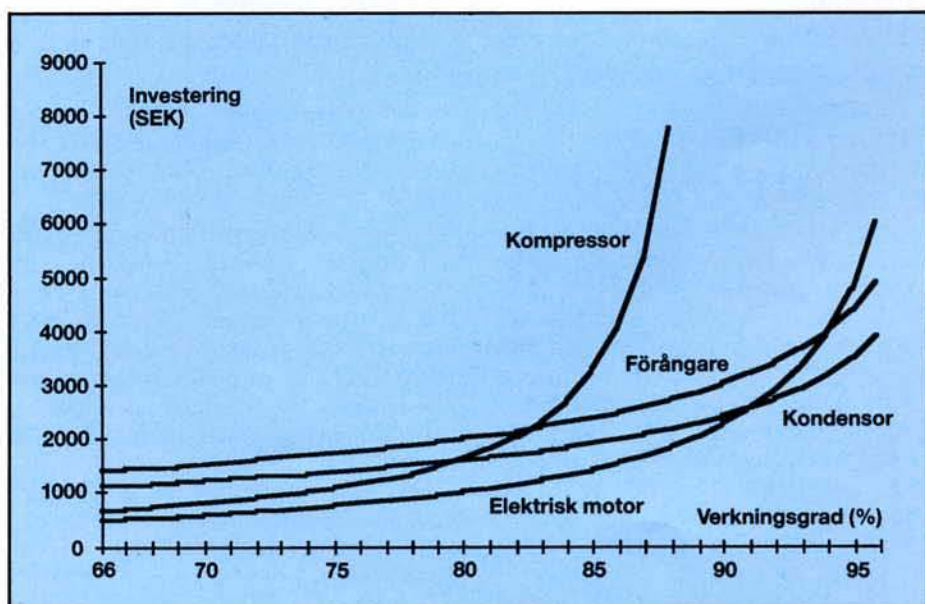
Till fria beslutsvariabler, vilka skall bestämmas vid optimalitet, har valts verkningsgraderna för kompressorn, kondensorn, förångaren och den elektriska motorn. Systemet är fullständigt bestämt så när som på dessa fria beslutsvariabler. Varje värde på dessa låser systemet till ett givet drifttillstånd



Figur 1. Systemet i två omgivningar



Figur 2. Det studerade värmepumpsystemet med sina komponenter



Figur 3. Investeringar som funktion av verkningsgraderna

enligt tillståndsekvationerna för systemet. Exergiflödena och exergiförlusterna i varje komponent beräknas också.

Målet är att minimera den totala kostnaden för systemet vid en given värmeproduktion. Denna kostnad utgörs av dels en kostnad för drift (elektricitet), dels kostnader för investeringar för varje komponent. Kostnaden för driften ökar om investeringarna minskar och vice versa. Intäkterna för den levererade produkten (värme) och givna lönsamhetsvillkor ger en gräns för vad systemet maximalt får kosta och anger därmed vilka system som är lönsamma. Problemet är sedan att bland de lönsamma systemen hitta den fördelning dels mellan kostnader för drift och investeringar dels mellan de olika komponenterna i systemet som ger lägsta kostnad.

I figur 3 återfinns de antagna investeringarna som funktion av verkningsgraderna.

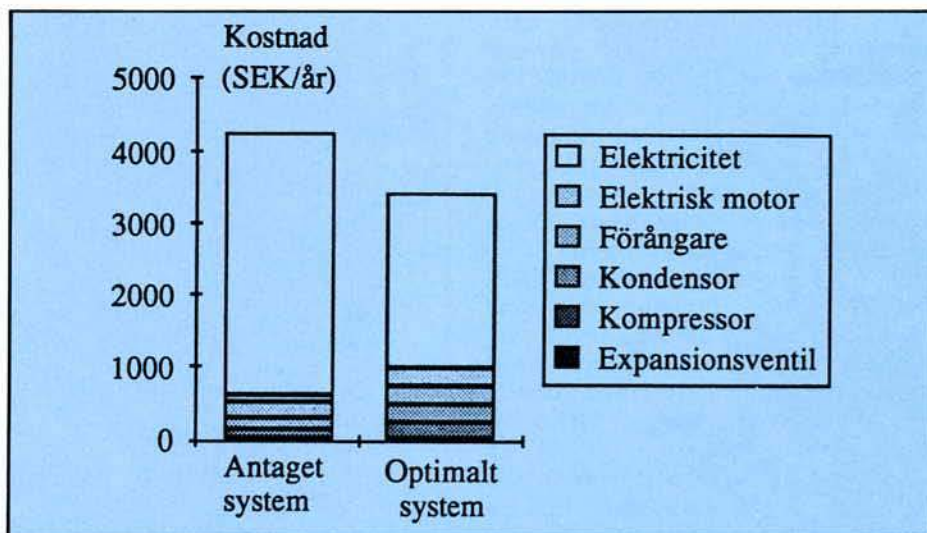
Investeringarna avskrivs enligt annuitetsprincipen, vilket ger en kostnad per år för varje komponent. Den totala kostnaden per år utgör alltså summan av dessa och kostnaden för årlig förbrukad elektricitet.

Värdena för de dimensionerande parametrarna har i det här exemplet antagits till bl a: producerad värmeeffekt 6500 W (energi), drifttid 5000 timmar per år, elpris 0.25 SEK/kWh, temperatur på producerad värme 60 °C och värmekällans temperatur 10 °C.

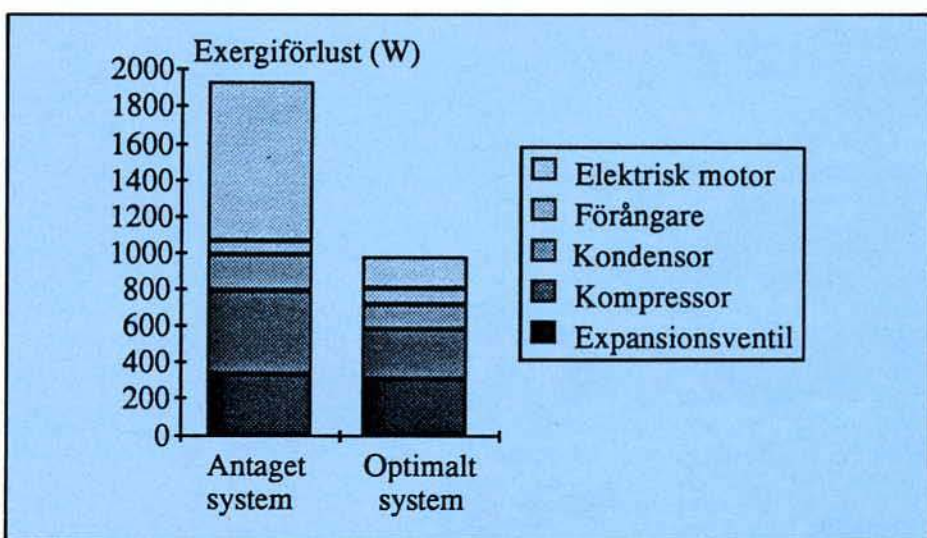
Låt oss nu anta ett godtyckligt fungerande system med värdena 70 % för de fyra verkningsgraderna. Den beräknade totala kostnaden blir då 4221 SEK/år varav 3617 SEK/år för elektricitet. Optimeringen ger nu i stället följande verkningsgrader: kompressorn 0.80, kondensorn 0.83, förångaren 0.73 och elmotorn 0.91, och den totala kostnaden blir nu i stället 3388 SEK/år varav 2416 SEK/år till elektricitet. Genom att öka investeringskostnaden från 604 SEK/år till 972 SEK/år gör vi alltså en total besparing av 833 SEK/år jämfört med det antagna systemet, se figur 4. Samtidigt sker ungefär en halvering av exergiförlusterna från 1933 W till 979 W dvs med 954 W. Av figur 5 framgår också att det är förbättringar av elmotorn som svarar för den största enskilda exergibesparingen. Vi spar alltså både pengar och exergi vid optimeringen.

Expansionsventilen svarar i det optimala systemet för den största enskilda exergiförlusten, vilket motiverar forskning och utveckling för att förbättra denna. Erik Granryd har i ett tidigare nummer av Energiteknik (nr 2, 1985) rapporterat om ett STU-projekt på detta område.

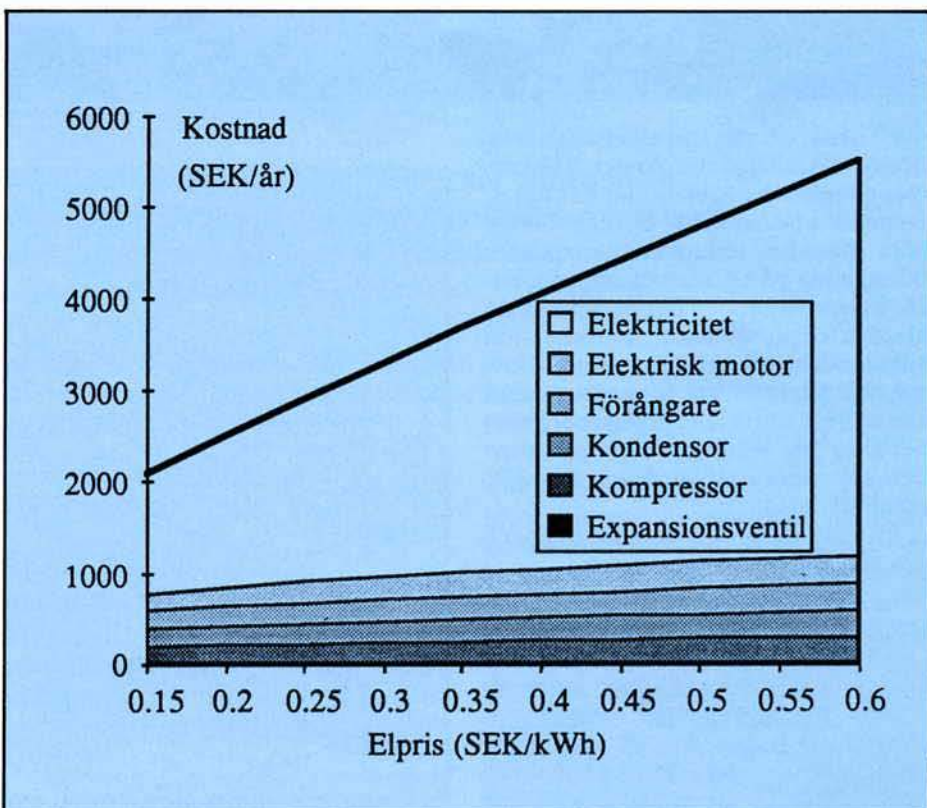
Resultaten pekar alltså bl a mot att den elektriska motorn bör göras betyd-



Figur 4. Kostnaderna för antaget och motsvarande optimalt system



Figur 5. Exergiförlusten för antaget och motsvarande optimalt system



Figur 6. Kostnader som funktion av elpris för optimerat system

ligt effektivare. Elmotorn har ju antagits kosta ca tre gånger mer om verkningsgraden kan höjas från 70 till 91 % (figur 3), vilket kan anses som fullt realistiskt. (Den får t o m kosta nio gånger mer och ändå vara lönsam jämfört med det antagna systemet.)

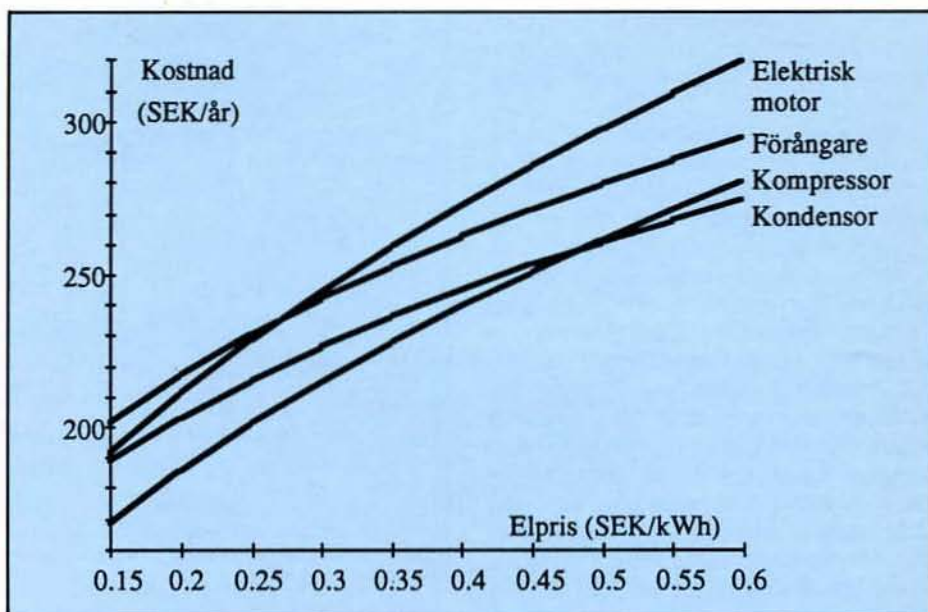
I figur 6 återfinns kostnaderna för ett optimerat system som funktion av elpriset då detta varierar mellan 0.15 och 0.6 SEK/kWh. Totalkostnaden ökar från 2073 vid 0.15 till 5522 SEK/år vid 0.6 SEK/kWh. Detta kan jämföras med att om det optimala systemet vid 0.15 SEK/kWh använts vid 0.6 SEK/kWh skulle totalkostnaden bli 5947 dvs en fördyring med 425 SEK/år. (För det antagna systemet skulle totalkostnaden bli 9284 dvs en fördyring med 3762 SEK/år.) I figur 7 framgår tydligare hur komponent-kostnaderna beror av elpriset. För alla komponenter gäller att de skall göras effektivare och därmed blir dyrare då elpriset ökar.

Valet av optimerat system påverkas också av variationen av temperaturen på kondensorn dvs temperaturen på den producerade värmen (figur 8 och 9). Den totala kostnaden fördubblas från 2336 vid 40 °C till 4680 vid 75 °C. Den producerade energieffekten är den samma dvs 6500 W, men exergieffekten ändras från 434 till 713 W vilket alltså bättre förklarar fördyringen. Då temperaturen ökar från 40 till 75 °C ökar effektivitetskraven på det totala systemet men ej nödvändigtvis på varje enskild komponent. Detta framgår tydligt i figur 9. Inom ramen för en total ökning av komponentkostnaden är det alltså mer ekonomiskt att välja en allt billigare förångare. Orsaken är helt enkelt att en investering betalar sig bättre i andra delar av systemet. Metoden anger ju var en investering är mest lönsam.

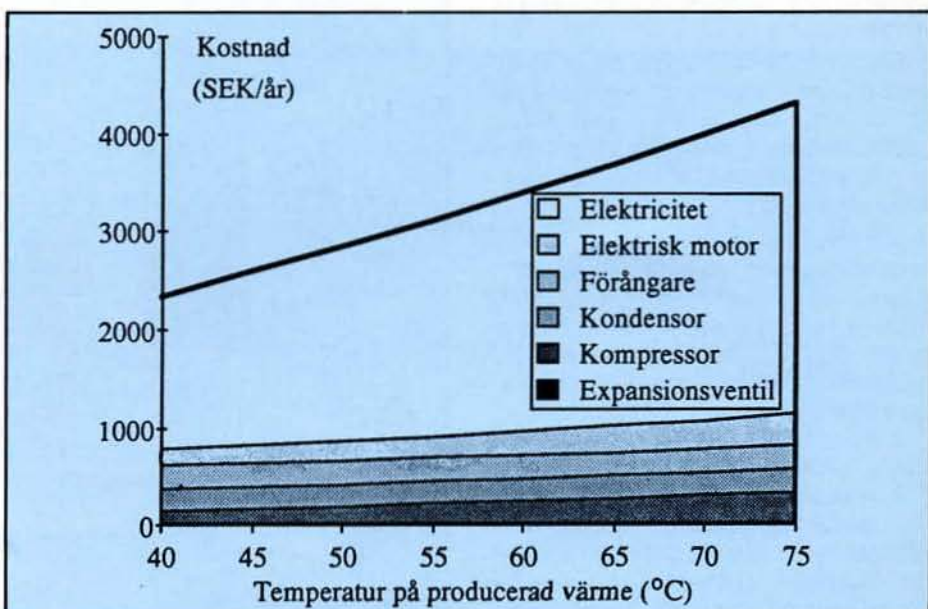
På liknande sätt kan alla övriga relationer åskådliggöras. Andra köldmedier eller kostnadsrelationer kan antas. Denna studie har syftat till att åskådliggöra metoden termoekonomi genom tillämpning på en värmepumpprocess. De exakta resultaten har därför fått stå åt sidan för presentation och diskussion av metodens tillämplighet. Denna metod för att förbättra tekniska system kan aldrig ersätta lång praktisk erfarenhet eller hög teknisk kompetens, men den kan utgöra ett värdefullt komplement till dessa.

En fullständig rapport finns på engelska med datorprogram (Pascal).

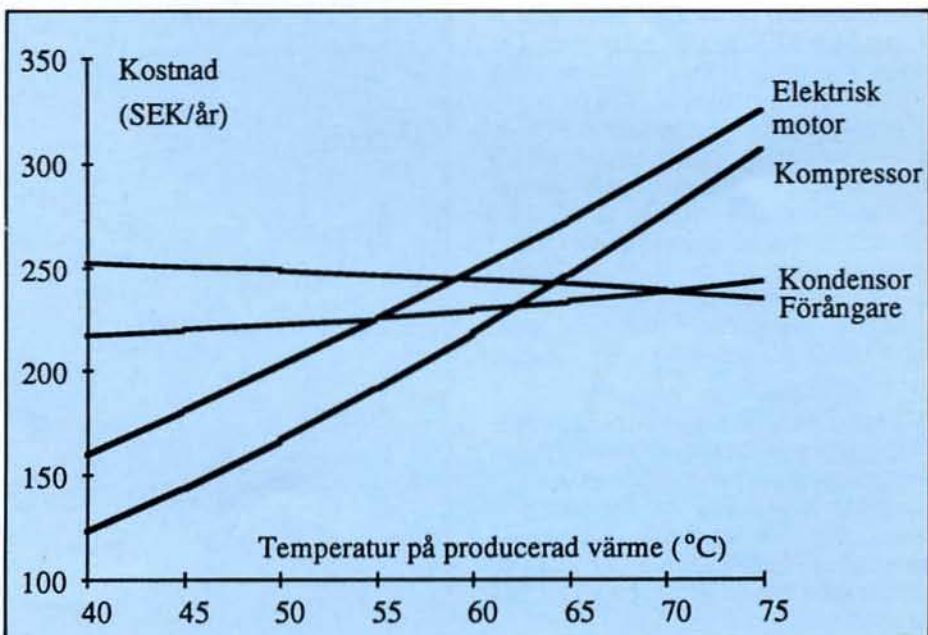
STU dnr 85-4356
Proj-led Göran Wall
Ort Göteborg
Tfn 031-810 200



Figur 7. Komponentkostnader som funktion av elpris för optimerat system



Figur 8. Kostnader som funktion av temperatur på producerad värme för optimerat system



Figur 9. Komponentkostnader som funktion av temperatur på producerad värme för optimerat system.