

**EXERGI**  
**OCH**  
**HELHETSYN**  
**- EN TILLÄMPNING PÅ**  
**GÖTEBORG**

Göran Wall

1992

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sida
Förord	4
NOMENKLATUR	5
SAMMANFATTNING	7
1 INTRODUKTION	18
2 EXERGI	23
2.1 Energi, materia och kvalitet	23
2.2 Exergibegreppet	26
2.3 Exempel på exergibärare	30
2.4 Global och lokal standardomgivning	33
2.5 Exergi och information	34
3 HELHETSSYN	39
3.1 Exergi — ett naturvetenskapligt begrepp	39
3.2 Exergi hos naturresurser	44
3.3 Världshandel och exergiflöden	46
3.4 Skillnad mellan exergi- och exergibetraktelser	46
3.5 Exergi och andra resursmätt	53
3.6 Flöden, lager och fonder	56
3.7 Effektivitetsbegrepp	58
3.8 Exergianalys	62
3.9 Exergiekonomi	63
3.10 Miljösyn	66
3.11 Människosyn	71
3.12 Exergiomsättningen i det svenska samhället	73
3.13 Resurskedjor	81
4 GÖTEBORG	86
4.1 Exergiinflöden	86
4.2 Uppvärmningen	87
4.3 Industrin	94
4.3.1 Slakthusets industriområde	94
4.3.2 Arlas mejeri i Kallebäck	98

4.4	Bilen som transportmedel	101
4.5	Huset	103
5	EPILOG	105
5.1	Exergibegreppet i samhällsplaneringen	105
5.2	Huset — en viktig komponent i ett resursnått och miljövänligt samhälle	105
5.3	Ett rationellt resurssystem baserat på en integration av produktion och konsumtion	106
5.4	Hinder mot ett resursnått och miljövänligt samhälle	109
	Appendix A: Härledning av exergibegreppet	113
	Appendix B: Exerginnehållet i material	118
	Appendix C: Effektivitetsbegrepp vid exergiomvandlingar	120
	Appendix D: Exergi och information	121
	Appendix E: Några idealiserade termodynamiska system	123
	Appendix F: Människosynens betydelse för samhällutvecklingen	128
	Appendix G: Naturliga fysiska resurser i Göteborg	133
	Appendix H: Exergi för värme och kyla i Göteborg	138
	Referenser	149

## Förord

Nyligen frågade jag ett tidigare statsråd med ansvar för energi- och miljöfrågorna om hon visste vad exergi betydde — Nej, svarade hon. Jag frågade henne också varför den demokratiska processen stannat vid 349 ombud i Stockholm? Hon svarade att man utreder om det skulle gå att “delegera ner ansvaret till fler människor”. Jag som trodde att det var tvärt om — att folket bestämmer och att ansvaret delegeras ner till politikerna, dvs att politikerna är underställda folket?

Syftet med denna skrift är att ge en introduktion till exergibegreppet och dess användning och vikten av en helhetssyn på samhällets resursomsättning. Detta gör att mina formuleringar ibland är medvetet tillspetsade och provocerande. En helhetssyn på vår resursomsättning är inte alltid så tilltalande som man kan tro. Skriften representerar min egen mycket kritiska syn på den pågående utvecklingen baserad på egna erfarenheter och insikter.

Denna skriften vänder sig i första hand till personer med grundläggande kunskaper i naturvetenskap, men även andra bör utan större svårigheter kunna ta del av innehållet genom att hoppa över formlerna i texten.

Då mycket finns att önska vad avser materialets pedagogiska utformning ber jag om synpunkter och kommentarer. Alla förslag som syftar till att ge dig som läsare en ökad förståelse för exergibegreppet välkomnas tacksamt.

En bok som jag varmt vill rekommendera för den som vill få ett humanistiskt perspektiv på exergibegreppet och en helhetsyn är *Synvänder – om naturen, människan och helheten* av Bo Lundberg och Kerstin Abram-Nilsson, LTs förlag (1988).

För den som vill lära sig att använda exergibegreppet rekommenderas *Exergilära — en handledning för självstudier* som kan beställas av mig. Denna ger dig grundläggande kunskaper för att använda exergibegreppet.

Jag vill också framföra mitt tack till Lars Berggrund, Göteborgs stadsbyggnadskontor, för alla goda synpunkter och initiativet till denna skrift, till Annika Winberg och Magnus Hesselmar, vid Göteborg Energi AB som hjälpt mig med nödvändiga data för Göteborgs energiomsättning och till Birgit Nielsen, Melica, för att hon gjort sammanfattningen mer begriplig.

Mölndal i april 1992

Göran Wall

Tel. 031-87 75 79

## NOMENKLATUR

Beteckning Storhet [Enhet enligt SI-systemet]

$A$	Area [ $\text{m}^2$ ]
$c$	Ljushastigheten i vakuum $\approx 2.997925 \times 10^8$ m/s
$c, C$	Specifik värmekapacitet [ $\text{J}/\text{kg K}$ ] eller värmekapacitet [ $\text{J}/\text{K}$ ], anger mängden värme (inre energi) som per massenhet upptas i en kropp då temperaturen stiger med en grad Celsius dvs en Kelvin
$e, E$	Specifik exergi [ $\text{J}/\text{kg}$ , Wh/kg] och exergi, nyttig energi [J, Wh]
$E/Q$	Exergifaktor [dimensionslös, %]
$f, F$	Specifik fri energi (= Helmholtz funktion) [ $\text{J}/\text{kg}$ , Wh/kg] och fri energi [J, Wh], $F = U - TS$ .
$g, G$	Specifik fri entalpi (= Gibbs funktion) [ $\text{J}/\text{kg}$ , Wh/kg] och fri entalpi [J, Wh], $G = H - TS$ .
$h, H$	Specifik entalpi [ $\text{J}/\text{kg}$ , Wh/kg] och entalpi, som är summan av inre ( $U$ ) och yttre energi (tryckenergi $pV$ ) dvs: $H = U + pV$ [J, Wh]. Betecknas ibland i litteraturen också $i$ och $I$ .
$H_0$	Entalpi för systemet vid omgivningstillstånd dvs i jämvikt med omgivningen
$k$	Boltzmanns konstant $= 1.38054 \times 10^{-23}$ [J/K]
$m$	Massa [kg]
$n_i$	Antal mol av ämne $i$ [mol]
$n_{i0}$	Antal mol av ämne $i$ för systemet vid omgivningstillstånd [mol]
$P_{\text{en}}$	Energieffekt [W]
$P_{\text{ex}}$	Exergieffekt [W]
$p$	Tryck [Pa]
$p_0$	Omgivningstryck [Pa, bar] här $101.3 \text{ kPa} = 1.013 \text{ bar}$
$q, Q$	Specifik värmemängd [ $\text{J}/\text{kg}$ , Wh/kg] och värmemängd [J, Wh]
$\bar{R}$	Allmänna gaskonstanten $\approx 8.314$ [J/mol K], allmänna tillståndslagen för ideala gaser lyder: $pV = n\bar{R}T$ , notera att denna även skrivs $pV = mRT$ , dvs $R$ anges i J/kg K och blir specifik för varje gas.
$S$	Entropi, anger grad av oordning följande samband gäller (2:a lagen): $dS \geq \delta Q/T$ [J/K]
$S_0$	Entropi för systemet vid omgivningstillstånd [J/K]
$s_i$	Specifik entropi, entropi per massenhet, för ämne $i$ , [ $\text{J}/\text{kg K}$ ]
$t$	Tid [s, h], 1 år = 8760 h = 31 536 000 s
$T$	Temperatur [K] (Absoluta nollpunkten $0 \text{ K} \approx -273.15^\circ \text{C}$ )

$T_0$	Omgivningstemperatur [K] oftast $20^\circ\text{C} \approx 293\text{ K}$
$u, U$	Specifik inre energi [J/kg, Wh/kg] och inre energi [J, Wh]
$v, V$	Specifik volym [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] och volym [ $\text{m}^3$ ]
$W$	Arbete (Work) [J, Wh], definitionsmässigt lika med exergi
$\mu_i$	Kemisk potential för ämne $i$ [J/mol], kemisk potential anges ofta som Gibbs funktion (fri entalpi) per mol och är viktig för att ange om kemiska processer sker
$\mu_{i0}$	Kemisk potential för ämne $i$ i omgivningen [J/mol]
$\eta_{\text{en}}$	Energiverkningsgrad = $Q_{\text{ut}}/Q_{\text{in}}$ där $Q$ anger den nyttjade energin [dimensionslös, %]
$\eta_{\text{ex}}$	Exergiverkningsgrad = $E_{\text{ut}}/E_{\text{in}}$ där $E$ anger den nyttjade exergin [dimensionslös, %]

### Index

$i$	Anger substans t ex grundämne och summationsindex
0	Anger omgivningstillstånd

### Prefix

k	Kilo = 1 000 = $10 \times 10^3$
M	Mega = 1 000 000 = $10 \times 10^6$
G	Giga = 1 000 000 000 = $10 \times 10^9$
T	Tera = 1 000 000 000 000 = $10 \times 10^{12}$
P	Peta = 1 000 000 000 000 000 = $10 \times 10^{15}$

### Enheter

W	Watt
J	Joule, 1 J = 1 Ws (Wattsekund), 1 Wh (Wattimme) = 3 600 Ws = 3 600 J, dvs 1 TWh = 3.6 PJ

### Förkortningar

App.	Appendix
Avsn.	Avsnitt
Ekv.	Ekvation
Fig.	Figur
Kap.	Kapitel
Tab.	Tabell

## SAMMANFATTNING

Exergi är ett kvalitetsmått på energi. Begreppet exergi myntades 1953, men det har sina vetenskapliga rötter i förra århundradet och började på allvar användas i samband med 70-talets energidebatt.

Exergibegreppet behövs för att förklara att det inte är energi vi förbrukar. Vi förbrukar istället energins kvalitet, dvs exergin. Det är en fundamental naturlag att energin liksom materia, inte kan skapas eller förintas. Energin kan endast omvandlas mellan olika former. Detta sker genom att dess kvalitet förbrukas. Denna kvalitet — exergi — kan vi hushålla eller slösa med.

Det är också en fundamental naturlag, att exergin — totalt sett — ständigt försämras, och att all exergi förr eller senare går förlorad. När vi använder resurser, så utnyttjar vi exergin. Ingenting är gratis, en ökning av exergin på ett ställe kräver en ännu större minskning någon annanstans så att exergin totalt sett minskar.

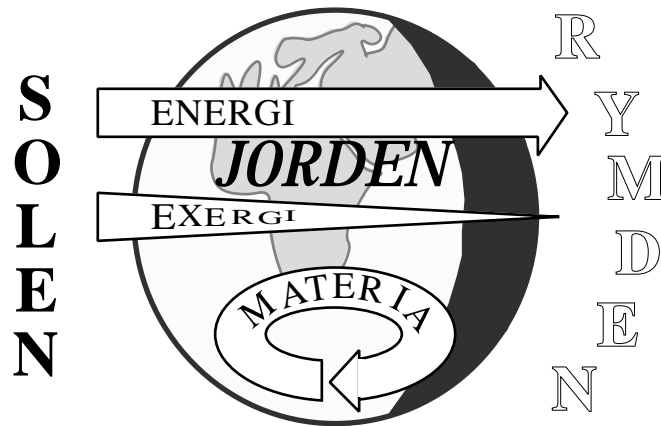
Har vi ingen kontrast eller skillnad då har vi inte heller någon exergi och desto större kontrast desto mer exergi har vi. Kontrasten eller exergin kan uttryckas på många olika sätt, som energi: en kall glasspinne en varm sommardag, som material: en guldklimp i sanden, eller som information: koderna i våra gener. Alla dessa exempel har också andra värden som mänskliga, ekonomiska och ekologiska. Genom att bevara exergin så bevaras ofta även dessa värden. Den största kontrastriken hittas vi i den levande naturen. Den som en gång skapat människan — *Homo sapiens sapiens*, den största kontrasten av allt i vår värld.

### **Solen — vår “enda” exergikälla**

Nästan all exergi, som omsättes i det tunna skikt på jordens yta där liv kan förekomma, härrör från solen. Exergirikt solljus når jorden. En hel del reflekteras, men det som jorden tar upp omsättes och lämnar så småningom jorden som exergifattig värmestrålning. Exergin förbrukas alltså men skapar härigenom våra livsbetingelser på jorden. De gröna växterna tar upp exergi ur solljus och omvandlar den till biomassa, som sedan passerar genom olika näringskedjor. I varje led förbrukas exergi, och den sista gnuttan exergi ger liv åt maskar och mikroorganismer i marken.

Den mat som människan lever av är således exergi som omvandlats från solljuset via växter och djur. Genom människokroppen blir en del arbete och tankar, en del används för att bygga upp organismen. Större delen förbrukas

dock i livsprocesserna, då maten blir värme. För de flesta människor på jorden är också solexergi, bunden i ved och kodynga, den främsta yttre värmekällan.



Vissa samhällen, däribland vårt, förbrukar stora mängder lagrad solexergi i form av kol, olja och gas. Detta sker ofantligt mycket snabbare än bildningen.

Rika fyndigheter av mineraler "kontrasterar" mot omgivningen, mera ju rikare de är. De är också bärare av exergi. Bryter man och använder mineralet finns exergin kvar, sprids det sedan ut och får vittra ned förstörs exergin. En fattig fyndighet, som alltså har mindre exergi, kan utnyttjas genom en större insats av exergi i brytning och anrikning.

En viktig egenskap hos exergibegreppet är dess beroende av omgivningen. Precis som all verksamhet i samhället är relaterad till en omgivning — vi värmer våra hus på vintern därför att omgivningen blir kall — innebär användandet av exergibegreppet ett automatiskt hänsynstagande till omgivningen.

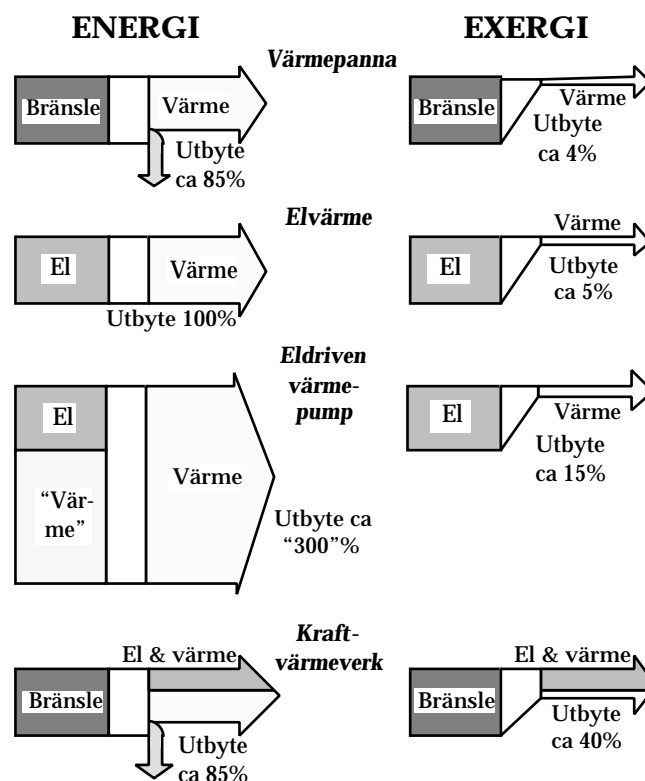
Exergibegreppet presenteras i kap. 2, och en härledning av begreppet ges i app. A. Exergi kan kort sägas ange den nyttiga delen av en resurs i dess omgivning, det vill säga nyttan — arbete eller den ordning — som resursen kan uträtta i sin omgivning. Exergibegreppet är nära relaterat till begreppet entropi — oordning — eller snarare negentropi — ordning, som är mer tillämpligt i detta sammanhang. I avsn. 2.3 diskuteras energi och material som bärare av exergi, och i avsn. 2.4 diskuteras omgivningen och dess betydelse. Exergi och information, som det definieras i fysiken är egentligen samma sak, båda är ett mått på kontrast. Detta behandlas i avsn. 2.5 och utförligare i app. D.



## Energi eller exergi?

Den 18 november 1975, skrev Hannes Alfvén under rubriken “Exergitredning kan ge ny energipolitik” i Svenska Dagbladet: “Att helt enkelt summera energi av olika värde är lika felaktigt som att ange kassabehållningen i antalet mynt utan att ange om de är enkronor eller femöringar.” Att utgå från exergi, energins kvalitet, gör det däremot möjligt att jämföra olika energiformer. El kan jämföras med enkronor och värmen i våra bostäder med femöringar, dvs båda är mynt — någon form av energi, men de har helt olika värde — kvalitet eller exergi.

Skillnaden i energi- och exergisynsättet illustreras i figuren nedan för fyra energiomvandlare: en värmepanna, en elradiator, en elvärmepump och ett kraftvärmeverk. Värmepannan omvandlar ett bränsle som olja, ved eller gas till värme. Energiutbytet är ca 85 procent men exergit utbytet är bara ca 4 procent. Detta beror på den stora kvalitetsskillnaden mellan bränsle (“enkronor”) och värme (“femöringar”). Elvärme — elektrisk kortslutning — har energiutbytet 100 procent, helt enligt naturlagen om att energi inte kan förintas — all el måste bli värme. Dessa 100 procent är ingen övre gräns för energiutbytet då el omvandlas till värme, se elvärmepumpen i samma figur. El kan alltså omvandlas till mer än 100 procent nyttig värme genom att utnyttja omgivningens “värme” för sin värmeproduktion. På samma sätt som vi kan växla en krona i fler än en femöring.



Exergiutbytet för elvärme är bara 5 procent, dvs en dålig växlingskurs, och för en elvärmepump däremot ca 15 procent, en något bättre växlingskurs. Energiutbytet är analogt med myntutbytet och exergiutbytet är analogt med det ekonomiska utbytet. I ett kraftvärmeverk — både el(kraft)- och värmeproduktion — är energiutbytet ca 85 procent men exergiutbytet är bara 40 procent, vilket är samma som för ett värmekraftverk — bara elproduktion (ur värme). Vi kan alltså konstatera att det maximala energiutbytet (jfr “myntutbytet”) mycket väl kan överstiga 100 procent då vi producerar värme, exergiutbytet (“värdeutbytet”) däremot kan aldrig överstiga 100 procent — en grundläggande naturlag.

Exergin utgör själva drivmedlet då energi och material omvandlas i en levande cell, en maskin, ett samhälle eller på jorden.

Exergibegreppet ger en ny bild av resursomsättande system. Det moderna industrisamhället framstår som en gigantisk exergislösare. Exergiutbytet då kärnbränsle i lättvattenreaktorer omvandlas till el för att bli elvärme i våra hus är ca 0.25 promille, dvs ett utbyte av 1 på 4 000. Detta innebär inte bara ett enormt resursslöseri — det innebär också en förödande miljöförstöring — den rådande samhällsutvecklingen är således ohållbar. Men, samtidigt som förlusterna avslöjas visas också möjligheterna till förbättring. Exergibegreppet har därför kommit att användas alltmer, då intresset för effektivisering av energi- och materialomsättningen ökar i takt med resursbrist och miljöförstöring, och är antagligen snart allmänt accepterat och standard vid all beskrivning av energi- och materialomsättande system.

Exergi mäts i Joule (J). En Joule motsvarar ungefär energin från ett stearinljus under 1 sekund. En hästkraft under en timma utvecklar ca 2 650 000 Joule. Stora exergiflöden uttrycks ofta i PJ. P (Peta) anger 1 000 000 000 000 000 (miljoner miljarder).

Schrödinger säger i boken “Vad är liv?” {Schrödinger 1944} att “vi lever av negentropi” — ordning. Han skulle hellre kunna säga att “vi lever av exergi”. Exergi är bränslet för allt levande, som biosfären (den levande naturen), ett ekosystem, en art eller en levande organism. Begreppet exergi är därför användbart inom vetenskaper som studerar levande system. Kapitel 3 är rubricerat Helhetssyn och behandlar olika aspekter på hur vi beskriver vår omgivning och oss själva. De flesta avsnitten behandlar tillämpningar av exergibegreppet och de två sista ägnas åt den synen på miljön och människan — viktiga bitar i samhällsplaneringen. I avsn. 3.1-3 ger jag en kortfattad beskrivning av hur exergin omvandlas på jorden. Exergin når jorden genom solljuset, som sedan omvandlas och härigenom upprätthåller livet på jorden.

Sociosfären utgörs av den moderna människan och de system hon skapat, som byggnader och maskiner. I denna sfär ingår världshandeln som ett viktigt exergiflöde, vilken beskrivs i avsn. 3.3.

Med utgångspunkt från energiomvandlingen i ett värmekraftverk kan man klart se skillnaden mellan exergi- och energibetraktelser. Dessa betraktelsesätt kan sedan tillämpas på hela energisystemet i samhället, se avsn. 3.4. En utvidgning av exergibegreppet till att även beskriva materialomvandlingar görs i avsn. 3.5 och app. B. För att kunna knyta samman beskrivningen av exergiomsättningen i det mänskliga samhället med den globala exergiomsättningen redogör jag i avsn. 3.6 för hur exergin flödar i olika system. Det mänskliga samhället beror idag av exergiflöden från ändliga lager av exergi i mineral, som fossila bränslen och malmer, men även av förnybara exergiflöden från fonder som skog och åker, vilka omvandlar solljuset till nyttig gröda. Mänskliga individer, grupper och samhällen är i ett ständigt beroende av exergiflöden för att tillfredställa sina behov. Vanligen talar man om energiresurser som kol och olja, materialresurser som malmer, mat och andra biologiska material och självreningsförmågan hos miljön. Men dessa fenomen är alla exempel på olika exergiflöden och kan — åtminstone i princip — kvantifieras på ett enhetligt sätt. I avsn. 3.7 beskriver jag effektivitetsbegrepp som energiverkningsgrad och exergiverkningsgrad, vilka är användbara vid jämförelse mellan olika system eller processer. Hjälpmedel vid fördjupade exergistudier är metoder som exergianalys, se avsn. 3.8, och exergiekonomi, avsn. 3.9.

Exergi, helhetssyn och samarbete eller resursmätt, miljöperspektiv och samhällsorganisation är begrepp som har en avgörande betydelse för hur vårt samhälle kommer att utvecklas. Exergi är ett fundamentalt resursmätt inom naturvetenskapen och anger det fysiska värdet för energi, materia och information. En helhetssyn måste rymma även den omgivande yttre miljön såväl dess svagheter som möjligheter. Vår syn på den yttre miljön berörs i avsn. 3.10. Samhällsorganisationen måste rymma samarbete över nationella, kulturella och religiösa gränser och samarbetet inom varje organisation måste karakteriseras av stor öppenhet och inflytande för alla — viktiga förutsättningar i ett verkligt demokratiskt samhälle, en kort introduktion till detta ges i avsn. 3.11. Exergibegreppet måste tillämpas i planeringen av resursanvändningen i samhället för att skapa en större livskraft. Denna planering måste också baseras på ett helhetsperspektiv och samverka med alla för att skapa en bättre "fingertoppskänsla". Detta innebär att varningssignaler från "fältet" omedelbart måste uppmärksammas och inte förhållas eller filtreras bort av en central makt eller byråkrati. Inom näringslivet tillämpar man

alltmer och med stor framgång ett större inflytande och ansvar för arbetarna. Denna medvetenhet måste också vinna gehör i samhället i övrigt.

I avsn 3.12 presenteras exergiomsättningen i det svenska samhället. Utifrån denna naturvetenskapliga beskrivning av ett samhälles resursomsättning kan man sedan diskutera möjliga förbättringar och jämföra olika samhällen i historiskt och globalt perspektiv. Den naturliga fortsättningen blir sedan att fråga hur effektiv är den totala exergiomsättningen i samhället, vilket behandlas för några typiska resurskedjor i avsn. 3.13.

Denna skrift behandlar och tillämpar exergibegreppet från ett helhetsperspektiv på samhällets resursomsättning, särskilt i Göteborg. Exergiomsättningen i Göteborg behandlas i kap. 4.

### **Exergi i Göteborg**

Exergi når Göteborg i naturliga flöden som solljus, vind och sötvatten, genom fonder sk levande bestånd i form av mat och trä och från lager sk döda bestånd (ej förnybara) som kol, olja och gas. Uppskattningar av de årliga förnybara resurserna ger: solljus 2 500 PJ mot Göteborgs land- och havsyta, vind 30 PJ över havsytan, gröda 2 PJ, virke 1 PJ och Göta älvs sötvatten 4 000 PJ.

Det naturliga resursflödet över Göteborg framstår således som enormt. Av detta skulle sol och vind kunna göra göteborgarna mer än självförsörjande på värme och el. De enorma exergiresurserna som går förlorade då Göta älvs sötvatten blandas med det salta havsvattnet är svårt att utnyttja, men de kommer oss i alla fall till godo som en varmare och fuktigare omgivning. När det söta och salta vattnet blandas, frigörs nämligen exergi som värme.

De förnybara resurserna kan vi tillåta oss att slösa med, men de ej förnybara måste utnyttjas maximalt då de också innebär svåra miljöstörningar.

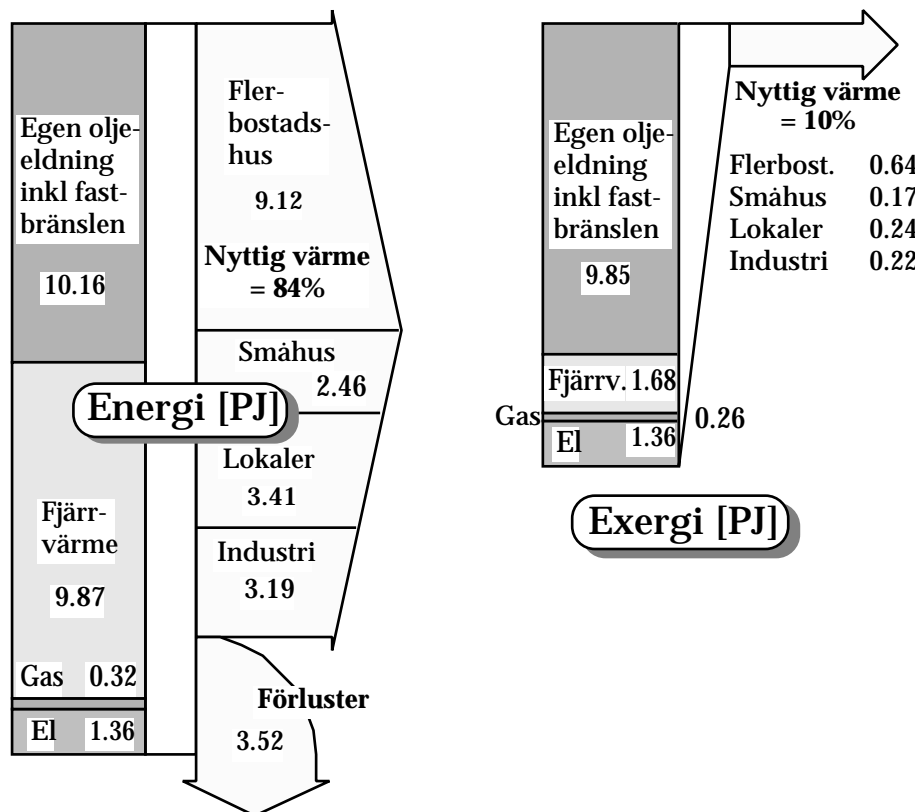
Idag tillvaratas endast avkastningen från åker och skog, dvs en bråkdel av exergiinflödet. Solexergiinflödet över Göteborgs tätort är ca 350 PJ per år samtidigt som exergibehovet för uppvärmning i Göteborg, se nästa figur, är 1.3 PJ per år. Mindre än 0.5 procent av solexergin skulle alltså kunna täcka hela uppvärmningsbehovet.

### **Uppvärmningen**

Energi- och exergiomsättningen för uppvärmningen, rumsvärme och varmvatten, i Göteborg 1984 återfinns i figuren nedan. Som vi ser är

exergitbytet endast 10 procent trots att energitbytet är 84 procent. Det totala uppvärmningsbehovet i Göteborg blir 18.18 PJ energi eller 1.27 PJ exergi.

Under senare år har en allt större del av oljeeldningen ersatts av fjärrvärme från spillvärme och avfallsförbränning samt gaseldning. Även om spillvärme kan ses som en förbättring är det ingen lösning på sikt. Förekomsten av spillvärme är ju uttryck för stora exergiförluster som borde undvikas. Risken finns att man annars ekonomiskt bygger fast en ineffektiv teknik.

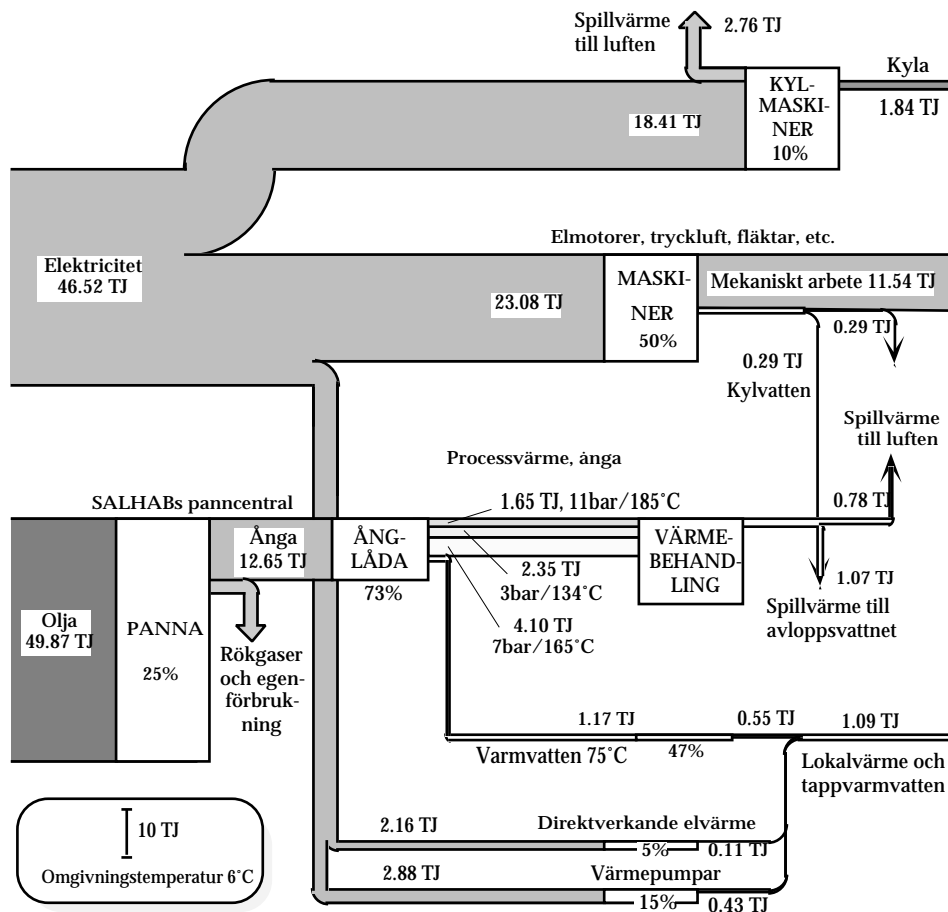


Att ersätta ett fossilt bränsle med ett annat, olja med gas, är inte heller en miljö- och resursmässig lösning i ett längre perspektiv. På sikt måste samhällets resurser vara förnybara och miljövänliga. Som vi senare ska se kan ett förslag till lösningen på uppvärmningsproblemet vara effektiv värmeisolering och solfångare.

## Industrin

Låt oss studera exergisättningen vid Slakthusets industriområde som exempel på en industri i Göteborg, se figuren nedan. Området omfattar ca 45 000 m<sup>2</sup> och består av ca 40 olika livsmedelsföretag med totalt ca 600 anställda, varav ca hälften vid Scan Väst/Scan Dukat. Den årliga exergisättningen uppgår till ca 98 TJ (Tera = 1 000 000 000 000, dvs miljoner

miljoner). Eftersom det finns ett samtidigt behov av värme och kyla är det särskilt intressant att studera exergiförlusterna inom området. Processånga används vid korvrökning, kokning och fettraffinerings och stora kylbehov förekommer vid nedkyllning av produkterna, s k processkyla, samt för kylning av råvaru- och färdigvarulager. Den största elförbrukningen sker i kylkompressorer och för diskning och rengöring av maskiner åtgär periodvis stora mängder varmvatten. Hygienkraven motiverar ett stort ventilationsbehov, men då en låg inomhustemperatur eftersträvas blir uppvärmningsbehovet ändå relativt lågt.



### Exergiomsättningen i Slakthusets industriområde 1986

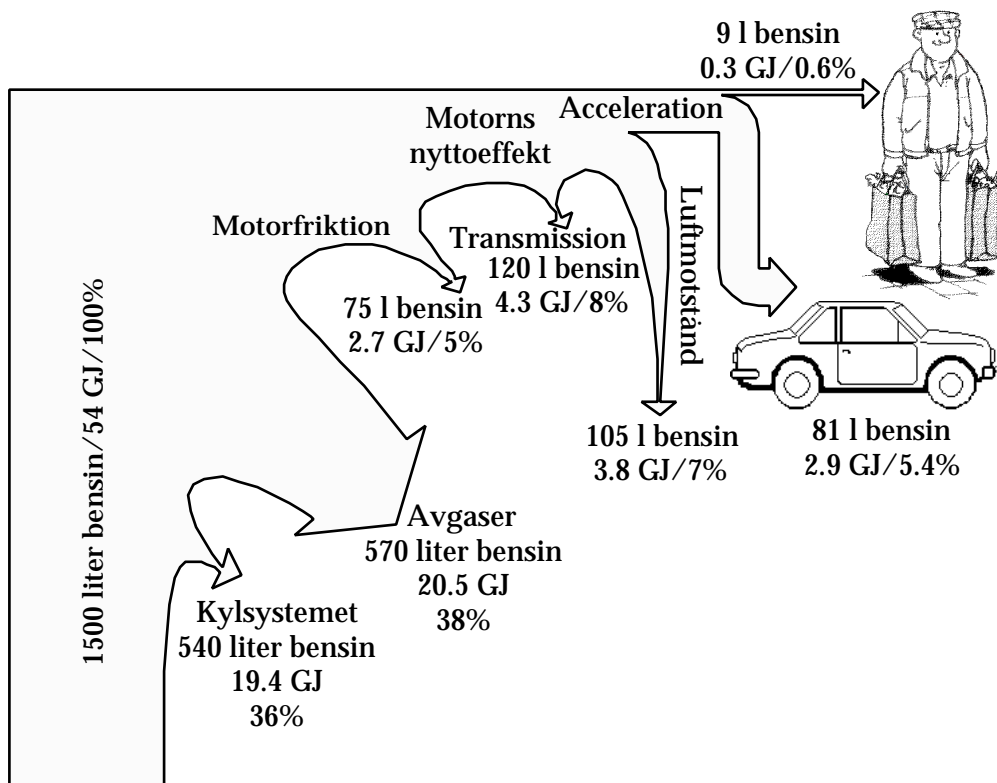
De mest exergiförbrukande processerna är lätta att urskilja i figuren. Den största enskilda exergiförlusten återfinns i ångpannan, utbytet är bara 25.4 procent, efter ånglådan (där trycket stryps) är exergikutbytet bara 18 procent. Omvandlingen av varmvatten till lokalvärme innebär ett utbyte av 47 procent, elvärme har som tidigare utbytet 5 procent och elvärmepumpar 15 procent. Förlusterna till omgivningen, som ofta diskuteras när det gäller spillvärmeutnyttjande, saknar egentligen värde — det är i anläggningen som de stora förbättringarna kan göras, i första hand genom värmeisolering och

tätning. Alla värme- och kylprocesser måste också effektiviseras, t ex genom en samtidig produktion av kyla och värme.

## Bilen

Bilen svarar för den största exergiförbrukningen inom transportsektorn.

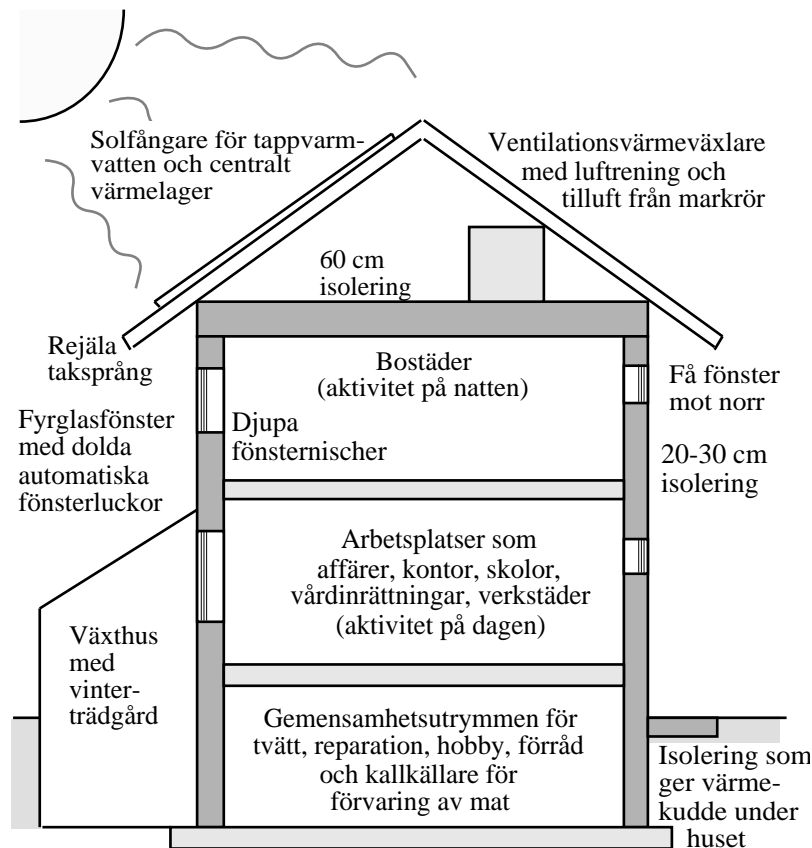
Exergiuutbytet för en bil, se figuren nedan, som transportmedel är ca 0.6 procent, dvs för att flytta göteborgaren 1500 mil med bil används 1500 liter bensin när utbytet endast är 0.3 GJ (Giga = 1 000 000 000) eller 9 l bensin. Dessutom “kostar” det ca 25 GJ exergi för att tillverka och underhålla en bil. Härtill kommer byggnation och underhåll av vägar. Det redan låga exergiuutbytet blir alltså ännu lägre om man också tar hänsyn till “kringkostnaden”. Här erbjuder cykeln och de kollektiva transportmedlen ett vettigt alternativ även i många andra avseenden — inte minst trafiksäkerheten. Transportbehovet kan också ses som resultatet av en bristande samhällsplanering. Genom ett bättre utnyttjande av våra hus och en större samordning av olika samhällsfunktioner blir många transporter onödiga, se skissen på huset här intill.



## Huset

De så typiska göteborgska landshövdingehusen har många fördelar — de erbjuder ett vettigt mellanting mellan höghus och villa — och skulle med enkla medel kunna byggas om till hus i ett resurssnålt och miljövänligt samhälle, se figuren nedan.

Ordentlig värmeisolering och ombyggnad av flerfamiljshus skulle innebära att behovet av energiresurser minskade samtidigt som fler arbeten skulle erbjudas just där människor bor. En ombyggnad enligt figuren — innebär att behovet av uppvärmning och transporter reduceras till ett minimum — våra hus skulle t o m kunna producera värme i överskott från solfångare på taken. På Rundradiogatan 12 i Göteborg har man kommit en bit på väg, med hjälp av solfångare och isolering har man reducerat uppvärmningsbehovet med en tredjedel.



Dessutom:

- Jäsning eller kompostering av humanavfall och köksavfall
- Avfallsåtervinning genom separation av papper, glas, metall, plast etc
- Planteringar av nyttoväxter som fruktträd och bärbuskar
- Boendeinflytande, mm



## En möjlighet

Exergibegreppet ger oss en insikt i samhällets resursomsättning som både skrämmer och fascinerar. Resursslöseriet framstår ibland som enormt samtidigt som det ger en bild av möjligheterna till förbättringar. Exempelen i texten är medvetet valda för att visa slöseriet, men också möjligheterna.

Exergibegreppet ger oss således ett verktyg för att vrida utvecklingen rätt. Genom att tillämpa exergibegreppet i samhällsplaneringen kan vi effektivisera resursanvändningen och samtidigt minska miljöeffekterna och sluta kretsloppen, vilket är en förutsättning om vi skall rädda miljön — vårt eget livsrum. Detta berör jag i kap. 5 där jag även tar upp vår egen roll i samhällsutvecklingen.

Till skriften hör också 8 stycken appendix, som ger en mer formell beskrivning och utvidgning av begreppen som presenteras i texten.

# 1. INTRODUKTION

Bristerna i det moderna samhällets resursförvaltning ligger på tre plan — inadekvata resursmätt, avsaknad av helhetsperspektiv och ett alltför begränsat medborgarinflytande. För det första saknas ett naturvetenskapligt baserat resursmätt, pengar som mått är alltför godtyckliga och saknar helt värde utanför det mänskliga samhället eller för den som saknar pengar. För det andra saknas en helhetsyn på samhällets resursomsättning, naturresurser betraktas som oändliga, och ingen skillnad görs mellan förnybara eller icke förnybara resurser. Även detta är en konsekvens av ekonomins prägling av vår uppfattningen av verkligheten. Idag talar man t o m om att prissätta miljön — miljöekonomi. Alltings beroende av allt, i synnerhet miljöeffekternas beroende av samhällets resursomsättning — en holistisk verklighetsbeskrivning — saknas i samhället. För det tredje har vi en alltför centralstyrd och autokratisk samhällsorganisation. Genom att varken efterlysa bättre resursmätt, en helhetssyn eller ifrågasätta sin egen roll är denna organisation i huvudsak orsak till dagens situation. Resurshushållning och miljövänlighet handlar således mer om en samhällsorganisation byggd på ett öppet och ärligt medborgarinflytande och mindre om nya centrala makt- och planeringsorganisationer — nya expertvälden kommer bara att förvärra situationen ytterligare. Vi måste börja fråga oss hur vi hamnat i dagens situation av resursbrist, miljöförstörelse och växande social misär. Orsaken är framförallt att styrningen av samhället koncentrerades till en liten elit — en centralstyrning. Ett samhälle är alltför komplext för att kunna förvaltas av ett fåtal personer, jfr med ett ekologiskt system. Dagens makthavare och beslutsfattare spelar huvudrollerna i det hyckleri som förkläds i vackra ord och tomma löften. Brundtlandkommissionens slutsats från 1987 att den fattige skall hjälpas på den rikes villkor talar sitt tydliga språk. 30 år av sk bistånd har gjort den fattige fattigare och den rike rikare än någonsin tidigare. Miljökonferensen i Rio 1992 tenderar att bli nästa manifestation av de globala orättvisorna — de fattiga ländernas krav ignoreras. Istället städas Rios gator för att bereda plats åt representanterna för den rika världen, vilket innebär död för tusentals gatubarn. Det organiserade hyckleriet blir bara alltmer påtagligt {Brunsson 1989, 1990}. Det handlar således mer om glasnost och perestrojka än om spektakulära miljökonferenser med tomma löften. Vi måste istället utveckla demokratin i samhället så att de enskilda människorna får ett större inflytande — ansvaret tar de redan — som mer liknar villkoren för individerna i naturliga ekologiska system. I ekologiska system pågår en ständig konkurrens och samverkan om livsutrymmet vilket

skapar den evolutionsprocess — föränderlighet — som är en förutsättning för livets utveckling på jorden. I dagens samhälle saknas denna livskraft. Genom parlamentarism och “ekonomism” inriktas istället samhället mot konservatism — beständighet — vilket verkar förödande på bl a strävanden mot en mer miljöanpassad resursförsörjning. Varje försök till nytänkande slås ner med kraft, vilket framförallt drabbar den som försvarar naturens villkor. Det är således ingen tillfällighet att människor som arbetar för en samhällsutveckling i harmoni med naturen tvingas organisera sig i föreningar som Greenpeace, Svenska Naturskyddsföreningen, etc, som står utanför och i strid mot etablisemanget. Dessa organisationer och människor, vilka representera en ovärderlig kunskap och kompetens, måste istället utgöra en naturlig del i samhällets förvaltning. Så t ex har det visat sig att miljörelsens alternativa energiplan den sk MALTE som presenterades under 70-talet visat sig vara den mest riktiga framskrivningen av samhällets energiomsättning. Varför skall så kompetenta människor arbeta med samhällets resursförsörjning på sin fritid, samtidigt som inkompetensen hos vissa myndigheter avlönas av skattebetalarna? Situationen är på sikt ohållbar.

Syftet med denna studie är att presentera fysiska begrepp för en utvidgad resursbudgetering och att föreslå ett antalet grundbegrepp som kan vara värdefulla också i de sociala och ekonomiska vetenskaperna. Begreppen tillämpas bl a i ämnet fysisk resursteori, som presenteras kort i faktarutan nedan.

### FYSISK RESURSTEORI

I naturen finns det fysiska system som omsätter **energi** och **material** och som därvid bygger upp och vidmakthåller **ordnade strukturer**. Exempel på sådana system är

levande organismer,  
 ekosystem, där levande organismer samspelar med varandra och med den icke-levande omgivningen,  
 jordytans kretslopp.

Också i mänskliga bosättningar och samhällen sker en liknande energi- och materialomsättning. Strukturell organisation hos materia beskrivs lämpligen i **informationsteoretiska** termer. Vidare har de här nämnda systemen ofta styrsystem som omsätter information, vilken är fysiskt bunden till relativt små mängder energi och material. Ett viktigt exempel är den genetiska informationen hos levande organismer.

Energi, material och information benämnes här gemensamt **fysiska resurser**.

**Fysisk resursteori** är vetenskapen om fysiska resurser och om hur dessa omsätts i skilda system.

Främst studeras geofysiska, ekologiska och samhälleliga system samt delsystem därav. Dessa beskrivs och analyseras med matematiska och naturvetenskapliga metoder.

Särskild uppmärksamhet ägnas **omsättningen av fysiska resurser i samhälleliga system**. Denna studeras i relation till mänskliga behov, resurstillgångar och möjlig inpassning i de naturliga systemen.

Inom framför allt energiplaneringen förekommer nu en rad begreppsmässiga oklarheter och godtyckliga benämningar. Man försöker ofta klara denna begreppsförvirring genom att införa olika energienheter som wattimmar elenergi (Whel) och ton oljeekvivalenter (toe). Problem uppstår då istället vid jämförelse mellan energi mätt med olika enheter. Härtill kommer också problemet att olika länder har olika definition av dessa, vilket bl a beror på hur den aktuella energiformen produceras. Sälunda har i utländsk statistik ofta elenergin multiplicerats med ca 3 då el vanligen produceras i fossileldade (kol eller olja) värmekraftverk. Vid beskrivningen av energiprocesser anges ofta effektivitetsbegrepp som är helt missvisande och som ger en felaktig bild av verkligheten. Man talar t ex om att en värmepanna har en verkningsgrad av 90%, utan att samtidigt ange att verkningsgraden, som den definieras för värmepannan, faktiskt kan överstiga 100%, eftersom energi har olika kvalitet. (Detta kommer att beskrivas utförligare i avsn. 3.7.) De idag använda energi- och effektivitetsbegreppen kan därför inte utan vidare användas i en resursräkenskap. Den viktigaste orsaken till detta är att dessa begrepp saknar en entydig naturvetenskaplig grund samt en koppling till omgivningen och de förutsättningar som omgivningar ger. Vid de flesta energiprocesserna har omgivningen en viktig betydelse som t ex vid husuppvärmning.

Relationen mellan den fysiska resursbasen och den sociala och ekonomiska strukturen är ett villkor som ofta negligeras av historiker, sociologer och ekonomer {Cottrell 1955, Wilkinson 1973}. Naturvetare som beskrivit den fysiska resursbasen har å andra sidan ofta ett svagt intresse för de sociala och ekonomiska strukturerna i samhället.

Det finns dock undantag. Det är ekonomer som försökt att ta hänsyn till inte bara ekonomiska faktorer utan även fysiska faktorer {Boulding 1950, Georgescu-Roegen 1971, Adler-Karlsson 1975, 1990}. Det är naturvetare som inriktat sitt intresse mot katastrofer och hot framkallade av människans och hennes förskingring och utspridning av naturresurser {Borgström 1973, Hornborg 1989, Malaska 1989}. Även humanister och folkbildare har tagit utgångspunkt i ett resursperspektiv {Lundberg 1988}. Ekologiska aspekter har betytt mycket för tänkandet på detta område under många år {Odum 1971, Odum och Odum 1976}. Vid studier av framtidsfrågor är resursförsörjningen av central betydelse. En ökad förståelse av energi- och materialomsättningen är nödvändig. Dagens situation inom jord- och skogsbruk och energiförsörjningen belyser bristen på ett relevant resursmätt och en överblick. Intresset för dessa frågor i samhället har ökat starkt hos många människor under den senaste tiden, vilket bl a framgår av intresset från massmedia {Lindgren et al.

1983}. För att kunna ge svar på om vilken teknik vi skall välja och hur denna teknik skall tillämpas behövs också bättre kunskap om miljön — naturen och dess kretslopp. Vårt eget samhälles funktioner är ju integrerade i de naturliga omsättningen av energi och material. I detta sammanhang fyller således ämnet fysisk resursteori en viktig roll där särskild uppmärksamhet ägnas omsättningen av fysiska resurser i samhällsliga system. Exergi, helhetsyn och samarbete är således nödvändiga grunder i ett livskraftigt samhälle.

Den 18 november 1975, publicerade Svenska Dagbladet en artikel av Hannes Alfvén med rubriken *“Exergitutredning kan ge ny energipolitik”*. I denna artikel jämför Alfvén energistatistiken med en felaktig kassabokföring.

*“Att helt enkelt summera energi av olika värde är lika felaktigt som att ange kassabehållningen i antalet mynt utan att ange om de är enkronor eller femöringar.”*

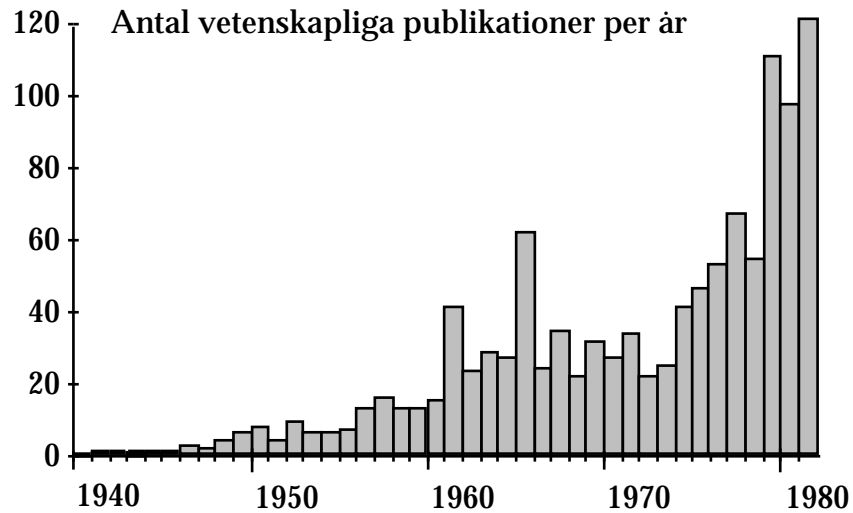
Detta har en slående likhet med dagens uppvärmningssystem. Här växlar vi enkronor (elektricitet) mot femöringar (inomhusvärme), en enkrona för varje femöring. Tyvärr är denna artikel lika aktuell idag.

Begreppet exergi har, mig veterligen, endast förekommit en enda gång i den hyllmeter av statliga energitutredningar som publicerats sedan dess. På sidan 121 i Prop. 1978/79:115, *Riktlinjer för energipolitiken, Bilaga 1* förekommer ordet exergi en gång i inledningen till ett avsnitt om olika energislag i allmänhet. I en intervju i KOMMUNaktuellt, nr 3 den 29 januari 1987, påstår de ansvariga politikerna vid dåvarande energi- och miljödepartementet och energiexperterna vid dåvarande statens energiverk och statistiska centralbyrån att exergibegreppet är för svårt för att användas i dessa sammanhang. (Som jag tidigare nämnt kände inte ens energiministern under denna period till begreppet.) Detta förklarar varför samhället har så stora problem med resursförsörjningen och miljön — vi saknar helt enkelt kompetens. Kompetens skapas inte bara för att man inrättar departement och tillsätter ministrar och strör miljarder på energiforskning och energiprojekt. Kompetens tar många år att bygga upp.

I skriften *“Naturresurserna och den regionala planeringen”* uttrycker Erik Wirén {1990} behovet av kompetens på följande sätt:

*“En ny strävan att förstå komplexa dynamiska sammanhang ersätter successivt en tidigare ambition att i detalj klarlägga det påvisbara och etablera ‘fakta’. Den moderna resursteoris introduktion av begreppet exergi, ..., är en liknande förändring av synsätt, som rimligen måste få effekt i form av ändrat värderings- och bedömningsunderlag.”*

Begreppet exergi förekommer allt mer i litteraturen och i dagligt språkbruk. I fig. 1.1 redovisas antalet internationella vetenskapliga publikationer under perioden 1940-1982. Som vi ser ökar antalet stadigt och idag vinner begreppet mark inom områden utanför de tekniska. Idag uppgår antalet vetenskapliga publikationer till totalt långt över 2000 och antalet växer med flera hundra varje år.



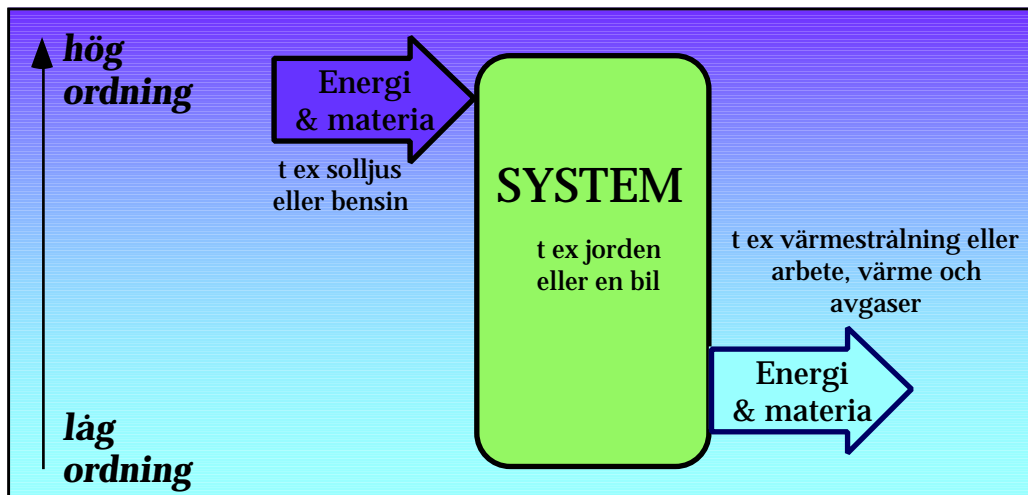
Figur 1.1 Antalet internationella vetenskapliga publikationer på exergiområdet 1940-82.

## 2. EXERGI

### 2.1. Energi, materia och ordning

Energi och materia kan inte skapas eller förintas. Detta är en fundamental naturlag. Det finns inte några källor eller sänkor (avlopp) för energi och materia. Energi och materia kan endast omvandlas mellan olika former. Detta sker genom att dess ordning förbrukas. Lokalt kan ordningen förbättras, men detta kan endast ske på bekostnad av en större oordning någon annanstans. Totalt gäller att ordningen ständigt försämras. Detta är också en fundamental naturlag. Kortfattat kan vi säga att: varken energi eller ordning kan skapas — endast förvaltas.

Situationen belyses av figur 2.1 nedan. Energi och materia passerar genom ett system, som är väl avgränsat i tid och rum. Drivkraften för flödet är degraderingen av ordningen. Energins och materiens ordning (kvalitet) försämras i flödet som passerar genom systemet. Detta är en förutsättning för att flödet skall ha en bestämd riktning och vara avgränsat i tiden. System som på detta sätt upprätthålls genom att utnyttja flöden av energi och materia kallas dissipativa (utspridande) — ordning skingras eller metaboliska (ämnesomsättande) system. Hit hör t ex levande organismer och maskiner.



Figur 2.1 Flödet av energi och materia genom ett system

Då energi och materia passerar genom ett system upplagras ofta mycket liten del av flödet i själva systemet. Det råder vanligen en balans mellan ingående och utgående mängd energi och materia — mass- och energibalans.

Energi och materia verkar endast som bärare av ordning, och det är ordningen som förbrukas då energi och materia omsätts. Enligt detta sätt att

se på energi- och materialflöden är det fel att tala om att energi och materia produceras eller konsumeras. Det vi menar är att **energiformer** och olika former av materia dvs material som t ex bränslen, elektricitet och stål produceras eller konsumeras. Det är endast ordningen som kan förloras eller konsumeras. Om en gammal bil står ute i naturen och rostar förlorar materien i kvalitet, men materien finns kvar. Den kommer att ingå nya kemiska föreningar med omgivningen. I samhällsekonomisk och naturvetenskaplig mening kan man också säga att bilen och dess materia förlorar i värde, blir med tiden värdelös — ordningen förskingras

Flöden av energi och materia kan betraktas som två olika fenomen för att transportera ordning. (Lite senare skall vi se att även information kan betraktas på samma sätt.) Distinktionen mellan dessa ur praktisk synvinkel är ofta oklar och godtycklig. Ett visst flöde kan oftast betraktas både som ett flöde av energi och materia. Mer om detta i avsnitt 2.3 nedan.

Resten av detta avsnitt och avs. 2.2 kommer att ägnas åt en mer teoretisk beskrivning av exergibegreppet. Den som inte vill ta del av detta kan därför gå direkt till avsn. 2.3.

Istället för att säga att ordningen minskar, kan man säga att bristen på ordning ökar, eller att entropin eller oordningen ökar. Detta uttrycks i termodynamikens andra lag som att omvandlingar eller processer alltid måste ske från ett tillstånd med låg sannolikhet till ett tillstånd med hög sannolikhet. Processer drivs alltså av att ordning (låg sannolikhet) övergår i oordning (hög sannolikhet). Energin och materien omvandlas alltså till alltmer sannolika tillstånd, dvs sprids ut på ett ständigt ökande antal möjliga tillstånd. Ordningen minskar och kontrasten i ett system eller flöde suddas alltmer ut. Ett exempel på en sådan degradering av ordning är ett varmt och ett kallt flöde där ju ordningen och kontrasten ges av temperaturskillnaden mellan flödena, som sedan blandas till ett ljummet flöde. Ett ljummet flöde saknar kontrast och har därigenom lägre ordning och kontrast än ursprungsflödena. I fysiken anges detta som en ökning av oordningen (entropin) för det totala systemet. Det totala systemet består av alla in- och utflöden samt alla omvandlingssystem däremellan. Oordningen (entropin), betecknad med  $S$ , kan skrivas som en summa:

$$S = -k(P_1 \ln P_1 + P_2 \ln P_2 + \dots + P_i \ln P_i + \dots + P_\Omega \ln P_\Omega) = -k \sum_{i=1}^{\Omega} P_i \ln P_i \quad (1)$$

där  $k = 1.38054 \times 10^{-23}$  [J/K] (Boltzmanns konstant),  $\Omega$  = antalet tillåtna tillstånd för det totala systemet och  $P_i$  är sannolikheten för tillståndet "i". Summan av sannolikheterna för alla tillåtna tillstånd skall vara lika med 1, dvs:



$$P_1 + P_2 + \dots + P_i + \dots + P_\Omega = \sum_{i=1}^{\Omega} P_i = 1 \quad (2)$$

Sannolikheten för ett tillstånd kan direkt jämföras med kunskapen om det totala systemet. Vet vi med fullständig säkerhet att det totala systemet befinner sig i ett visst tillstånd gäller att sannolikheten för detta tillstånd är lika med 1. Sannolikheterna för alla andra tillstånd måste då vara lika med 0 enligt ekv. 2 ovan. Kunskapen om det totala systemet är därmed fullständig och entropin för det totala systemet är lika med 0 ( $S = 0$ ). Ordningen är fullständig. Om vi å andra sidan antar att vi inte vet något om det totala systemet då måste alla tillåtna tillstånd vara lika sannolika. Antalet tillåtna tillstånd är  $\Omega$  alltså blir sannolikheten för varje tillstånd enligt ekv. 2 lika med 1 dividerat med  $\Omega$ , dvs  $1/\Omega$ . Entropin för det totala systemet blir  $S = k \ln \Omega$ . Detta är det maximala värdet på entropin. Ordningen är fullständig.

En omvandling av energi och materia som sker under en begränsad tid leder oundvikligen till att ordning förbrukas, en förbrukning som ökar med hastigheten på omvandlingen. Låter man t ex en omvandling ske med låg hastighet blir förbrukningen mindre än om samma omvandling sker med hög hastighet. En omvändbar omvandling kallas för reversibel. En sådan omvandling är oändligt långsam men också förlustfri, dvs det sker ingen förbrukning av ordning under själva omvandlingen. Lokala förändringar av ordningen inom systemet kan naturligtvis ske men totalt sett förbrukas ingen ordning dvs ingen entropiproduktion. Men en reversibel omvandling blir ju härigenom aldrig färdig och saknar alltså en bestämd omvandlingsriktning. Reversibla omvandlingar existerar således endast i teorin. Verkliga omvandlingar är således aldrig reversibla, de är alltid irreversibla vilket innebär att de alltid sker med förluster — oordning skapas, totalt sett. Till motsats från reversibla omvandlingar har irreversibla omvandlingar en bestämd omvandlingsriktning. Förluster vid verkliga omvandlingar är alltså oundvikliga och de är också till en viss del nödvändiga. Varje önskad omvandling måste ske med förluster, men förlusterna kan begränsas. Ett sätt att begränsa förlusterna är, som jag redan nämnt, att begränsa hastigheten på omvandlingen. Det finns många andra sätt t ex att välja den minst förlustbringande — dvs mest effektiva — omvandlingsmetoden. Detta kommer jag att ta upp senare i samband med effektivitet och verkningsgrad.

Begreppet entropi är ett mått på bristen på ordning. Därigenom får begreppet en negativ betydelse. Man kan definiera motsatsen till entropi negativ entropi eller negentropi ( $-S$ ). Negentropi blir därigenom ett direkt mått på ordning, och negentropin har en positiv betydelse — negentropi är

något vi bör bevara i varje process. Negentropin konsumeras då ordning konsumeras eller går förlorad.

## 2.2 Exergibegreppet

Hur skall man mäta ordningen i ett system eller flöde av energi? Inom energitekniken har länge framförts värdet av att kunna beräkna den användbara delen av energin, den del som kan utföra mekaniskt arbete.

År 1824 publicerade den franske ingenjören Sadi Carnot ett samband mellan värme  $Q$  och arbete  $E$ ,

$$E = \frac{T - T_0}{T} Q \quad (3)$$

där  $T$  är värmets temperatur (Kelvin) och  $T_0$  omgivningens temperatur. Det är således endast en del av värmets energi som kan omvandlas i arbete, vilket bestäms av temperaturerna för värmets energi och omgivningen. Carnot var den förste att ge ett mått på värmets fysiska värde eller dess ordning. Senare resulterade detta i formuleringen av termodynamikens andra lag. J. Willard Gibbs var den förste att teckna det generella uttrycket för arbete redan år 1873.

“We will first observe that an expression of the form

$$-\varepsilon + T\eta - P\omega + M_1m_1 + M_2m_2 \dots + M_nm_n$$

denotes the work obtainable by the formation (by a reversible process) of a body of which  $\varepsilon$ ,  $\eta$ ,  $\omega$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ , ...  $m_n$  are the energy, entropy, volume, and the quantities of the components, within a medium having the pressure  $P$ , the temperature  $T$ , and the potentials  $M_1$ ,  $M_2$ , ...  $M_n$ . (The medium is supposed so large that its properties are not sensibly altered in any part by the formation of the body.)”

Detta nästan självklara konstaterande ger en liten känsla för den föreställningsvärld som dessa vetenskapsmän verkade i. I slutet på detta avsnitt kommer jag att redovisa min egen tolkning av termerna i detta uttryck för arbete.

Det kom att dröja ända till 1953 innan Z. Rant föreslog att detta begrepp skulle benämnas exergi istället för bl a “teknisk arbetsförmåga” (ty. technische Arbeitsfähigkeit).

“Aus diesen Forderungen geht hervor, daß „ie“ die zweckmäßigste Nachsilbe sein wird. Da es sich bei dem untersuchten Begriff um eine Arbeit handelt, muß als Stammsilbe (als genus proximum) das griechische Wort erg (on) hierfür erscheinen. Nun ist noch die richtige Vorsilbe zu wählen, die die spezifische Eigenart, die differentia specifica, hervorhebt. Hierfür gilt die Forderung, daß der neue Begriff die Arbeit bezeichnen soll, die aus einem System herausgeholt werden

kann. „Aus“ heißt auf Griechisch „ek“ vor Konsonanten bzw. „ex“ vor Vokalen.

Damit lautet der neue Begriff Exergie: er erfüllt praktiskt alle aufgestellten Forderungen, und der Buchstabe x unterscheidet ihn klar vom verwandten Begriff der Energie, so daß trotz der Analogie in der Wortbildung jede Verwechslung ausgeschlossen bleibt. Der Ausdruck kann in jede germanische, romanische oder slawische Sprache eingeführt werden, er lautet z. B. auf deutsch Exergie, auf englisch exergy, auf französisch exergie, auf spanisch exergia, auf italienisch essergia und auf slawisch eksergija.”

På svenska blir det naturligtvis exergi (g uttalas som i energi).

Den fullständiga definitionen av exergi gavs av H. D. Baehr, 1965:

“Exergi är den i alla andra energiformer omvandlingsbara delen av energin” (Die Exergie ist der unbeschränkt, d. h. in jede andere Energiform umwandelbare Teil der Energie.)

Dessa fyra arbeten utgör således i princip en tillräcklig definition av exergibegreppet. Några publikationer som dock förtjänas att nämnas är ett temanummer av den internationella tidskriften “Energy – The International Journal” {Penner 1980}, Ahern {1980}, Edgerton {1982}, Gaggioli {1980} och {1983}, Moran {1982}, Kotas {1986} samt Szargut et al. {1988}. Richard Gaggioli uttrycker exergibegreppets betydelse på följande sätt {1980}:

“The concept of exergy is crucial not only to efficiency studies but also to cost accounting and economic analyses. Costs should reflect value, since the value is not in energy but in exergy, assignment of cost to energy leads to misappropriations, which are common and often gross. Using exergy content as a basis for cost accounting is important to management for pricing products and for their evaluation of profits. It is also useful to engineering for operating and design decisions, including design optimization.

Thus, exergy is the only rational basis for evaluating: fuels and resources, process, device, and system efficiencies, dissipations and their costs, and the value and cost of systems outputs.”

Exergin hos ett system i en viss omgivning är således den mängd arbete som maximalt kan utvinnas ur systemet i denna omgivning. Exempel på system är en fast kropp, en gasmassa, t ex luftmassan i ett uppvärmt hus i en vintrig omgivning, eller en viss kvantitet bränsle, t ex bensinen i tanken på en bil. Begreppet arbete skall här endast ses som exempel på en fullständigt ordnad energiform, dvs med entropin lika med noll — minimal oordning eller maximal ordning. Det är endast den nyttiga eller ordnade delen av energin som kan omvandlas till alla andra energiformer.

Baehrs definition är uppenbart mycket generell, och kan utsträckas från att inte bara gälla energi utan även materia. Denna utsträckning kommer senare att visa sig vara helt befogad. Som exempel på omvandling av materieförmer kan nämnas ett vanligt batteri. Genom kemiska reaktioner omvandlas

materien från en form till en annan och exergi i form av elektrisk ström kan tas ut. I ett laddat batteri har alltså materien ett större exergiinnehåll — är mer ordnad — än i ett oladdat batteri.

I app. A visas bl a att exergibegreppet i sig innesluter andra termodynamiska begrepp som Gibbs fria energi, Helmholtz fria energi och entalpin. Många är de namn som under årens lopp använts istället för exergi: “essergy”, “availability”, “available work”. Allvarligare är dock att många använder ordet energi när de menar exergi.

Exergi är ett mått på hur mycket ett system avviker från jämvikt med omgivningen. Exergin  $E$  för ett system i en omgivning kan uttryckas som

$$E = T_0(S_{\text{eq}}^{\text{tot}} - S^{\text{tot}}) \quad (4)$$

där  $T_0$  är omgivningens temperatur,  $S_{\text{eq}}^{\text{tot}}$  är oordningen (entropin) för det totala systemet, dvs system plus omgivning, då systemet är i jämvikt med omgivningen (“eq” står för jämvikt) och  $S^{\text{tot}}$  är oordningen (entropin) för det totala systemet vid en aktuell avvikelse från jämvikt. I app. A visas också att detta uttryck för exergin följer av definitionen på exergi enligt ovan. Ekvation 4 är således ekvivalent med Baehrs definition ovan. Exergin är ett jämförbart mått på ordning dvs fysikaliska värdet av ett system i form av hur stor mängd arbete man kan utvinna ur systemet i dess omgivning.

Genom att använda termodynamiska samband kan andra uttryck för exergin härledas (se app. A, ekv. A.9):

$$E = U + p_0V - T_0S - \sum_{i=1}^n \mu_{i0}N_i \quad (5)$$

där  $U$ ,  $V$ ,  $S$ , och  $N_i$  betecknar extensiva storheter för systemet, dvs som beror av systemets storlek, inre energi, volym, entropi och antalet molekyler av olika kemiska ämnen och  $p_0$ ,  $T_0$ ,  $\mu_{i0}$  betecknar intensiva storheter för omgivningen, dvs oberoende av systemets storlek, tryck, temperatur och kemisk potential<sup>†</sup> för ämne  $i$  i dess omgivningstillstånd, dvs i jämvikt med omgivningen.

Exergin för ett system anger ju hur mycket systemet avviker från omgivningen. Detta ser vi tydligare av ekv. 6 nedan. Då temperatur, tryck och kemisk potential är lika för systemet och omgivningen är exergin för systemet lika med noll. Vi ser också att exergin för systemet ökar då kontrasten, avvikelsen från omgivningen, ökar.

---

<sup>†</sup> Fysisk storhet som bl a hänger nära samman med koncentrationen av ett visst ämne.

$$E = S(T - T_0) - V(p - p_0) + \sum_{i=1}^n N_i(\mu_i - \mu_{i0}) \quad (6)$$

Ett mycket användbart uttryck för att beräkna exergin är följande:

$$E = U - U_{\text{eq}} + p_0(V - V_{\text{eq}}) - T_0(S - S_{\text{eq}}) - \sum_{i=1}^n \mu_{i0}(N_i - N_{i, \text{eq}}) \quad (7)$$

där högersidan endast innehåller enkelt mätbara storheter ("eq" står för jämvikt med omgivningen). Härledning ges i app. A. Det är således enkelt — utifrån termodynamiska data — att bestämma exergin för ett system i en given omgivning.

Exergiinnehållet i ett material<sup>‡</sup> kan beräknas med uttrycket (se app. B, ekv. B.4) :

$$E = \sum_{i=1}^n N_i(\mu_i^0 - \mu_{i0}^0) + \bar{R}T_0 \sum_{i=1}^n N_i \ln \frac{c_i}{c_{i0}} \quad (8)$$

där  $\mu_i^0$  är kemiska potentialen för ämne  $i$  relativt sitt referenstillstånd (ett tillstånd vartill alla värden på kemiska potentialen för ett visst ämne relateras) och  $c_i$  är koncentrationen av ämne  $i$ . Detta uttryck för exergin för det alltså möjligt att teoretiskt bestämma exergiinnehållet i varje typ av material. Exergiinnehållet i en given mängd av ett visst material kan ses som den mängd exergi det skulle åtgå för att ur den givna standardomgivningen framställa detta material genom reversibla processer.

$$E = U + p_0V - T_0S - \sum_{i=1}^n \mu_{i0}N_i \quad (5)$$

Låt oss nu återvända till Gibbs självklara konstaterande ovan och jämföra hans uttryck för arbete med ekv. 5. Vi ser att de är identiska bortsett från att vi använt olika beteckningar och att termerna två och tre bytt plats. Teckenskillnaden beror på att Gibbs anger arbetet för att skapa en kropp medan vi ser på arbetet som kan utvinnas då kroppen bryts ner. Den första termen,  $-ε$  eller  $U$ , står för den betraktade kroppens inre energi. Nästa term, nummer tre i Gibbs uttryck, anger kroppens yttre energi, som beror av att kroppen har en utsträckning — en volym  $V$  — i rummet med trycket  $p_0$ . Om en kropp skulle kollapsa till ingenting skulle alltså det tomrum den lämnar efter sig kunna omvandlas i arbete. Och omvänt åtgår det arbete att expandera en kropp — trycka undan omgivningen. Faktum är att det mesta arbete våra

<sup>‡</sup> Med ett material menar jag en bestämd sammansättning av materia.

bilmotorer utträttar är att trycka undan omgivningen, så att de varma avgaserna skall få plats — de var ju från början delvis bensin med betydligt mindre volym. Från dessa två termer — den inre och yttre energin — skall vi nu dra bort två termer som vardera anger graden av oordning. Den inre energin kan vara mer eller mindre ordnad, då värme tillförs en kropp ökar dess inre energi och exergivärdet av denna energi gavs av Carnot redan 1824, enligt ovan. Den exergi som på detta sätt går förlorad anges i tredje termen i ekv. 4 och andra termen i Gibbs uttryck. Denna term kan vi kalla exergi som omgivningsvärme eller oordnad rörelse och den är produkten av omgivningstemperaturen  $T_0$  och oordningen — entropin  $S$  för kroppen. Den del av den inre energin som alltså inte “när över” omgivningen måste vi alltså dra bort, den kan inte utträta något arbete. Den sista termen är en summa över produkten mellan kemiska potentialen — den kemiska reaktionskraften — för ämne  $i$  i omgivningen  $\mu_{i0}$  och mängden av varje ämne  $i$   $N_i$  i kroppen. Denna term, vilken påminner om den tidigare termen exergi som omgivningsvärme, kan kallas exergi som omgivningsämne eller “barlast”. Då ett material är bärare av exergi är det endast kontrasten — skillnaden från omgivningen som bär exergin, på samma sätt som ett fartyg endast kan bära en last utöver sin barlast. Ingen skulle bli rik på att transportera sand genom Sahara eller saltvatten över havet.

### 2.3 Exempel på exergibärare

I avsnitt 2.1 beskrev jag hur ett flöde av energi och/eller materia drivs fram genom att flödet hela tiden förlorar i kvalitet eller ordning. Kvaliteten beskrevs också som frånvaro av oordning eller entropi, dvs närvaro av ordning och brist på entropi eller negentropi. I avsnitt 2.2 definierades begreppet exergi. I detta avsnitt kommer jag nu att knyta samman de båda föregående avsnitten genom att istället betrakta energi- och/eller materialflöden som enbart bärare av exergi, s k exergibärare. Detta innebär således att vi inte behöver använda entropibegreppet i fortsättningen.

Kvaliteten hos en energiform kan anges som mängden ordning (negentropi) per energienhet för den aktuella energiformen. De renaste energiformerna är mekanisk och elektrisk energi för vilka gäller att ordningen är fullständig (negentropin är maximal). Energi i form av värme har lägre kvalitet. Kvaliteten avtar med sjunkande temperatur, då temperaturen är högre än omgivningen. Baehrs definition gör klart att begreppet exergi innefattar både de kvantitativa och kvalitativa egenskaperna hos energi.

Tabell 2.1 nedan ger en förteckning över några energiformer efter avtagande kvalitet från "extra prima" till "värdelös". Energiformens kvalitet anges genom ett index som uttrycker det ungefärliga exergiinnehållet i procent av energiinnehållet, vilket kan benämnas exergifaktorn. Exergifaktorn varierar från 100% för lägesenergi, rörelseenergi och elektrisk energi (vilka är rena energiformer som fullständigt kan transformeras till alla andra energiformer) till 0 för värmestrålningen från jorden. För värmeenergi varierar kvalitetsindex högst påtagligt, från 60% för het ånga till 0 för värmestrålning från jorden.

Tabell 2.1 Olika energiformers kvalitet

	ENERGIFORM	EXERGI/ENERGI (%)
<b>Extra prima</b>	Lägesenergi <sup>1</sup>	100
	Rörelseenergi <sup>2</sup>	100
	Elektrisk energi	100
<b>Prima</b>	Kärnenergi <sup>3</sup>	ca 95
	Solljus	93
	Kemisk energi <sup>4</sup>	omkring 100
	Het ånga	ca 60
	Fjärrvärme	ca 30
<b>Sekunda</b>	Spillvärme vid ca 20°C	ca 5
<b>Värdelös</b>	Värmestrålning från jorden	0

<sup>1</sup>t ex högt belägna vattenreservoarer

<sup>2</sup>t ex vattenfall

<sup>3</sup>energi i kärnbränsle

<sup>4</sup>t ex olja (värdet varierar kring 100% pga att energivärdet ofta inte relateras till omgivningens tillstånd)

Emellertid är inte bara de så kallade energibärarna som innehåller exergi. Ett system som har underskott på energi och som avviker från omgivningen innehåller exergi, t ex ett isblock vid rumstemperatur. Då isen smälter tas värme från omgivningen. (Däriegenom representerar isen ett negativt energiinnehåll, trots att den ju innehåller arbete!) Men genom att använda en värmemaskin kan skillnaden i temperatur mellan den kalla isen och omgivningen utnyttjas för att utvinna arbete. Isen är däriegenom i princip en tänkbar källa för exergi. Analogt kan ett vakuum utnyttjas för att utvinna arbete, en lufttom behållare i en omgivning av luft vid normalt tryck innehåller därför exergi.

Analogt med energins kvalitet kan kvaliteten — ordningen — hos en materialform anges som mängden exergi (per mängdenhet) för den aktuella materialformen. Den tekniskt renaste materialformen är material som består

av endast ett ämne för vilket gäller att entropin är nära noll. Utspädda och blandade ämnen har högre entropi och därmed lägre kvalitet. Kvaliteten avtar med graden av utspädning eller blandning. En koncentrerad fyndighet av mineral har ett högt exerginnehåll, bryts fyndigheten och sprids ut i omgivningen sjunker exerginnehållet. För biologiska material gäller istället en inre ordning som innebär högsta kvalitet trots att ämnena tycks vara blandade. Men blandningen är bara skenbar, den är välordnad och på intet sätt slumpvis! Faktum är att atomerna i en blomma är långt mer ordnade än i den renaste metall. Kanske är denna ordning en förutsättning för liv, en form av ordning som naturvetenskapen saknar uttryck för. I tabell 2.2 nedan ges en förteckning över olika materialformer efter avtagande kvalitet. Någon gradering i olika grupper som i fallet med energiformer i tabell 2.1 är här svårare att göra. Det finns i alla fall en klar skillnad mellan den övre delen av tabellen som kan betraktas som "extra prima" och "prima" och den nedre delen som kan betraktas som "sekunda" och "värdelös".

Tabell 2.2 Olika materialformers kvalitet

MATERIALFORM	KVALITETSINDEX (%)
Biologiskt material t ex en blomma	100
Grundämne i ordnad form <sup>1</sup>	100
Grundämne som handelsvara <sup>2</sup>	nära 100
Blandade grundämnen <sup>3</sup>	omkring 90
Rik mineralförekomst <sup>4</sup>	50 - 90
Malm	omkring 50
Fattig mineralförekomst <sup>5</sup>	20 - 50
Mineral löst i berggrunden och havet	nära 0

<sup>1</sup>t ex kol som diamant

<sup>2</sup>t ex järn, guld eller bly

<sup>3</sup>t ex stål, legeringar eller plast

<sup>4</sup>t ex myrmalm eller havsnoduler

<sup>5</sup>t ex bauxit

Materialformens kvalitet anges genom ett index som uttrycker det ungefärliga exerginnehållet dvs mängden "grundämne i ordnad form" i procent av materialmängden. Definitionen av kvalitetsindex är här analog med definitionen av kvalitetsindex för energiformerna i tabell 2.1 ovan. Där gällde ju att kvalitetsindex var mängden "extra prima energi" — den fullständigt omvandlingsbara delen av energin — i procent av den aktuella energiformen. Exergin för material är alltså mängden "grundämne i ordnad form" som man kan utvinna ur ett system i sin omgivning. Ur en given materialmängd kan alltså endast den del som ges av exerginnehållet förädlas till ren form förutsatt att ingen yttre exergiförbrukning sker. Vid beräkning av exerginnehållet för den aktuella materialformen används ekv. 7 ovan.



Eftersom inte exergin “känner skillnad på” om den är i form av “extra prima energi” eller “grundämne i ordnad form” finns här en klar koppling mellan energi och material<sup>†</sup>. Vi kan alltså — i teorin — byta extra prima energi mot lika mycket exergi i form av grundämne i ordnad form. Det är detta man gör då man anrikar och förädlar en mineralförekomst till ett rent material. Man växlar så att säga exergi i form av energi mot exergi i form av material.

Från tabell 2.2 ser vi att kvalitetsindex varierar från 100 för absolut rena och välordnade material som diamant till nära 0 för ämnen som är jämt utspridda i marken eller fullständigt lösta i havsvatten. Värdet på kvalitetsindex bestäms av i vilken omgivning exergin beräknas. I tabell 2.2 har beräkningen av exergiinnehållet i de olika materialformerna gjorts med jordens medelsammansättning av material som omgivning. Detta betyder att sådana material som är vanliga på jorden betingar ett lågt exergivärde. En analogi kan göras med energiformer från tabell 2.1 där ju jordsken eller värmestrålning från jorden — som är så vanligt att vi inte ens ser det — betraktas som värdelös.

Exergirika material som kemiskt koncentrerade ämnen kan i praktiken utnyttjas i kemoelektriska celler av koncentrationstyp — sk osmos. Vid en flodmynning rinner bokstavligen det exergirika sötvattnet ut i havet. Genom en kontrollerad blandningsprocess skulle arbete kunna utvinnas då det söta flodvattnet blandas med salt havsvatten. En uppskattning ger vid handen att Göta älvs utlopp i Kattegatt motsvaras av ett mer än 100 meter högt vattenfall, se avsn 4.1 och app. G. Detta kan tänkas bli en viktig exergikälla i framtiden om man kan lösa miljöhänsynen i samband härmed. (Exergiinnehållet i sötvatten belyses också av det faktum att enorma energimängder åtgår för att avsalta havsvatten.) Det är också denna exergi som gör att växterna klarar sig utan skelett. Exergiinnehållet i koncentrerade fyndigheter av mineral kommer att behandlas ytterligare i avsn 3.5 och app. B.

## 2.4 Global och lokal standardomgivning

Exergin för ett system är bestämd relativt systemets omgivning. Det är därför viktigt att det upprättas konventioner om referensomgivningar. En global standardomgivning kan utgöras av en standardatmosfär, ett standard-

---

<sup>†</sup> Einsteins relation mellan energi och materia ( $E = mc^2$ , energin är lika med massan gånger ljushastigheten i kvadrat) är en annan mer fundamental relation mellan energi och materia.

hav vid havsyta<sup>‡</sup> och en standardberggrund där standardtillstånden bestäms av en lämplig geofysisk medelsammansättningen. Vid exergianalys av handelsvaror och då exergi används inom naturvetenskapen är ett standardtillstånd eller referenstillstånd nödvändigt. Detta är egentligen lika självklart som trafikregler eller hastighetsmätaren i en bil.

Temperatur- och tryckförhållandena varierar mycket över jordytan. Den kemiska sammansättningen för vatten i sjöar och floder avviker mycket från havet. Markens och berggrundens sammansättning varierar också mycket över landytan och på havsbotten. Det är därför nödvändigt att definiera lokala standarder för exergin. Ett talande exempel för detta är energianvändningen — exergikonsumtionen — vid husuppvärmning. Genom att anpassa byggnadstekniken till det rådande klimatet kan exergikonsumtionen för uppvärmning hållas nere. Relationen mellan globalt och lokalt relaterad exergi för ett system ges i app. A.

Man bör även diskutera i vilken grad lokala standarder skall vara medelvärden över tiden eller tillåtas variera med årstider eller dygnet. Uppenbarligen spelar årstidsvariationen roll för husuppvärmningen. En konsekvens av att en lokal standard används är att det lokala exerginnehållet för ett system varierar då systemet transporteras mellan olika omgivningar. Så kan t ex ett flöde av energi och/eller material förändra sitt exerginnehåll då det passerar mellan olika omgivningar. Kontrasten mellan exempelvis ett isblock och dess omgivning på Grönland eller i tropiska Afrika blir vitt skilda. Denna variation kan även relateras till förändringarna av det ekonomiska värdet för ett system. Ett isblock är t ex värdelöst på Grönland, men kan vara värdefullt i tropiska Afrika.

## 2.5 Exergi och information

I detta avsnitt kommer jag att behandla information i tekniska och biologiska system. Information är ett begrepp som ofta förekommer i samhällsdebatten, men oftast utan att dess egentliga betydelse framgår. I naturvetenskaplig mening är information och exergi samma sak. Exergi är ett mått på hur mycket ett system avviker från sitt jämviktstillstånd med omgivningen, se ekv. 6 ovan. Ju mer ett system avviker från jämvikt desto mer information krävs för att beskriva det och desto större blir dess kapacitet att bära information. Exergi och information eller informationskapacitet är därför

---

<sup>‡</sup> Vid beräkning av gravitationsexergi (lägesenergi och tidvattenenergi) gäller medelvattennivån vid havsytan som en generell standard.

vetenskapligt kopplade till varandra. Detta är av fundamental betydelse och diskuteras ytterligare i app. D. Relationen mellan storheten exergi  $E$  i enheten J och information  $I$  i enheten b (bit) är

$$E = k' T_0 I \quad (9)$$

där  $T_0$  är omgivningstemperaturen i enheten K (Kelvin) och  $k' = k \ln 2 \approx 1.0 \times 10^{-23}$  [J/K] ( $k = 1.38 \times 10^{-23}$  [J/K] kallas Boltzmanns konstant) har rollen som fundamental konstant.

Såsom exempel kan nämnas att nettoinflödet av informationskapacitet till jorden från solen per sekund är ungefär, se app. E,

$$1.2 \times 10^{17} \left( \frac{1}{290} - \frac{1}{5800} \right) \approx 4 \times 10^{37} \text{ [bitar/s]} \quad (10)$$

Av detta omsätter mänskligheten endast en bråkdel av ca  $5 \times 10^{13}$  bitar. Förhållandet mellan utnyttjad och tillgänglig informationskapacitet blir  $10^{-24}$ . Samma förhållande för energiomsättning blir ca  $3 \times 10^{-5}$ . Det outnyttjade informationsflödet från solen är alltså enormt. Vårt samhälle är således mycket underutvecklat i detta avseende och en del av förklaringen till detta följer nedan.

Information måste lagras och transporteras med hjälp av metoder som är så säkra som möjligt. För att uppnå detta använder man övertydliga (reducenta) koder och vid kopiering tillåts extra exergiförbrukning för att göra processen mer enkelriktad (irreversibel). Säkerheten i överföringen ökas således på bekostnad av effektiviteten genom en större "friktion". Jämför med att starta bilen i en uppførsbacke med hjälp av handbromsen och en slirande koppling. Risken att glida bakåt minskar då man bromsar och gasar samtidigt — rörelsen blir mer enkelriktad genom en större friktion.

Vid vardagskommunikation av information är energianvändningen ofta onödigt stor. Därför blir förhållandet mellan exergiåtgång och förmedlad informationsmängd högt vilket medför att endast en liten del av exergin, eller den tillgängliga informationskapaciteten i exergin, används. Som nämnts tidigare används därför endast en liten del av den till jorden instrålade informationskapaciteten enligt ekv. 10 ovan. Om man tar i beaktande omvandlingen av exergi i solljuset till ordnade strukturer av växterna inser man dock att trots att endast en liten del av det primära informationsinflödet tas tillvara blir det ändå enorma mängder. Solljuset finns hel enkelt i ett sådant överflöd att naturen kan tillåtas "slösa" med exergin. Ur naturens perspektiv är detta naturligtvis inget slöseri utan resultatet av årmiljarders

experimenterande för att få fram de mest effektiva och konkurrenskraftiga livsformerna, som för närvarande kröns av människan.

Det är viktigt att jämföra effektiviteten vid informationsöverföring mellan olika system. Ett mått på effektivitet är mängden exergi omsatt per bit överförd information. Detta har dimensionen temperatur. Ju lägre denna temperatur är desto mer effektiv är informationsöverföringen, men om denna temperatur blir för låg kan värmerörelser i omgivningen förstöra informationen, se tab. 2.3. {Tribus & McIrvine 1971}

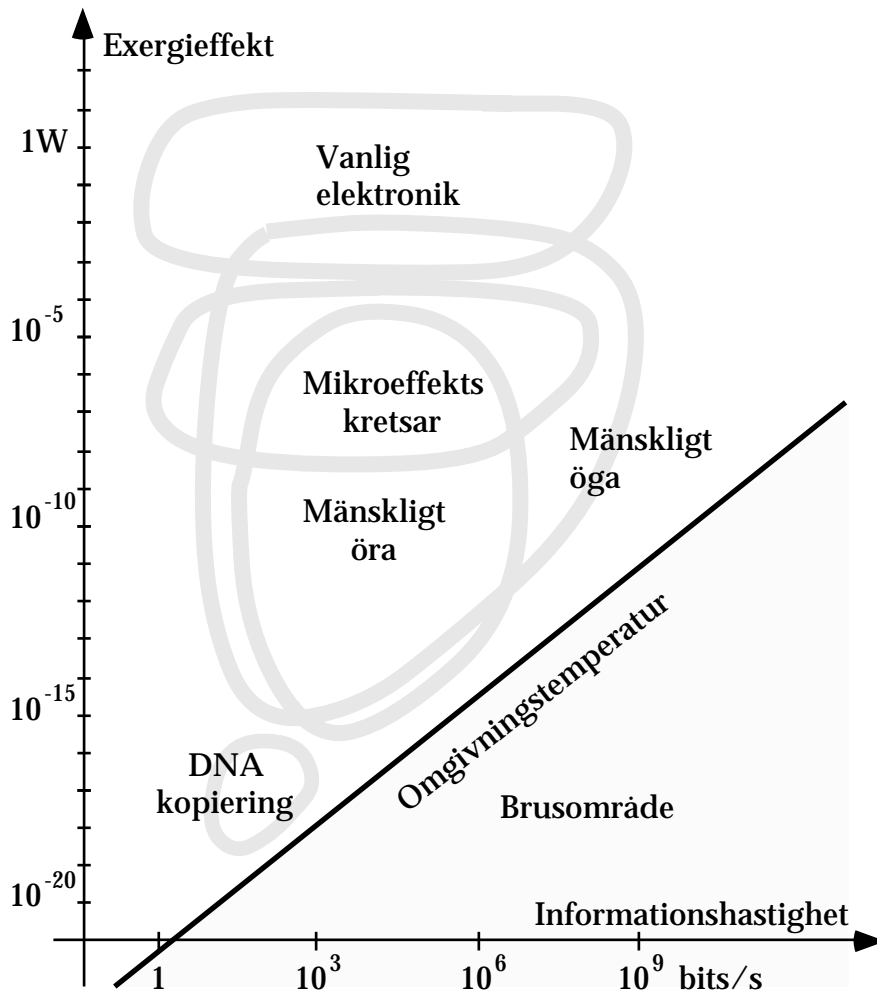
Känsligheten hos näthinnan är sådan att det mänskliga ögat fungerar nära den kvantmekaniska gränsen. Det räcker faktiskt med endast ett fåtal ljuskvanta för att registreras av ögat. Lagring av information i ett datorminne har en karakteristisk temperatur av omkring  $10^5$  gånger temperaturen för seende. Men å andra sidan är tidsupplösningen och därmed hastigheten ca  $10^5$  gånger snabbare än för ögat. Slutsatsen blir att levande varelser och datorer var för sig är effektiva i sin användning av exergi för att motta och överföra information. DNA kopieringen i en cell är trots allt många gånger effektivare än något tekniskt system.

Tabell 2.3 Effektiviteten för olika system för informationsförmedling

	$\frac{E}{I}$ [J/bit]	$T_{\text{överföring}}$ [K]
Elektrisk skrivmaskin	1	$10^{23}$
Radiomottagare	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{19}$
Television	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{18}$
Datorminne	$10^{-12}$	$10^{11}$
Mänskligt tal	$10^{-16}$	$10^7$
Mänskligt öra	$10^{-17}$	$10^6$
Mänskligt öga	$5 \times 10^{-18}$	$5 \times 10^5$
DNA-replikation i en cell	$4.6 \times 10^{-21}$	460

Elektroniska kretsar, människans öra och öga och kopiering av DNA är inritade i ett logaritmiskt informationshastighet-effektdiagram i fig. 2.2 nedan. Det minimala effektbehovet i sk datachips kan beräknas. En elementär process i en dator, som en logisk operation, kräver en exergi som ligger långt över den omgivande brusnivån på rumstemperaturen, dvs  $kT_0 \approx 3 \times 10^{-21}$  J. Detta är nödvändigt för att undvika störningar från termiska fluktuationer som orsakar brus i elektroniska kretsar. Denna nedre gräns är markerad med en rät linje i fig. 2.2. Vanligen måste alltså en process ligga långt över denna linje för att inte allvarligt störas av termiska fluktuationer. DNA-replikatio-

nen ligger förvånande nära denna kritiska nivå. Vissa steg i överföringen ligger faktiskt under denna nivå. Istället för att satsa all exergi på själva kopieringen, som i tekniska system — datorer, har naturen valt en exergisnål kopiering som istället kontrolleras. Dessutom är fel vid kopiering nödvändiga för den ekologiska evolutionen, dvs för att nya oväntade organismer skall se dagens ljus. Dessa kan ju visa sig vara mer livskraftiga än sina föregångare, dvs ett steg framåt för utvecklingen. Örat och ögat täcker stora områden i diagrammet, flera tiopotenser. Elektronik är troligen den ur exergi-ekonomiska synpunkt bästa teknik vi känner idag. Men, som figuren visar, livet i sig själv är många gånger mer effektivt i sin användning av exergi för att förmedla information.



Figur 2.2 Effektiviteten hos olika informationsöverförare

Biologiska strukturer fortlever genom energidissipation — att förskingra energins inre ordning — eller exergikonsumtion. Exergin i solljuset används för att bygga upp komplicerade organiska strukturer. Informationen som ligger lagrad i de genetiska koderna som DNA-molekyler styr tillverknings-

processen. Denna information överförs från generation till generation. Då biologiskt material t ex trä eller cellulosa används som konstruktionsmaterial är det dessa strukturer och denna information som man drar nytta av.

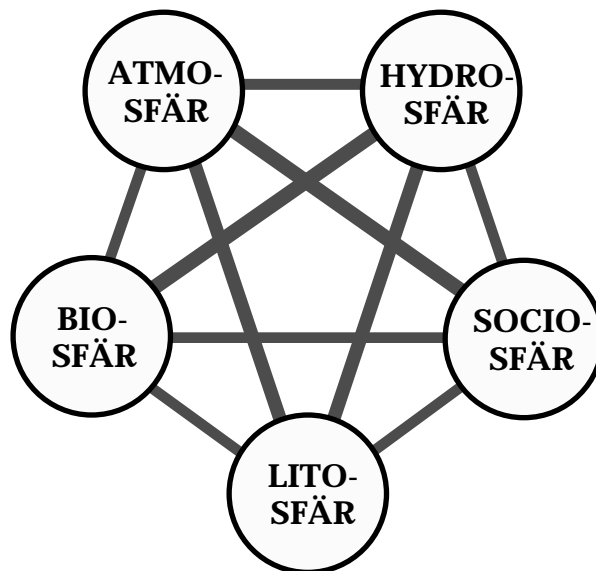
Både exergi och information utgör mått på avvikelsen från en referensomgivning. Exergin är det maximala arbete men kan utvinna ur en sådan avvikelse men arbete krävs oftast också för att upprätthålla och överföra information. Sambandet mellan exergi och information är därför djupt förankrad.

Antag att vi befinner oss på ett party och upptäcker en bekant på avstånd. För att nå fram med ett budskap till vår bekant måste du “synas över mängden”. Antingen genom att ställa dig på tå och vinka med handen — om du är lång — eller genom att höja rösten över partybruset. Detta “kostar” således en minsta ansträngning som bestäms av den omgivande brusnivån, vilken anges i fig. 2.2 som det skuggade nedre högra fältet — brusområde.

### 3. HELHETSSYN

#### 3.1 Exergi — ett naturvetenskapligt begrepp

På jordens yta pågår ett oerhört komplext samspel mellan olika system. Energi, materia och information strömmar i ständiga flöden genom olika system på jordens yta. Inom många vetenskaper t ex hydrologi, klimatologi, oceanografi och ekologi är man sysselsatta med att försöka beskriva och förstå delar av dessa system och flöden. Det vore en övermäktig uppgift att fullständigt försöka förstå hur alla dessa system och flöden av energi, materia och information samverkar. I en enkel modell kan man dela upp jordytans alla system i fem olika sfärer, se figur 3.1.

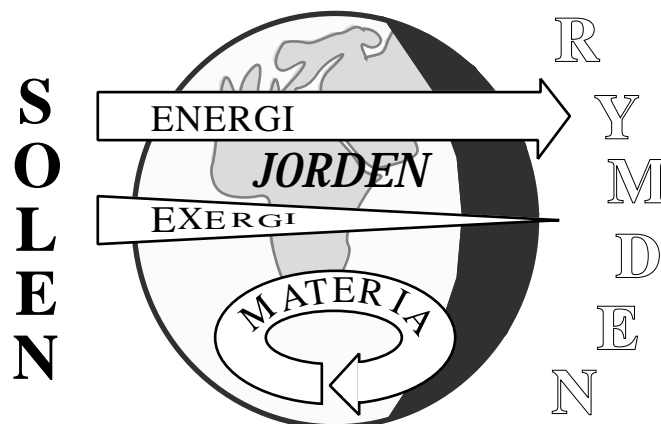


Figur 3.1 Fem sfärer i inbördes växelverkan.

Atmosfären är det lufthav som omger jorden. Den består i huvudsak av kväve  $N_2$ , ca 78%, och syre  $O_2$ , ca 21%, plus små mängder av andra gaser som argon Ar, koldioxid  $CO_2$ , vattenånga  $H_2O$  och ozon  $O_3$ . Atmosfären hålls kvar kring jorden genom sin tyngdkraft, som bestäms av jordens massa. Hydrosfären består av allt vatten som går i ständiga kretslopp på jorden. Vatten är det enda ämne på jorden som samtidigt kan existera i de tre aggregationstillstånden fast, flytande och gas. Vi kan ju ha både is, vatten och vattenånga vid samma temperatur på jorden. Dessutom verkar vatten som en enorm värmereservoar och utjämnar därigenom lokala temperaturvariationer på jorden samt temperaturvariationerna över dygnet. Litosfären är den fasta berggrunden med alla sina mineraler och salter. Genom erosionen löses dessa ämnen ut och ingår sedan bl a som viktiga näringsalter

i vatten. Biosfären är summan av allt levande på jorden och sociosfären är summan av alla de system som den moderna människan skapat och styr.

Växter och djur ryms alltså inom biosfären men byggnader och maskiner tillhör sociosfären. Endast den sk primitiva människan eller naturfolken och hennes redskap tillhör biosfären. Alla dessa sfärer påverkar varandra. Några exempel på resultaten av den inbördes påverkan är: luftens syre, sediment, fossila energilagrar som kol och olja och halten av DDT, PCB och kadmium i biosfären. Atmosfärens innehåll av syre kommer av växternas produktion av syrgas under flera miljarder år i biosfären, vilka också skapat de lager av fossil vi finner i litosfären. Före växterna fanns således inget syre i atmosfären. Den mänskliga aktiviteten i sociosfären har blivit upphov till de naturfrämmande och giftiga ämnena vi numera finner överallt, vilka framförallt skadar biosfären. En fortsatt förbränning av fossil som kol, olja och gas leder till att atmosfären succesivt återgår mot sin ursprungliga sammansättning, dvs för dagens liv giftiga ämnen. Att elda upp allt fossil skulle innebära att förhållandena vreds tillbaks till år noll, dvs inget liv på jorden. Jordens livskraft är alltså ett resultat av att dessa lager och kontraster upprätthålls — istället för att brytas ner genom att utnyttjas som sk naturresurser. Benämningen naturresurser är således helt felaktig och är resultatet av den inkompetens som råder på detta område. I figuren illustreras påverkan mellan de olika sfärerna som linjer mellan dem. Kommunikationen dem emellan sker med hjälp av exergi. Exergi förbrukas i de ständiga strömmar av energi, materia och information som fortgår inom och mellan dessa sfärer. Drivkällan för hela systemet är exergi som "pumpas" in utifrån genom en kosmisk kontrast. Förhållandet illustreras schematiskt i fig. 3.2 nedan.



Figur 3.2 Flödet av energi och materia på jorden drivs av kontrasten mellan solen och rymden.

Exergi från kontrasten solen–rymden driver flöden av energi, materia och information genom sfärerna på jordens yta. Vi ser av figuren att det råder en



balans mellan in- och utflödet av energi. Medeltemperaturen på jordytan bestäms bland annat av hur mycket energi som strålar in mot jorden. Energi i form av solljus når jorden, omsätts och strömmar ut i världsrymden som värmestrålning. Flödet av materia är däremot bundet till jorden. Materien transporteras i otaliga kretslopp genom system på jorden. Omloppstiderna för dessa kretslopp av material kan variera från bråkdelar av sekunder till årmilliarder. Exempel på delar av sådana kretslopp kan vara nervimpulser i en cell och mineralbrytning i ett samhälle. Informationen på jordytan omsätts framförallt av det levande systemet. Dess samlade informationsmängd får den modernaste superdator att framstå som rena skämtet. Till och med den enklaste bakterie är långt mer avancerad än hela mänsklighetens samlade datorkraft. Begreppet information<sup>†</sup> behandlade jag i avsn. 2.5.

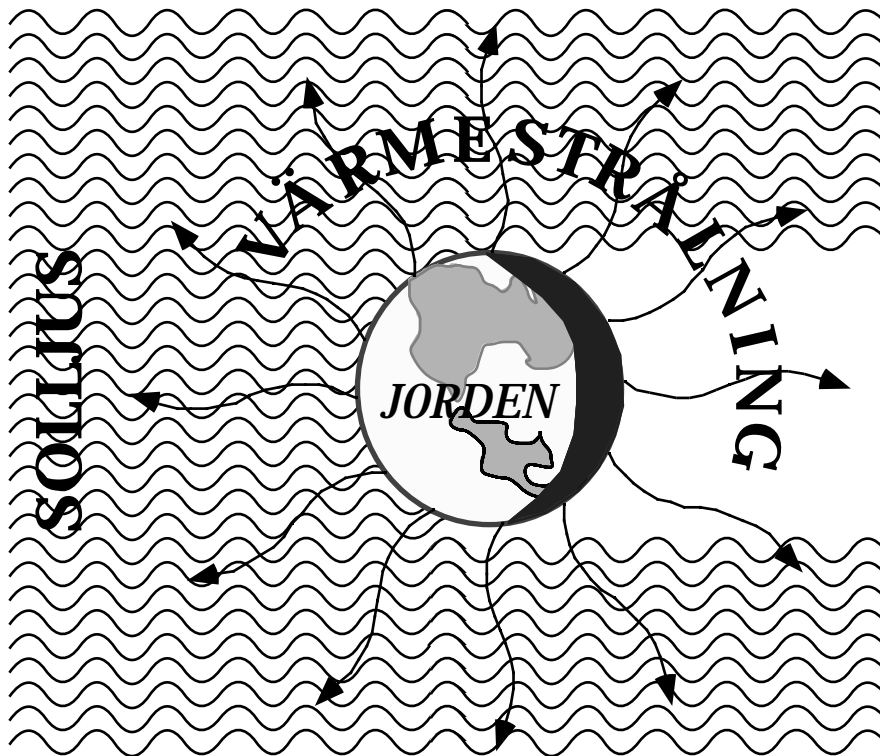
Den exergi som når jorden förbrukas så småningom, men på vägen hinner den driva bl a vatten/vindsystemet och livet på jorden. Bara vattencirkulationen i hydrosfären tar ca 7 000 ggr så mycket exergi som vad människan omsätter i biosfären. Totalt förångas ca 450 000 km<sup>3</sup> vatten varje år för att stiga upp, bilda moln och åter falla ner mot jordytan. Komplexa strukturer, rika på exergi och kapabla till reproduktion formas via fotosyntesen i biosfären. De gröna växterna tar upp exergin ur solljusen genom fotosyntesen och omvandlar den till kemisk exergi i material, som sedan passerar genom olika näringskedjor. I varje länk förbrukas exergi. Den sista länken utgörs av nedbrytande mikroorganismer. Den exergi som inte dessa organismer kan utnyttja bildar istället torv eller sediment som med tiden lagras till olja och kol. Bestånd i form av levande och dött organiskt material på jorden representerar alltså olika former av lagrad exergi. En bråkdel av solexergin blir också information i det jättelika informationssystem som representeras av det ekologiska systemet på jordytan, som i sin tur utgör grunden för den ekologiska evolution vilken vi själva är en produkt av.

Jordens energibalans (och exergitillskott) kan illustreras med hjälp av fig. 3.3 nedan. Exergirikt solljus når jorden. En stor del reflekteras direkt och deltar därför inte i omvandlingar på jordytan. Det är detta ljus som skapar de vackra blåskimrande, men pga luftföroreningarna alltmer gråaktiga, bilderna vi vant oss att se från rymden. I figuren har denna exergi utelämnats och det infallande solljuset är alltså nettoflödet av solljus som når själva jordytan. Energin i detta flöde omvandlas på jorden och lämnar sedan jorden som värmestrålning — jordsken. Exergin i solljuset förbrukas däremot på jorden. I

---

<sup>†</sup> Med information menas här fysisk information eller informationskapacitet, vilket inte får förväxlas med det vi i dagligt tal menar med information.

figuren illustreras detta som en förändring av våglängden mellan det infallande solljuset och den utstrålade värmestrålningen. Den infallande solstrålningen är relativt kortvågig och välordnad — och har därigenom hög kvalitet. Den utstrålade värmestrålningen är däremot långvågig och oordnad — och är därmed av låg kvalitet.



Figur 3.3 Kortvågigt solljus in och långvågig värmestrålning ut.

Hela jordklotet kan således betraktas som en väldig maskin som tar emot exergi från solen. Härigenom drivs alla flöden av energi, materia och information fram genom och inom system på jordens yta, och liv kan skapas och upprätthållas. Drivkraften är hela tiden skillnaden i kvalitet mellan ingående synligt solljus och utgående osynlig värmestrålning. (Anledningen till att vi ser just detta ljus är helt enkelt att naturen gjorde ögat så effektivt som möjligt, dvs utnyttja solljuset så mycket som möjligt och ge färg åt allt vackert som omger oss.)

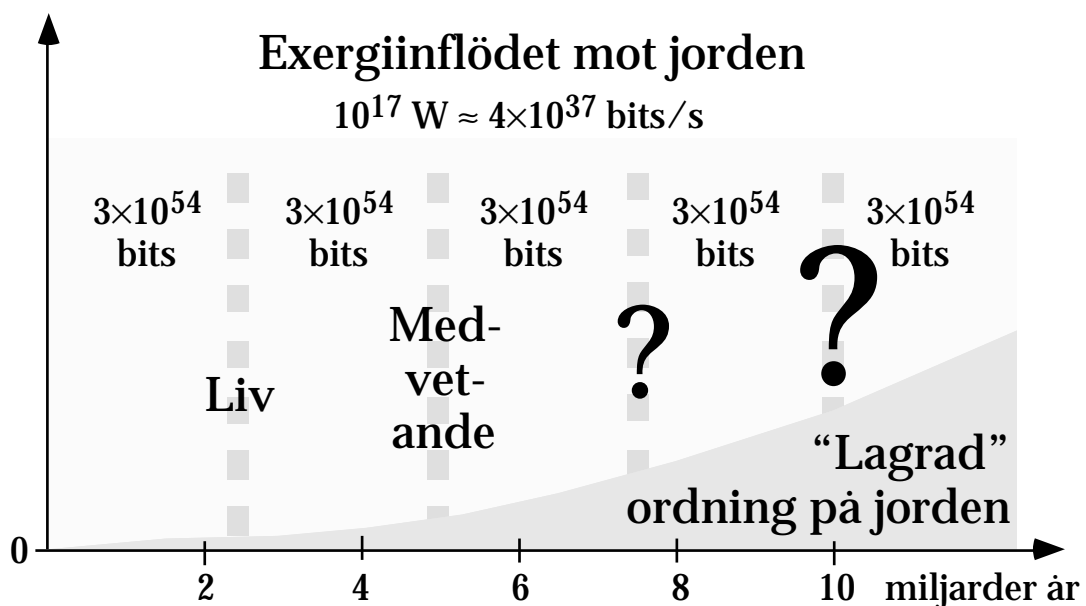
För att styra en process, säg en ämnesomsättande sk metabolisk process i en levande organism, längs en bestämd riktning krävs termodynamisk irreversibilitet. En ökad säkerhet kan uppnås genom en ökad irreveribilitet. Detta fås till priset av en ökad energidissipation, dvs en ökad exergikonsumtion. En styrning av en process i en bestämd riktning måste härigenom

förbruka exergi. Livsprocesser och exergi hör således nära samman, vilket bl a studerats av Prigogine m fl {1971}.

I Odums diagrambeskrivning av ekologiska system {Odum 1971, Odum & Odum 1976} spelar energi en fundamental roll vilken torde uppfyllas bättre med hjälp av exergi.

Metaboliska processer som äger rum i levande organismer och ekologiska system har sina likheter i mänskliga samhällen. Erfarenhet i beskrivning av naturliga system bör därför vara till stor hjälp vid beskrivning av mänskliga samhällen.

Figur 3.4 illustrerar hur exergiinflödet mot jorden under årmiljarderna skapat ordning på jordytan först i form av liv och senare i form av medvetande, vilket vi människor representerar. Den samlade exergin intill dess liv uppstod kan uppskattas till ca  $3 \times 10^{54}$  bits eller ca  $8 \times 10^{33}$  J, vilket är astronomiska tal som vi saknar möjlighet att föreställa oss. Men resultatet är inte svårt att uppskatta — liv på jorden. Efter ytterligare 2-3 miljarder år uppstår så människan eller snarare mänskligheten eftersom en isolerad människa inte är mycket mer intelligent än många djur. Skillnaden ligger i att människan kan organisera sin intelligens genom att kommunicera med andra människor både i samtiden och genom historien — det är detta som framförallt skiljer oss från djuren. Vi kan säga att medvetandet står för organiserat liv genom vår kultur i form av ett medvetet samarbete. Föreställningen att “ensam är stark” är en inget annat än en myt, snarare gäller att “ensam är död”, åtminstone som människa.



Figur 3.4 Exergiinflödet mot jorden skapar ordning som föder liv, medvetande, ...

Denna skapelseprocess mot högre grad av liv fortgår så länge livsprocesserna består och vart den leder vet ingen. Att svara på frågan vad kommer efter ytterligare några miljarder år är lika svårt som att begära av de första livsorganismerna att förutse människans entré på jorden. Att det blir livsformer som är vida överlägsna den mänskliga organismen är dock ställt utom tvivel. Förutsatt förstås att inte människan förstör denna livskraft. Mänskligheten har således ett stort ansvar för att upprätthålla ett livskraftigt samhälle för framtiden.

Låt oss spekulera lite kring mänsklighetens informationskapacitet. Anta att den mänskliga hjärnan rymmer ca  $10^{10}$  nervceller (neuroner) som vardera är förbunda med ca 100 andra nervceller, då motsvara hjärnan en informationsmängd av ca  $10^{12}$  bits  $\approx$  100 Gbyte (1 byte = 8 bits). Eftersom en människa inte kan betraktas som en isolerad företeelse utan måste ses som del i ett mycket större sammanhang — samhället eller kulturen — haltar dock denna betraktelse. Låt oss vidare anta att varje människa kan betraktas som en självständig tänkande varelse då skulle hela mänskligheten idag motsvara ca  $5 \times 10^9 \times 10^{12}$  byte =  $5 \times 10^{21}$  byte. Om alla människor skulle kunna stå i ständig kontakt med varandra samtidigt skulle varje människa ha kontakt med  $5 \times 10^9$  andra människor och den totala informationsmängden skulle då motsvara ca  $3 \times 10^{31}$  byte. Kanske är det en sådan global superintelligens som kommer att skapas i framtiden? — Ingen vet. Kanske har den nyligen lanserade Gaia-hypotesen något med detta att göra {Lovelock 1988}?

### 3.2 Exergi hos naturresurser

Exergibegreppet innebär att vi kan kvantifiera alla typer av resurser, som används i samhället, i en fysisk enhet, p s s som ekonomerna använder monetära mått för allt från spik till lycka.

De s k energiressurserna har ett exerginnehåll som nära svarar mot deras energiinnehåll antingen de är av mekanisk art (vatten- och vindkraft), som genom definitionen på exergi är till ett hundra procent nyttigt arbete, eller de är av höggradig kemisk art (bränslen), för vilka det vanligen uppmätta förbränningsvärmets (entalpin) nära överensstämmer med exergivärdet. Vid omvandling över värme inom kraftindustrin görs stora exergiförluster, se vidare under rubriken "Skillnad mellan energi- och exergibetraktelse" nedan. Ett sätt att komma förbi detta är att utveckla bränsleceller som kan omvandla kemisk exergi direkt till elektricitet eller helt enkelt genom att hushålla bättre med exergin.

Vid bestämningen av exergi i kärnbränsle finns flera oklarheter genom bl a strålningförluster genom neutrinostrålning och avsaknad av ett väldefinierat sluttillstånd. Detta påverkar dock i praktiken inte värdet på kärnexergin eftersom dessa oklarheter endast har en marginell betydelse. Det viktigaste i detta sammanhang är dock insikten om hur mycket, eller snarare hur lite, av den tillgängliga exergin i kärnbränslet som utnyttjas i dagens kärnkraftverk av sk lättvattentyp. I avs. 3.13 framgår att endast 1/60-del av den tillgängliga exergin utnyttjas, vilket bl a förklarar problemen med kärnkraftsavfallet eftersom 59/60 av exergin återstår och därför gör avfallet mycket farligt. Om all exergi utnyttjats hade avfallet varit helt harmlöst för naturen, vilket gäller allt avfall. Avfall utan exergi är nämligen inget avfall utan något som har samma sammansättning som vår naturliga omgivning, dvs en del av naturen.

Som jag nämnt tidigare är även andra resurser än energiresurser bärare av exergi. En koncentrerad malmförekomst står i kontrast mot en omgivning av normal kemisk sammansättning. Exergin i denna kontrast bevaras då fyndigheten bryts. Då malmen anrikas och genom kemisk reduktion omvandlas till metall ökar exerginnehållet, se app. B. Tillskottet i exergi kommer från de bränslen och reduktionsmedel som använts vid processen. Exergin i metallen bevaras ända tills den sprids ut eller rostar bort i naturen.

Vanliga ämnen i jordskorpan eller i havsvattnet såsom sand, salt eller vatten har liten exergi. De utgör också sällan några resursproblem. I ett torrt område kan vatten vara en värdefull resurs och i den lokala referensomgivningen har det då också mycket exergi, t ex vatten i öknen.

Biologiska material har exergi av två slag, kemisk och strukturell, av vilka den kemiska kvantitativt dominerar. Då vi eldar upp ett bränsle omvandlas den kemiska exergin till värme med en exergiförlust som är avhängig av bl a förbränningstemperaturen. Hög temperatur ger hög exergi och således låg exergiförlust och vice versa.

Den strukturella exergin finns i de former som det levande intar, både makroskopiskt och mikroskopiskt. Vi nyttjar detta t ex då vi använder trä till konstruktioner och bomull som fiber. Då vi använder biologiskt material som föda tillvaratas både den kemiska exergin — som bränsle — och mikrostrukturen hos aminosyror — som byggnadsmaterial. När strukturen i ett biologiskt material har konsumerats finns ändå den mesta exergin kvar och kan tillvaratas som värme vid förbränning.

En viktig slutsats av diskussionen ovan är således att alla slag av naturresurser kan mätas i exergi, som därigenom ger ett uttryck både för möjligheten att utvinna mekaniskt arbete och strukturen eller

informationen hos systemet. Vad den mäter är det alternativa fysiska arbete som skulle krävas om alla ämnen i processen istället — under fullständig reversibilitet — togs ur standardomgivningen. Exergin för en metallbit anger alltså hur mycket exergi — arbete — som idealt skulle krävas för att skapa denna metallbit ur den omgivande berggrunden. När vi inser detta kommer säkert naturen att slippa att ta emot så mycket avfall från sociosfären — avfall som alltså lika gärna kan betraktas som råvaror.

### 3.3 Världshandel och exergiflöden

Internationell handel kan ses som ett materialflöde, mätbart i termer av exergi. Tillämpningen av exergibegreppet på världshandeln bör kasta nytt ljus över internationell handel genom att bidra med ett alternativt perspektiv på de vanligen använda monetära enheterna.

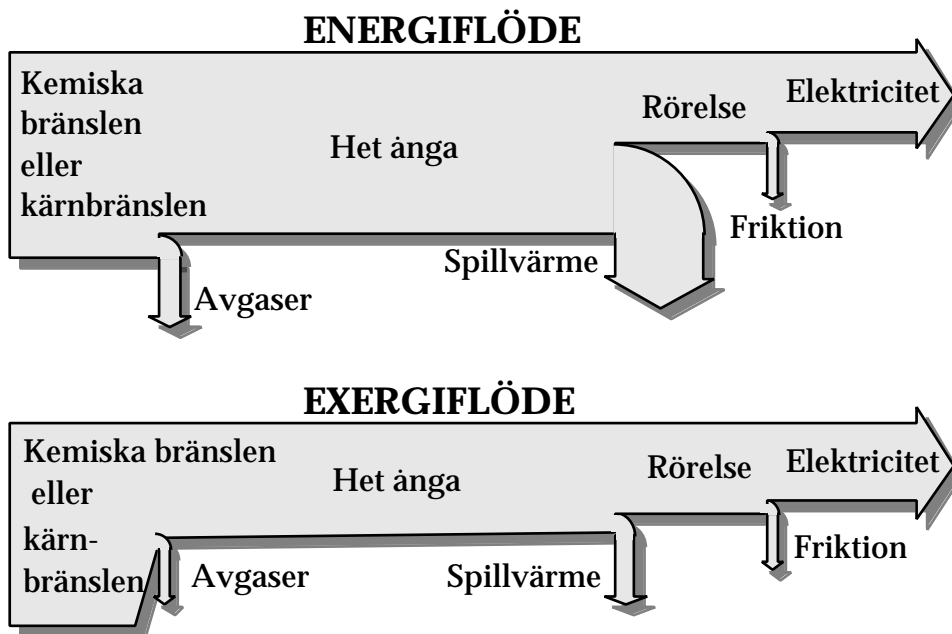
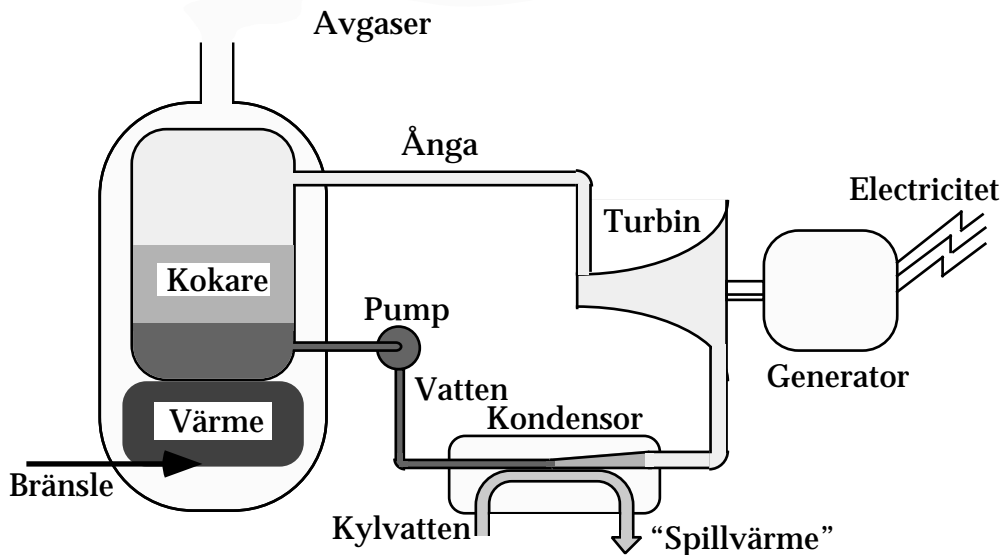
En intressant aspekt är att exergibehovet vid en bestämd produktion varierar från plats, beroende på ändringen av den lokala referensomgivningen. Vi exporterar t ex mineraler från områden med rik förekomst och importerar varor vi saknar. Detta är alltså en av orsakerna till handel. En analys av detta kan vara till hjälp vid en undersökning av i vilken grad handel är orsakad av olikheter i naturtillgångar, i lokal referensomgivning eller i strukturen hos produktionssystemet.

För några år sedan presenterades i den tekniska litteraturen långt gångna planer på att transportera ett isberg från Antarktis till ett land med brist på vatten. Idéen var helt enkelt att ta en resurs från ett område på jorden där det saknade exergi — is på Antarktis saknar värde — till ett område där samma resurs är en bristvara — is i Sahara är en sällsynthet med högt värde. Projektet har aldrig blivit av pga stora praktiska svårigheter att genomföras. På liknande sätt kan många av världshandelns varor i princip förklaras av att de är rikliga på ett ställe men sällsynta på ett annat. Idag importerar t ex Japan stora mängder sand ifrån Korea och själva importerar vi olja från de som har gott om det.

### 3.4 Skillnad mellan exergi- och energibetraktelser

Exergibegreppet används idag av forskare och ingenjörer inom energiområdet vid effektivisering av energisystem som omsätter många olika energi-

former, se tab. 2.1 ovan. Vi ser här att för het ånga, fjärrvärme och spillvärme blir kvalitetsindex dvs andelen exergi av energiinnehållet allt lägre. Detta måste den som arbetar med dessa olika energiformer ta hänsyn till.



Figur 3.5 Energi- och exergiflödet genom ett värmekraftverk sk kondenskraftverk.

Låt oss se närmare på hur ett värmekraftverk fungerar, se fig. 3.5 ovan, som är en schematisk skiss över ett kondenskraftverk där olja eller kol förbränns. Det kan också vara ett kärnkraftverk där man istället "eldar" med uran. Den härigenom bildade värmen används för att koka vatten under högt tryck i en stor panna, i princip en stor tryckkokare. Den bildade vattenånga leds till en turbin som omvandlar ångtrycket till rotation i

turbinaxeln — mekanisk rörelse eller arbete. I andra änden av axeln sitter en elektrisk generator som drivs runt och alstrar elektricitet. Elektriciteten förs sedan ut till konsumenten för att omvandlas vidare, ibland tillbaks till värme.

Då vattenångan passerat genom turbinen har den överfört exergi till den elektriska generatoren. Efter turbinen kyls ångan i en kondensator till vatten och återförs till pannan. Härigenom kan volymen bringas ner så mycket att arbetet för att trycka in vattnet i pannan är försumbart jämfört med det arbete som ångflödet ur pannan representerar. Kylningen är också nödvändig för att optimera kraftöverföringen i turbinen, ty genom att ångan kondenseras efter turbinen kan denna arbeta över maximal tryckskillnad.

Den kemiska energin i olja och kol eller kärnenergin i uran omvandlas alltså till elektrisk energi, men detta görs inte utan förluster. Förlusterna är stora, i ett oljekondenskraftverk 60 procent och i ett kärnkraftverk 70 procent. Räknar man på det totala systemet med beredning av energiråvarorna och efterbehandling av avfallsprodukter samt bygg- och rivningskostnader för kraftverket blir förlusterna ännu större. Vart tar då förlusterna i själva kraftverket vägen?

I den nedre delen av fig. 3.5 finns två flödesdiagram, så kallade Sankey-diagram. I det övre är bredden på flödet proportionell mot energiinnehållet för respektive energiform, i det undre är bredden proportionell mot exergiinnehållet. Det första vi konstaterar är att bredden på in- och utflödena i båda diagrammen är nästan lika breda. Detta beror på att både in- och utflödena är energiformer av mycket hög kvalitet. Kvalitetsindex för de aktuella energiformerna ligger mellan 90 och 100 procent, se tab. 2.1 ovan. För elektrisk energi gäller att exergiinnehållet är lika stort som energiinnehållet. Förlusterna i de båda diagrammen är dock helt olika. Först har vi förluster i pannan. Här omvandlas bränslet till värme. I ett olje- eller kolkraftverk får vi då en flamtemperatur på över tusen grader ( $^{\circ}\text{C}$ ). I ett kärnkraftverk har vi en temperatur på bränslestavarna av endast några hundra grader ( $^{\circ}\text{C}$ ). Värmen överförs sedan genom värmväxlare till vatten som kokar. Trycket är högt vilket gör att vattnet inte kokar förrän vid flera hundra grader. Genom pannans väggar och röranslutningar leds och strålar värme ut till omgivningen och går förlorad. Värme förs också ut med rökgaserna för att hålla skorstenen i ett olje- och kolkraftverk kondensfri. Tillsammans utgör dessa pannförluster endast några få procent av den totala energiomsättningen. I exergidiagrammet ser vi dock att det händer något dramatiskt. Mer än en tredjedel av exergin går förlorad redan här. Vi ser också att den försvinner i själva processen, dvs bara en mycket liten del av den förlorade



exergin lämnar kraftverket. Exergiflödet bara smalnar av. Det skapas entropi — oordning — i stora mängder. Detta beror på att vattenångan som lämnar pannan har lägre temperatur och tryck än vad som är fysikaliskt möjligt. Orsaken är materialbegränsningar hos de ingående komponenterna i kraftverket, framför allt i turbinen. I ett kärnkraftverk förloras i detta led av processen mer än hälften av exergin.

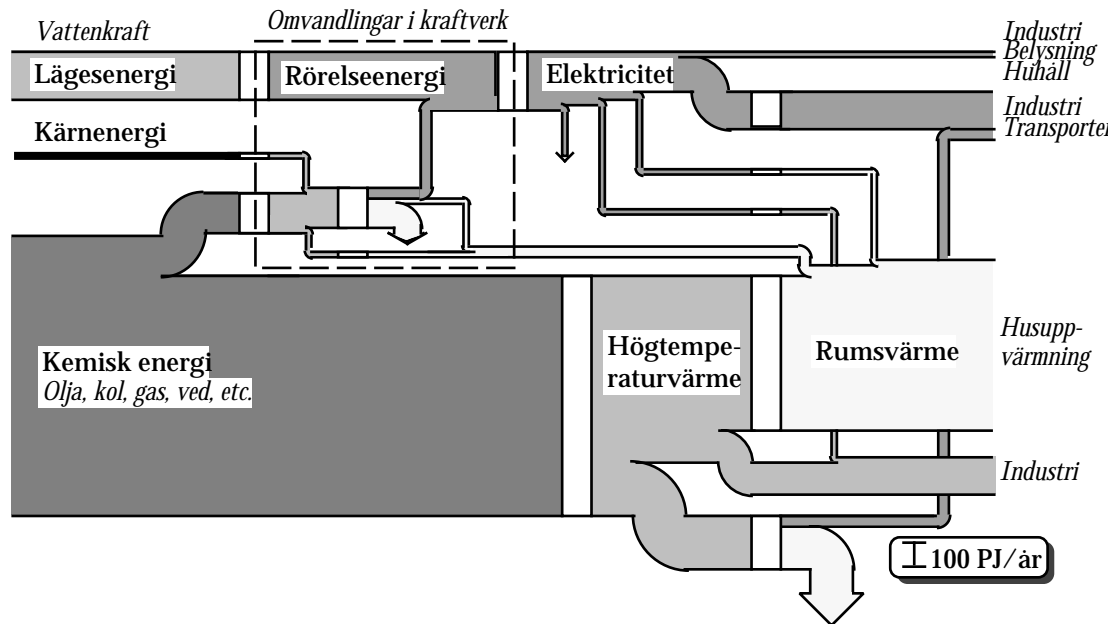
Bredden på flödena av termisk energi och termisk exergi är som vi ser av fig. 3.5 den största skillnaden mellan energi- och exergiflödet. Detta ger också en helt annan bild av förlusternas uppkomst i processen. I ett exergiflödesdiagram är förlusterna störst i pannan men i ett energiflödesdiagram är förlusterna störst i kondensorn. I kondensorn förloras en stor del av energin genom spillvärme i kylvattnet. Spillvärme är dock värme av mycket låg temperatur och därför energi av mycket låg kvalitet. I exergidiagrammet framgår detta tydligt. Exerginnehållet i spillvärmets är endast några få procent av energinnehållet. För att göra det klarare kan vi tänka oss följande. Antag att vi vill ta tillvara all den termiska energin i spillvärmets som mekanisk energi och sedan vidare till elektrisk energi. Av spillvärmets skulle vi då maximalt kunna omvandla den del av energin som svarar mot exergin, enligt det nedre flödet. Och som förlust vid en sådan omvandling skulle vi få spillvärme av omgivningens temperatur dvs med exergin noll. Med bästa vilja i världen kan vi inte åstadkomma mer elektrisk energi ur den termiska energin än vad som bestäms av den termiska exergin. Allt enligt termodynamikens andra lag.

Vid övergången från mekanisk energi till elektrisk energi, som båda har exerginnehållet 100 procent, sker små förluster genom bl a friktion. Dessa blir i stort sett lika små i båda diagrammen. En del av friktionsförlusterna utgörs av mekanisk "bearbetning" dvs förslitning av axlar och lager.

Slutsatsen vi kan dra av diagrammen blir alltså att enligt energiflödet förefaller de största förlusterna ske i kondensorn men enligt exergiflödet ser vi att de största förlusterna sker redan i pannan. Från exergiflödet ser vi också att denna förlust i pannan inte går att fånga upp, exergin försvinner ju i själva processen. Den är en nödvändig "inre förlust" i processen och beror av tekniska begränsningar i dagens teknik. Man arbetar således mycket på att utveckla bättre teknik t ex keramiska turbiner som medger temperaturer på närmare 1500°C.

Låt oss nu betrakta ett större system, energiomsättningen i ett helt samhälle. Inför de omfattande energiutredningarna under mitten på 70-talet {SOU 1974:64, 65 och 72-76} gjordes en rad sammanställningar av statistiska data rörande utvinning, distribution och användning av energi i Sverige. En

del av dessa har sedan åskådliggjorts i form av flödesdiagram. Ett sådant diagram pryder framsidan på energiforskningsutredningens betänkanden. Det beskriver energiflödet genom det svenska samhället år 1971, se fig. 3.6. De olika energislagen illustreras med mönster (i originalet med färger) och nedåtriktade flöden anger förluster. Vattenkraften återfinns i den övre delen av diagrammet och bränslen som olja i den nedre. Bredden på flödena står i direkt proportion till energiinnehållet i respektive energiform.

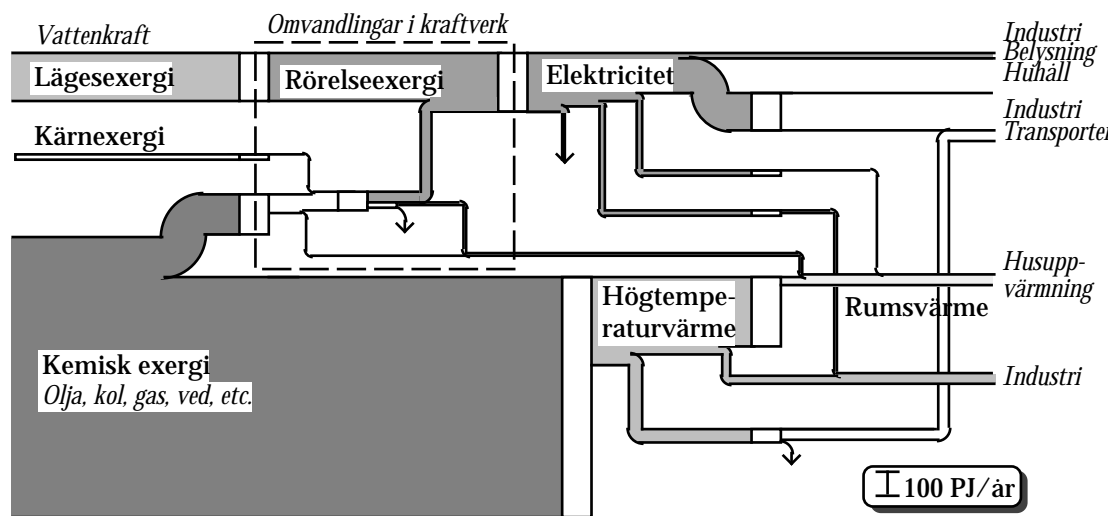


Figur 3.6 Energiflödet genom det svenska samhället år 1971.

För att vi enklare skall kunna jämföra detta diagram med motsvarande angett i exergi återfinns i exergiflödet på motstående sida, fig. 3.7.

Vattenkraften används för att generera elenergi. Lägesenergin i kraftverksdammen omvandlas till rörelseenergi som via en turbin och en elektrisk generator omvandlas till elektrisk energi. Kärnenergi och kemisk energi används också för att producera elektrisk energi. Denna omvandling sker i kondenskraftverk, som ovan, och kraftvärmeverk. I kraftvärmeverket tas även lågtemperaturvärme ut genom så kallat mottryck. All produktion av elektrisk energi sker således i sektorn "Omvandlingar i kraftverk". Den elektriska energin användes sedan direkt dels inom industrin t ex i elektriska stålugnar och vid elektrolys, dels till belysning och som hushållsström. Den största delen av elenergin användes som vi ser i diagrammet inom industrin för att driva maskiner dvs den elektriska energin omvandlas tillbaka till mekanisk energi. Allt större del av elenergin går till elvärme, dels lågtemperaturvärme i bostäder och högtemperaturvärme i industrin.

Omvandlingen av kemisk energi till rumsvärme via högtemperaturvärme dominerar helt diagrammet. Olja, kol, gas, avfall och ved förbränns i pannor för att producera värme. Den största delen av högtemperaturvärmets omvandlas sedan vidare via värmeväxlare till lågtemperaturvärme som används för uppvärmning. Ytterligare tillskott till uppvärmningen kommer från fjärrvärme och elvärme. En del av det bildade högtemperaturvärmets används inom industrin och där särskilt inom processindustrin (stålverk och pappers- och massaindustri). Inom stålindustrin används stora mängder kol och inom massaindustrin används stora mängder biprodukter som lutar. Återstoden av högtemperaturvärmets, som representerar värmets i en förbränningsmotor, går till transporter. Vid omvandling av bensin och olja i en bilmotor omvandlas 100% av den kemiska energin till högtemperaturvärme. Ungefär 20% av detta värme omvandlas sedan vidare till mekanisk energi i förbränningsmotorn. Nära hälften av denna energi går sedan förlorad genom friktion i transmissionen. Denna del finns dock ej med i diagrammet. Transporternas effektivitet är representerad genom förbränningsmotorns verkningsgrad och återfinns som den nedersta omvandlingen i diagrammet.



Figur 3.7 Exergiflödet genom det svenska samhället år 1971.

Vi ser att de samlade förlusterna i diagrammet är obetydliga. Inom sektorn "Omvandlingar i kraftverk" återfinns vi energiförlusten genom spillvärme från kärnkraftverk och oljekondenskraftverk. Vidare sker förlust av elektrisk energi genom ledningsförluster, ca 10% av den transporterade energin går härigenom förlorad. Totalt förloras ca 320 PJ (90 TWh). Med en total omsättning av ca 1700 PJ (460 TWh) förloras alltså ca 20% av den omvandlade energin.

Vi ser också att i varje omvandling har vi ett ett-till-ett-förhållande, dvs lika mycket energi in som ut ur omvandlingen. Energin är ju oförstörbar — termodynamikens första lag — så all energi måste finnas kvar efter en omvandling.

Man kan göra ett exergiflöde som illustrerar samma energisystem. Det ser ut ungefär som fig. 3.7 ovan. Bredden på flödena blir här proportionella mot exergin i respektive energiform. Enheten på flödena är densamma för både energi- och exergiflödena, dvs PJ/år. Skillnaden blir nu att bredden på flödena minskar radikalt vid vissa omvandlingar. Detta beror på att energins kvalitet minskar och därmed också exergin. Vid omvandling av kemisk exergi till högtemperaturvärme går över hälften av exergin förlorad. Detta beror på, som vi sett tidigare för ett värmekraftverk, att exergin i värme är mycket lägre än energin.

Vidare sker stora exergiförluster vid omvandling av högtemperaturvärme till lågtemperaturvärme, och även vid omvandling av elektricitet till hög eller lågtemperaturvärme. Eftersom exergin i högtemperaturvärmets inte utnyttjas då värmets faller i temperatur, dvs värmets omvandlas till lågtemperaturvärme, görs även här stora förluster. En värmeväxlare — en passiv energiomvandlare — kan inte utnyttja exergin då värme degraderas. Sålunda utnyttjas inte temperaturfallet i en vanlig oljepanna då en flamma med en temperatur av ca 1500°C används för att värma vatten till kanske 80°C. Elvärme innebär att ca 95% av exergin går förlorad vid omvandlingen från elektrisk energi till lågtemperaturvärme, dvs elvärmens har en exergiverkningsgrad på 5%. En värmepump (ett "ut- och invänt kylskåp") skulle kunna förbättra exergiverkningsgraden till över 30%, mer om detta nedan.

De största exergiförlusterna sker tydligen — ej oväntat — i samband med husuppvärmning. Behovet av exergi för uppvärmning är, som vi ser i högra delen av fig. 3.6 ganska måttligt och kan ytterligare minskas betydligt genom förbättrad värmeisolering och tillvaratagande av ventilationsvärmets. För att ytterligare minska exergiförlusterna vid uppvärmning bör man sedan använda antingen goda energiomvandlare som värmepumpen eller naturliga exergiflöden som solvärme.

Omvandlingseffektiviteten då kemisk energi/exergi omvandlas till mekanisk energi/exergi, är i stort sett densamma i både energi- och exergidiagrammen, eftersom dessa energiformer, enligt tab. 2.1, har ungefär samma exergivärde — omkring 100%.

Vi ser att förlusterna i exergidiagrammet är betydliga. Totalt förloras ca 1200 PJ (320 TWh) dvs 70% av den omvandlade exergin går förlorad.

I exergidiagrammet finns inget krav på ett-till-ett-förhållande mellan in- och utflöden i exergiomvandlingarna. Exergin är inte oförstörbar, den kan — och måste — förbrukas, men förbrukningen bör naturligtvis vara så låg som möjligt.

Genom att använda diagram som figur 3.6 för att beskriva exergiflöden i ett energisystem får man en klarare uppfattning om var man bör sätta in resurser för att bättre ta tillvara exergin och resurserna.

### 3.5 Exergi och andra resursmått

Resurser är de kända och åtkomliga delarna av naturresurserna dvs de ämnen i marken, vattnet och luften som kan utnyttjas. Då en resurs utnyttjas i samhället betecknas den ofta även som en råvara. Med resursmått menar jag de mått man traditionellt använder för att kvantifiera dessa flöden av resurser och råvaror.

Resurser indelas traditionellt i energiresurser och andra resurser. Energi-resursernas exergi ges av deras energi multiplicerat med det kvalitetsindex som gäller för den aktuella energiformen, se tab. 2.1 ovan. Energi-resurser mäts vanligen i energienheter dvs samma enhet som exergi. Andra resurser mäts vanligen i rent kvantitativa enheter som vikt, volym eller antal. Inom skogsbruket anges sålunda mängden skog i kubikmeter och inom jordbruket talar man om antal ton skördad gröda eller antal djur. Dessa mått är ofta valda av rent praktiska eller traditionella skäl.

Låt oss kalla en resurs som används i samhället för en vara. Statistik över varor baseras på varje varas kvantitet. Indelningen av varor sker enligt internationella normer i olika varugrupper, varuundergrupper eller varuposter. Statistiken åskådliggörs sedan i tabeller eller diagram enligt dessa varunormer.

Eftersom det i statistiken saknas en gemensam fysisk faktor mellan olika varor kan dessa inte åskådliggöras i enhetlig form som i diagrammet över olika energivaror i fig. 3.5 ovan. Det enda gemensamma mått som idag används för att kvantifiera varor är monetära mått, dvs ekonomiskt värde. Nackdelen med denna måttsättning är att en varas ekonomiska värde bland annat bestäms av tillverkningskostnaden och tillgång och efterfrågan. Samtidigt påverkar subventionering eller beskattning och diskontot — nedskrivningen av framtida värden — varors ekonomiska värde. Dessutom förekommer både spekulation och kriminalitet på den ekonomiska scenen. Detta medför att en varas ekonomiska värde kan variera utan att varan ändras

i fysisk mening. För att undgå detta måste ett värdebegrepp baseras på rent fysikaliska egenskaper hos varan. Detta är särskilt viktigt vid förvaltningen av samhälles resursbas, tillgången på fysiska resurser och livskraftig miljö. Denna bas kan man inte spekulera med på börsen.

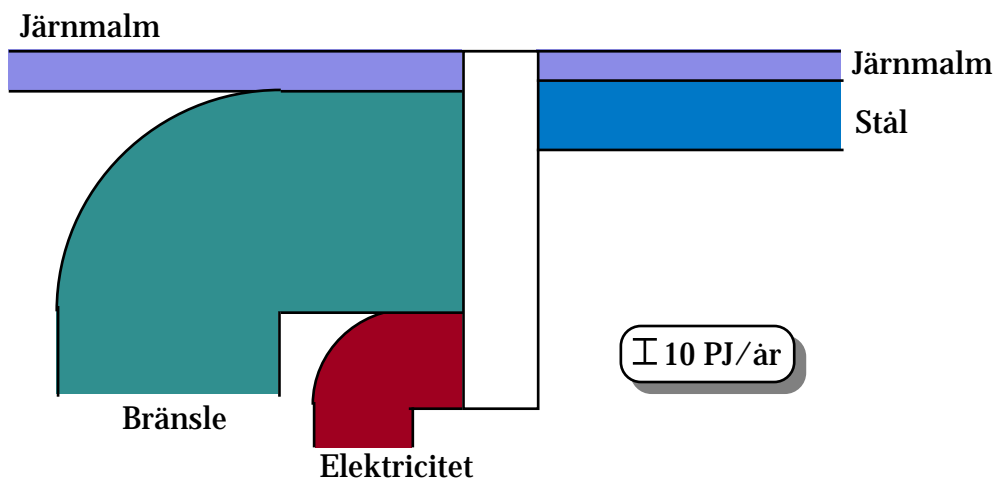
Att välja begreppet exergi som ett mått på varors fysiska värde faller sig naturligt. Exergi är ju definitionsmässigt ett mått på en varas fysiska värde relativt omgivningen. Exergin för en vara bestäms genom att varans mängd multipliceras med dess exergifaktor, som bestäms dels av varans kvalitet och dess omgivning. Enheten för en sådan kvalitetsfaktor blir då t ex J per kg eller J per m<sup>3</sup>. I app. B beräknas exergiinnehållet för den svenska omsättningen av järnmalm 1980. I fig. 3.8 nedan återfinns resultatet av denna beräkning. Vi ser här att enheten på alla flöden är PJ per år, dvs samma enhet som för energi- och exergidiagrammen i figurerna 3.6 och 3.7. Vi ser också att förlusterna är stora. För att producera den aktuella mängden malm och stål, ca 35 PJ (21.2 respektive 3.5 Mton) åtgår ca 114 PJ bränsle, el och malm. Härigenom blir "verkningsgraden" ca 31%. Mer om detta i avsn. 3.8, som handlar om effektivitetsbegrepp. Figur 3.8 illustrerar således ett exempel på hur exergi i form av energi, bränslen som kol, kan omvandlas till exergi i form av material. Vi "växlar" således exergi från en form till en annan. I princip kan hela samhällets metabolism — omsättning av energi och material — betraktas som en enda stor växlingsprocess mellan tillgängliga och önskade resurser.

En övergång till att även kvantifiera materialflöden i exergi består alltså bara i att beräkna exergifaktorerna för respektive material. Detta kan utgöra första delen av en utvidgad resursbudgetering och ett led i en integrering med den traditionella energibudgeteringen. En fördel med att övergå till att mäta resurser och råvaror i exergienheter är ju att de s k energiresurserna och energiråvarorna då anges i samma enhet som andra resurser och råvaror. En uppdelning mellan energiresurser och andra resurser och råvaror kan ofta vara godtycklig. Man kan exempelvis betrakta olja som en energiråvara men trä som ett material, en distinktion som inte är särskilt meningsfull, eftersom olja också kan användas för materialframställning och trä kan användas som bränsle. Det riktiga måste vara att betrakta dessa resurser tillsammans och begreppet exergi som resursmått är i detta sammanhang ett lämpligt resursmått. Detta illustreras ytterligare i diagrammet över den svenska exergiomsättningen i fig. 3.8 nedan.

Exergibegreppet anger endast en varas fysiska värde. De egenskaper som avgör detta är varans koncentration, kemiska sammansättning och mängd. Exergiinnehållet säger alltså ingenting om en varas övriga fysiska eller

biologiska egenskaper som elektrisk ledningförmåga, näringsvärde, giftighet eller dylikt. Varor betraktas endast som bärare av exergi, exergibärare.

Antag att vi betraktar en speciell egenskap som t ex elektrisk ledningsförmåga hos olika material. Då kan effektivitet i exergiomsättning — exergiverkningsgraden — då materialet används för sitt ändamål vara ett mått på materialets kvalitet. Ett material med dålig elektrisk ledningförmåga ger större exergiförluster än vad ett material med god elektrisk ledningsförmåga ger då de används som elektriska ledare. Material med god värmeisoleringsförmåga som används för att isolera hus blir på samma sätt exergieffektiva genom att de effektivt hindrar exergin i husvärmen att läcka ut. I avsn. 2.5 och i tab. 2.3 såg vi bland annat hur effektiviteten vid informationsöverföring varierar mellan olika system i termer av exergi per överförd informationsenhet.

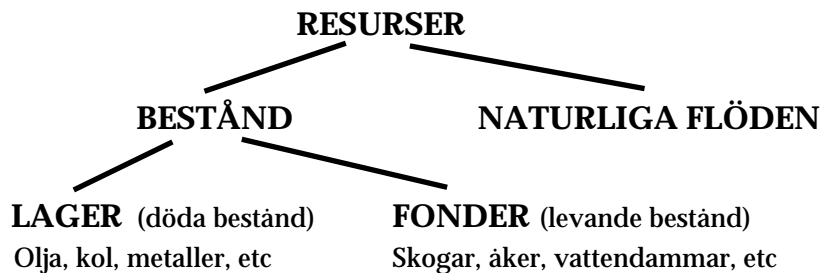


Figur 3.8 Den svenska järnmalmsomsättningen 1975.

Genom att välja exergi som resursmätt renodlas också betydelsen av begrepp som produktion och konsumtion. Ekonomerna talar gärna om oljeproduktion eller produktion av metaller, men sanningen är egentligen att mineralen konsumeras. Oljeproduktionen sker i naturen av naturen själv och är en del i den ekologiska evolution för att möjliggöra utvecklingen av liv på jorden. Genom att producera mineral som fossil, metaller och salter gömmer naturen undan dessa ämnen för biosfären, som härigenom avgiftas. Denna form av produktion är således lika central som fotosyntesen eller växternas produktion av biomassa ur solljus, vatten, koldioxid och näringsämnen. Växterna är de egentliga producenterna på jorden, alla övriga organismer inklusive människan ägnar sig åt konsumtion. Det enda undantagen kan möjligen vara ett naturenligt jord- och skogsbruk.

### 3.6 Flöden, lager och fonder

Naturresurser, som energi- och materialresurser, uppträder dels som flöden dels som bestånd, se fig. 3.9 nedan. Vi uppfattar solljus, vindar och floder som naturliga flöden. Ett naturligt flöde har visserligen en begränsad intensitet eller kapacitet, men är däremot varaktigt i tiden. Ett ekosystem, som en skog, utgör ett levande bestånd, en fond. Det byggs upp av det naturliga flödet av solljus, vatten, koldioxid och näringsämnen. Härigenom ger det upphov till ett flöde av nybildad biomassa av vilket en del, ett överskott, kan tas ut utan att ödelägga beståndet. Andra bestånd, som lager av olja, har helt andra egenskaper. Ett lager kan endast ge ett flöde samtidigt som det töms.



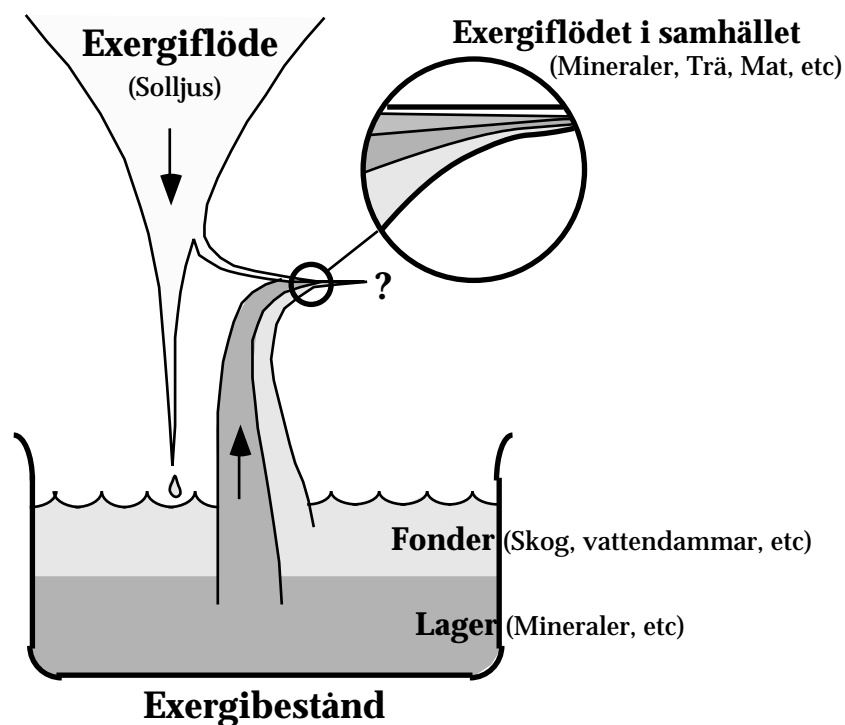
Figur 3.9 En klassificering av resurser.

Således är det viktigt att skilja mellan *naturliga flöden* och *bestånd*. Bestånd kan indelas i *döda bestånd* eller *lager* och *levande bestånd* eller *fonder*. (Naturliga flöden och flöden från fonder kallas ibland även för förnybara till skillnad mot lager, som ju är icke förnybara.) En fond eller ett levande bestånd är bestånd som utan att förbrukas omformar ett naturligt flöde på ett önskvärt sätt. En fond är alltså ett exergiomvandlande system. För ett jägar- och samlarfolk är skogen en fond som använder en liten del av det inflödande solljuset till att avkasta ett flöde av ätliga eller på annat sätt användbara växtdelar och av djur som kan fångas eller jagas. För ett jordbrukande folk är jordbruksmarken en motsvarande fond, vilken ger avsevärt högre avkastning men som till skillnad från skogen kräver ständig bearbetning. Det globala system som bildas av jordens atmosfär och hydrosfär är en fond som fångar in och för vidare solexergi. Detta levande bestånd fördelar också temperaturen jämnare över jordytan. Det fördelar också vattnet, och det har skyddande och renande förmåga. Därmed ger den förutsättningar för en annan fond, biosfären, att utforma flödet av solljus till



exergirikt biologiskt material. Vissa levande bestånd kan ge kontinuerlig avkastning, t ex ett vattenkraftverk, där man dämt upp floden i en damm. Andra bygger periodvis, exempelvis årligen, upp bestånd som kan skördas, t ex en åker. För vissa fonder t ex en skog kan perioden för denna återuppbyggnad vara ganska lång.

Skillnaden mellan lager och fonder beror således av tiden för reproduktion av beståndet. En fond reproduceras under några år, kanske upp till hundra år. Ett lager kan ta miljontals år att nybilda, en för människan nästan oändlig tid. För vissa lager som kärnbränsle sker ingen nybildning alls under vår sol. Lagren av olja och kol tillförs nytt material så långsamt att det knappast har praktiskt intresse. Torvmossor tillväxer också långsamt men ändå snabbt för att marken skall ha intresse som fond för att tillvarata solexergi. Malmer nybildas i samband med geologiska processer. Sjö- och myrmalm faller dock ut i en sådan takt att samma vattendrag ibland kan vittjas igen inom ett århundrade. Att utnyttja ett lager innebär också att idag främmande ämnen som koldioxid, svavel och radioaktiva ämnen frigörs i naturen som miljögifter. Detta är ofta en mer begränsande faktor än lagrets storlek, betänk växthuseffekten och ozonhålet över Antarktis.



Figur 3.10 Exergiflödet från solen och exergibestånden på jorden.

I fig. 3.10 ovan ser vi hur exergiflödet genom det mänskliga samhället upprätthålls. Den största delen av exergibehovet täcks genom ett uttag ur exergibestånden på jorden. Människan utnyttjar endast en liten del av det

naturliga exergiflödet från solen för t ex värme och elektricitet. I samhället minskar så exergin ytterligare. Vissa exergiflöden som flöden av malmer ökar dock sitt exergiinnehåll då de passerar genom samhället. Andra flöden minskar istället sitt exergiinnehåll så mycket mer att den totala exergin alltid minskar — termodynamikens andra lag. Vi skall senare se närmare på exergiomsättningen i ett samhälle.

Frågetecknet i figuren är i princip samma frågetecken som återfinns i fig. 3.4. Vad är det vi skapar genom all vår exergianvändning? En stor del går naturligtvis åt till att upprätthålla människors liv och välbefinnande, men mycket används också till motsatsen t ex inom militären och vapenindustrin och miljöförstörande verksamhet. Frågar är då: — Blir nettot positivt eller negativt, dvs skapar vi eller bryter vi ner ordning — exergi — på jordytan genom vårt agerande? Detta kan bara framtiden utvisa, vilken vi har ett stort ansvar för. Krig är exempel på den mest destruktiva verksamhet som människan företar sig — krig är anti-skapande — och motsatsen skulle således vara samförstånd eller kulturskapande, vilket ofta även blommar upp just under krig. Ofta som en kontrast och kanske direkt konsekvens av just den destruktions som kriget innebär. Ett globalt kärnvapenkrig skulle vara en av de mest destruktiva handlingar vi kan åstadkomma. Den pågående miljöförstörelsen kan också uppfattas som ett krig riktat mot naturen, vilket också skapar destruktions och död. Då detta inte motsvaras av något skapande, annat än kortvarigt, blir resultatet att ordning på jorden bryts ner. Denna diskussion ansluter i allt väsentligt med de frågor som behandlats i avsn. 2.5 och 3.1 och illustrerar den generella betydelsen av exergibegreppet.

### 3.7 Effektivitetsbegrepp

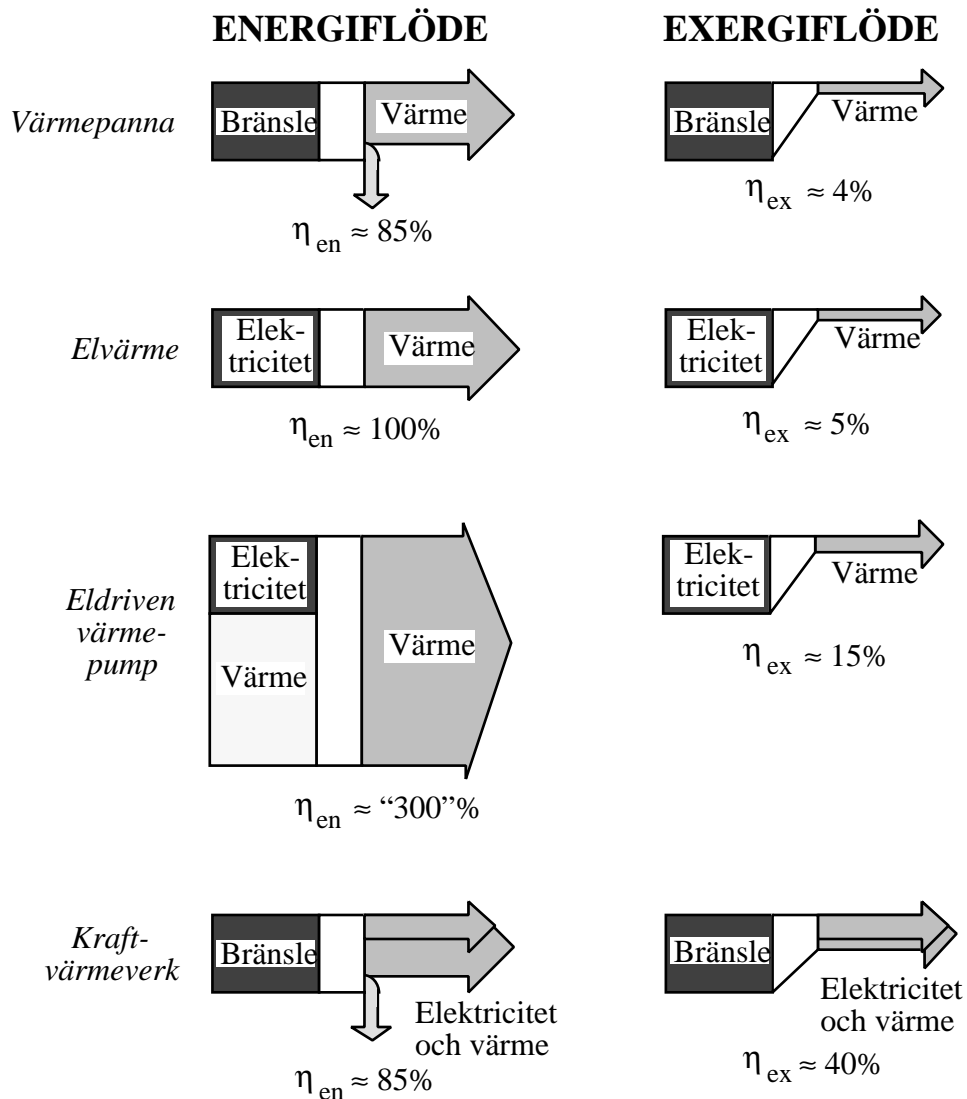
Analogt med de två begreppen energi och exergi kan vi definiera två effektivitetsbegrepp vid en energi- (och exergi-) omvandlingsprocess, (1) energi i den önskade slutprodukten dividerad med ingående mängd energi. Denna storhet bör kallas energiverkningsgrad och betecknas  $\eta_{en}$ , dvs

$$\eta_{en} = \frac{\text{Energiutbyte}}{\text{Energiinsats}} .$$

(2) Exergi i den önskade slutprodukten dividerad med ingående mängd exergi. Denna storhet kan vi således kalla exergiverkningsgrad och beteckna  $\eta_{ex}$ .

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\text{Exergiutbyte}}{\text{Exergiinsats}} \cdot$$

Vid omvandlingar av energi mellan olika former går i allmänhet en del energi bort genom förluster. Genom att bortse från energibidrag från omgivningen vid energiomvandlingar kan energiverkningsgraden bli större än 1 eller 100 %. Exempel på sådan omvandling är värmepumpen som återfinns i fig. 3.11 nedan. Värmepumpen har ju ett “energihav” av gratis omgivningsvärme, med exergifaktorn 0, att ösa ur. För att i någon mån slippa förklara detta märkliga förhållande — att verkningsgraden blir större än 100% — talar man inom tekniken istället om verkningskoefficient eller värmefaktor. Själv anser jag det vara mer hederligt att säga som det är eller att använda ett bättre begrepp som exergi. För exergiverkningsgraden gäller alltid att denna måste vara mindre än ett. Exergi kan ju inte skapas, endast förbrukas.



Figur 3.11 Energi- och exergiverkningsgrader för värmepanna, elvärme, värmepump och kraftvärmeverk.

I fig. 3.11 ovan illustreras skillnaderna i energi- och exergiflöden och därmed verkningsgrader för fyra omvandlingssystem: värmepanna, elvärme, elektrisk värmepump och ett kraftvärmeverk (mottryckskraft).

Överst ser vi omvandlingen av bränsle till värme i en vanlig oljepanna. Genom i huvudsak rökgasförluster begränsas energiverkningsgraden till ca 85 %. Den låga exergiverkningsgraden 4 % beror däremot på att man inte utnyttjar temperaturfallet då en mer än tusengradig låga via värmeväxlare värmer rumsluften till 20°C.

Elvärme har som vi ser en energiverkningsgrad av 100 %. Detta är som vi ser av diagrammet för den elektriska värmepumpen ingen övre gräns för energiverkningsgraden vid omvandling av elektricitet till värme. En värmepump kan naturligtvis också drivas med bränsle genom att den kopplas till en förbränningsmotor. Värmepumpen kan härigenom även

ersätta en vanlig värmepanna för husuppvärmning. En omvandling mellan elektrisk energi eller bränsle och värme kan alltså, om man bortser från energibidraget från omgivningen, mycket väl vara mer än 100 %. Vi ser att vid en exergibetraktelse blir bilden en annan. Exergiverkningsgraden för elvärme är omkring 5 % och för en värmepump omkring 15 %.

I fig. 3.5 ovan jämfördes energi- och exergiflödet genom ett kondenskraftverk. Av fig. 3.5 kan vi se att verkningsgraden i båda fallen är ungefär densamma. Detta beror på att inflödet av bränsle respektive utflödet av elektricitet har hög kvalitet, dvs hög exergifaktor. Från fig. 3.11 ser vi att exergiverkningsgraden är nära densamma för både kondenskraftverk och kraftvärmeverk. Detta kan vi bättre förstå då vi ser hur exergiförlusterna fördelade sig i ett kondenskraftverk. Den största exergiförlusten sker vid omvandling av bränsle till värme i pannan. Eftersom denna omvandling är densamma i både ett kondenskraftverk och ett kraftvärmeverk blir exergiverkningsgraden omkring 40 % i båda fallen. Vid en energibetraktelse blir förhållandena helt annorlunda. Då effektiviteten hos kraftvärmeverk anges saknas tyvärr ofta uppgiften att den maximala energiverkningsgraden inte är 100 % utan kanske 1500 %. Som vi såg i fallet med värmepumpen kan ju energimässigt värme produceras i mängder som vida överstiger den insatta energimängden. Om denna är i form av elektricitet eller bränsle saknar principiell betydelse, men har naturligtvis betydelse för hur vi praktiskt går till väga. En bränsle driven värmepump kan således energimässigt "producera" långt mer värme än vad den "förbrukar" som bränsle. Energibegreppet ger således en falsk bild av processen och dess förluster, och samtidigt döljer man de möjligheter till effektivisering som finns i bättre teknik. I valet mellan värmekraftverk och kraftvärmeverk framstår dock kraftvärme som klart överlägsen, åtminstone så länge vi saknar bättre ångturbiner för högre temperaturer och elkraftutbyte, bättre värmepumpar för ett större utbyte av el till värme och så länge vi har ett samtidigt behov av el och värme (eller kyla med hjälp av värmedrivna kylprocesser {Hagenfors 1991}) i samhället.

För materialomvandlingar saknas idag generella effektivitetsbegrepp, vilket förklaras av bristen på ett generellt resursmått. Vid energianalyser, se avsn. 3.8 nedan, av jordbruk anger man ofta effektivitet som energi ut dividerat med energi in, dvs energiverkningsgrad, trots att vi i första hand uppfattar jordbruksprodukter som material. Inom skogsbruket saknas denna typ av effektivitetsbegrepp. Inom järn- och stålframställningen används alltmer effektivitetsbegrepp som påminner om exergiverkningsgrad. De begrepp man oftast använder är Gibbs eller Helmholtz fria energi som nästan överensstämmer med exergin, se app. A. Tillsammans med uppgifter om de

ingående ämnens standardtillstånd ger detta ofta en god upplysning om effektiviteten för den aktuella processen.

I avsn. 3.5 och app. B diskuteras den svenska järnmalmsomsättningen kortfattat. Exergiverkningsgraden för hela omsättningen beräknades till 31 %. Men om vi enbart betraktar stålproduktionen är exergiverkningsgraden istället 23 %. Valet av ingående flöden är således avgörande för effektiviteten — en omständighet som gör det mycket viktigt att noga ange inflöden och utflöden för en process.

### 3.8 Exergianalys

Exergin i en produkt motsvarar inte den exergi som åtgår vid produktionen eftersom exergiverkningsgraden alltid är mindre än 100 %. För att göra upp en exergibudget är det nödvändigt att ta med all exergi, som åtgår för den aktuella produkten — detta kallas exergianalys. {IFIAS 1975, Chapman & Roberts 1983} Det är alltså viktigt att notera att en exergianalys är en speciell typ av exergistudie och inte vilken "analys" som helst.

Energianalysen har utsatts för kritik från många håll. I energianalysen inskränker man sig ofta till att endast mäta en resurs, energi, utan att beakta andra resurser, som krävs i en omvandlingsprocess. Detta beror av en naturlig begränsning hos energibegreppet. Genom att istället välja exergi som mätstorhet frångår man dessa problem. Dock måste generella standarder introduceras. Denna typ av budgetering bör kallas exergianalys (exergy analysis).

Då man tillämpar exergianalys på produktionsprocesser och tjänster, bör man inte begränsa analysen till ett enskilt led i processen utan även analysera processen i sin helhet. Exergianalys bör också tillämpas på olika funktioner i samhället, såsom transporter. Exergianalys är även användbar vid analys av hela samhällsmetabolismen, som beskrevs i avsn. 3.7 ovan.

Följande två exempel visar klart vad en alltför begränsad överblick kan innebära {Andersson, 1981}:

(1) När Gustav III ville skicka ett meddelande var det självklart att tänka sig en kurir på löddrig springare. Ett forskningsprogram för att få fram bättre kommunikationer skulle alltså ha inneburit satsning på förbättrad hästavel. En energianalys av funktionen att sända meddelande från t ex Stockholm till Göteborg skulle ha resulterat i en studie av hästars matvanor. Men så småningom insåg man att varken häst eller kurir var nödvändiga för att överföra ett meddelande. Man insåg t o m att inte ens själva brevet dvs

papper och bläck var nödvändiga. Man började experimentera med optiska telegrafkedjor och så småningom telegrafi med kabel och idag även med satellit.

(2) När vi idag skall uppskatta energibehovet för att klyva en stock till bräder utgår vi från att stocken skall sågas. När priset på drivmedel stiger börjar vi undersöka om processen kan förbättras genom att välja en motor med högre verkningsgrad för att driva sågklingan. Vi konstaterar att man vanligtvis har elmotorer med en verkningsgrad på ca 90% och att det alltså inte går att åstadkomma mer än 10% förbättring. Men klyvning innebär i naturvetenskaplig mening att man åstadkommer två snittytor som man skiljer så mycket att attraktionkrafterna blir försumbara dvs några atomdiameter. Om man räknar med att trä har en brottgräns på  $10^4$  N/cm<sup>2</sup> och att man behöver skilja ytorna  $3 \cdot 10^{-9}$  m (10 ggr diametern på en vattmolekyl) åtgår mindre än 0.3 J för att klyva en stock som är 5 m lång och som har en diameter av 20 cm. 1 kWh borde alltså räcka för att klyva ca 10 miljoner stockar. Men med en såg frilägger man inte bara snittytorna utan också ytan runt varje sågspån. Resultatet blir att vi, i bästa fall sågar 300 stockar i timmen med en motor på 10 kW dvs 30 stockar per kWh. Det är alltså inte så att vi kan minska behovet av energitillförseln med högst 10%. Vi kan minska behovet med mer än 5 tiopotenser om vi finner bättre metoder än sågning som klyvningsmetod.

Från dessa talande exempel ser vi alltså varför exergianalysen är ett så viktigt hjälpmedel vid planering eftersom den totala konsekvensen av vårt handlande blir uppenbart. Dessutom ser vi möjligheterna till resurshushållning på ett sätt som annars aldrig blir uppenbart. Våra perspektiv blir ofta alltför snäva och i vår iver att fatta beslut låter vi ofta "ändamålet helga medlen", t ex genom att intala oss att naturen kan mätas i pengar och alltid går att återställa. Men, naturen följer naturlagarna och irreversibla förändringar är av naturen omöjliga att "reparera". En större hänsyn till naturen innebär en större hänsyn till naturlagarna i mänsklig planering, därför har exergianalysen en given plats i all planering, i synnerhet då stora mängder exergi skall omsättas.

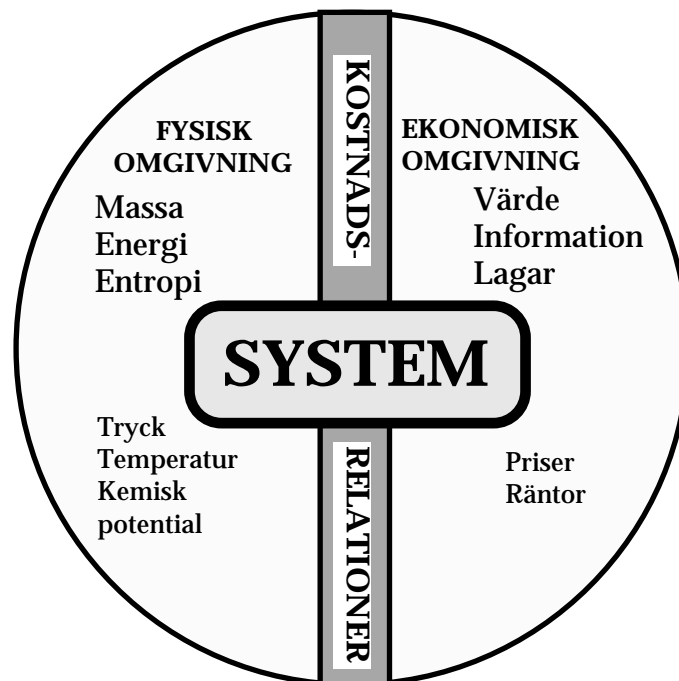
### 3.9 Exergiekonomi

Det är viktigt att på olika sätt knyta samman exergistudier och ekonomi. Detta kallas exergiekonomi och en av dessa metoder kallas också termoekonomi. Myron Tribus och Yehia M. El-Sayed, tidigare vid M.I.T. (Massachu-

setts Institute of Technology), numera verksamma i företaget Exergy Inc., 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. Tribus motiverar bl a metoden på följande sätt:

*"It is much more important to be able to survey the set of possible systems approximately than to examine the wrong system exactly. It is better to be approximately right than precisely wrong."* (Det är mycket viktigare att beskriva de möjliga lösningarna ungefär än att studera det felaktiga systemet i detalj. Det är bättre att ha ungefär rätt än exakt fel.)

Utgångspunkten är att betrakta ett system omgivet av dels en fysisk, dels en ekonomisk omgivning, se fig. 3.12. 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.



Figur 3.12 Det studerade systemet i två omgivningar: den fysiska och den ekonomiska



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 alt. bortagande 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. Själv har jag tillämpat metoden på en enkel modell av en värmepump varvid drivkällan (elmotorn) visat sig vara den intressantaste komponenten {Wall, 1986}. Naturligtvis kan denna metodik generaliseras till alla ekonomiska system som omsätter fysiska resurser som industriella processer i allmänhet, samhällen och handel.

### 3.10 Miljösyn

En alltför vanlig syn på miljön i dagens samhälle kan karakteriseras i myter, vilka kan uppfattas som ett medvetet instrument för att slippa ta miljöproblemen på allvar. För att få en mer realistisk bild av den rådande miljösituationen och samhällets ansvar och agerande kan följande avsnitt vara till hjälp. Människan i den rika världen upplever nu ett materiellt välstånd som aldrig tidigare skådats i mänsklighetens historia. Den rika människan "konsumerar sig till döds" medan miljontals fattiga svälter, och den rika människan utarmar samtidigt jordens naturresurser, dess miljö och kultur. Tekniken har i många fall blivit ett medel, för den rike, att förstöra och förtrycka och girigheten förkläds i internationell ekonomi och politik i den sk Nord-Syd konflikten. Förenta nationernas säkerhetsråd är på många sätt en arvtagare av de gamla kolonialmakternas herravälde. Ständiga medlemmar, med vetorätt är bland tre andra Frankrike och Storbritannien, medan länder som Indien och Brasilien lyser med sin frånvaro — detta är ingen tillfällighet.

Mat är inte längre mat, utan stora resurser investeras för att framställa drivmedel av mat för ett alltmer ineffektivt transportsystem. Även produktionen av drivmedel ur spannmål blir med nödvändighet mycket ineffektiv och kostsam både ur resurs- och miljösynpunkt. Enligt Brundtlandkommissionens rapport 1987 är den fattiges nöd är inte nöd utan kan tolkas som ett försvar för ett växande överflöd i den rika världen. Hjälpen till den fattiga världen får ju på inga villkor äventyra vårt eget överflöd. Slutsatsen är att det endast är genom ett ökat välstånd i den rika världen som den fattige kan hjälpas — vi måste alltså bli ännu rikare för att kunna hjälpa våra fattiga medmänniskor. 30 år av "bistånd" har lett till att den fattiga världens skuldräntor idag överstiger biståndet. Samtidigt diskuterar man i den rika världen om man eventuellt kan tänka sig att efterskänka dessa

skulder — situationen är milt uttryckt absurd. Den utsugning av människor och resurser som den fattiga världen varit utsatt för i århundraden förtigs och förljugs — 500-årsfirandet av Columbus “upptäckt” av Amerika är bara ett exempel på den förljugenhet vi omger oss med. Idag har vi facit i hand av den sk gröna revolutionen som lanserades på 1960-talet för att ge mat åt en svältande värld. Högavkastande sädesslag skulle ge mat åt svältande människor, men istället blev de på nytt offer för den rikes girighet. Den fattige blev nu istället helt beroende av den rikes handelsgödsel och bekämpningsmedel och tvingades sälja sin jord till den rikes banker och blev härigenom också av med sin jord och ännu fattigare. Vem tar ansvaret idag och varför talas det så lite i den rika världen om dess konsekvenser? Har man glömt vad som skett? Eller sker det medvetet?

Jag tror det är dags att stanna upp en stund och tänka efter innan nästa “lösning” för den fattiga världen realiserar. Den rika världens förakt för mänskliga och naturliga värden hotar annars att bli dess undergång. Illusioner som upprätthålls med propaganda i form av reklam och miljömärkning gagnar ingen på sikt — det fördröjer och försvårar bara en alltmer nödvändig omläggning av vår livsstil. Kritiker måste tas på allvar. Dagens ekonomi tenderar att stimulera utsugning, resursutarmning, miljöförstöring och mänskligt förakt då det kallas bistånd, resurshushållning, miljövärd eller militärt försvar. De nyligen instiftade miljöavgifterna innebär bara att miljöförstörelsen kommer att gå hand i hand med den ekonomiska tillväxten på samma sätt som uttömningen av våra naturresurser redan gör. Denna utveckling måste ändras. Naturen kan inte underordnas de ekonomiska lagarna — om så sker slutar det med en katastrof. Ekonomin måste underordnas naturens lagar. Att vi känner naturens lagar dåligt är inget skäl för att ignorera detta. För närvarande börjar vi se konsekvenserna av naturens lagar i den resursutarmning och miljöförstöring som blir allt allvarligare. Vi måste försöka lära oss att ekonomiska värden är något vi själva hittar på och de har inga som helst värden för naturen. Hur rik man än kan bli på att spekulera i fastigheter och värdepapper på börsen. Detta är bara en lek jämfört med det allvar som råder i naturen. Där finns bara reella värden som bestäms av naturen själv. I någon mån kan människan förstärka dessa världen genom sin egen existens, men framförallt är hon satt att förvalta dem och inte att utarma dem för egen kortsiktig vinnings skull. Dessutom representerar de en kraft som vi ännu inte alls verkar ha insett. Naturen formligen vräker resurser över oss i form av solljus och vindkraft, men det gör man allt för att nonchalera t ex genom olika slags ekonomiska hinder.

Det är således av avgörande betydelse för samhällsplaneringen att vi är medvetna om vad vi gör när vi avser att satsa på resurshushållning och miljövänlighet. 30 år av sk "bistånd" har ju i stort haft motsatt effekt och 30 år av miljövarsarbete kan på samma sätt komma att förvärpa miljösituationen om det bara blir tomma ord — ofta modeord som miljövänlig, grön ekonomi, miljöekonomi och kretslopp. Detta är en smärtsam process för ett samhälle som gärna vill framställa sig som civiliserat, utvecklat och kompetent. Men om vi inte blir medvetna om våra egna fel och brister och är beredda till allvarlig självvranssakan och omprövning kommer vi aldrig att kunna utvecklas vidare. Istället kommer vi att gå under — precis som många sk civilisationer före oss — så enkelt är det.

Låt oss mot denna bakgrund se på vår egen utveckling under de senaste decennierna. Under 50- och 60-talen pekade nästan alla prognoser uppåt. Till exempel adderade sig summan av de svenska kommunernas befolkningsprognoser till över 50 miljoner svenskar i slutet av 60-talet. Detta säger mer om vår planeringskompetens än om verkligheten och antagligen har denna kompetens fortfarande mycket att lära. Energi- och materialomsättningen ökade och med den det materiella välståndet och överflödet — tydliga tecken på ekonomisk tillväxt. Bostaden, arbetet, skolan, affären och värden flyttades till allt större enheter och avstånden växte — centraliseringen tilltog. Bilen — ett tecken på välfärd — blev en nödvändighet. Kvartersbutiken ersattes av en stormarknad och konsumenterna tog över varudistributionen. Kemiska tillsatser som färger och smakparfymers ersatte en försämrad matkvalitet och förpackningarna gjordes alltmer tilltalande. Livsmedelsindustrin satsade på reklam och marknadsföring istället för matkvalitet. Den meningslösa hanteringen i samhället växte och med den resursutarmningen och den ekonomiska tillväxten.

Idag handlar den tekniska utvecklingen ofta om eleganta bilkarosser istället för nya effektiva transportmedel eller kosmetisk husdesign istället för välisolerade och välbyggda hus och den militära tekniska utvecklingen karakteriseras av rent vansinne. Många forskare studerar detaljer utan perspektiv på helheten och glömmer att allt hänger samman. Sofistikerad och komplicerad teknik får dölja ineffektiva och dåliga lösningar och forskningen har hamnat i en situation där den ibland inte ser skogen för bara träd.

Det har blivit "inne" — modernt — att vara miljövänlig. Näringslivet säljer "miljövänligt" och jättelika miljökonferenser anordnas, samtidigt som miljösituationen förvärras alltmer. Men vad är det då som upprätthåller denna utveckling? — Jo, bl a ett antal myter om miljön. Låt mig avslöja några av dem.

1. Myten om den miljövänliga marknaden i egenskap av de fria marknadskrafternas vilja att värna naturen. Den ekonomiska marknaden företräder inte en omsorg om den naturliga miljön. Den styrs och skall styras av ekonomiska motiv och inte av naturvärden. Att därför lämna över miljöansvaret till dessa krafter genom att införa en sk miljöekonomi eller genom att sätta ekonomiska värden på miljön i form av t ex miljövårdsavgifter är dömt att misslyckas som miljövårdsåtgärd. Antagligen kommer effekten att bli den motsatta — miljöförstöringen kommer att accelereras ytterligare.

2. Den andra myten kan liknas vid tron att antalet bränder skulle minska med antalet brandsoldater, dvs att miljösituationen blir bättre om vi ökar bevakningen och kontrollen genom fler ”miljöpolicer” och ”miljörevisorer”. Den bästa brandbekämpningen är förebyggande av brand. I hemmet är det t ex en självklarhet att inte barnen får leka med tändstickor och i samhället är hanteringen av eld och brandfarligt material reglerat av lagar och normer. Inom miljöområdet saknas motsvarande beredskap nästan helt. Dagens insatser för bevakning och kontroll måste därför kompletteras med en betydligt större insats av förebyggande verksamhet. Framtida — idag okända — miljöproblem bekämpas bäst genom att undviks.

3. Myten om gränsvärden. Naturen betraktas ofta som en passiv mottagare av våra gifter — så länge vi underskrider gränsvärden, fastställda och kontrollerade av marknaden, är det ingen fara. Denna missuppfattning bygger på föreställningen att naturen inte reagerar på fysiska förändringar annat än genom skador eller direkt död, vilket är fel. Naturen kommer också att skapa nya livsformer och organismer, som den alltid gjort. Ibland ser vi det som plötslig och till synes oförklarlig massdöd bland djur och växter p g a giftalger eller virussjukdomar eller som en ökad dödlighet i cancer och allergisjukdomar hos människor. Den enes död – den andres bröd eller som Darwin uttryckte det “the survival of the fittest”. Naturligtvis kommer evolutionen att fortgå och naturen kommer att bestå långt efter det att människan och många andra växter och djur lämnat scenen. Härtill kommer en sammanlagringseffekt som man inte “upptäckt” förrän helt nyligen. Nämligen att utsläpp av olika ämnen påverkar varandra på sådant sätt att den sammanlagda effekten blir värre än för var och en av utsläppen. Således måste alla gränsvärden justeras i förhållande till varandra, vilket är en fullständigt hopplös uppgift. Konsekvensen blir antagligen att naturen som vanligt drar kortaste stråtet. Inte ens spektakulära åtgärder som att “rädda” djurarter i sk genbanker är av något värde då vi aldrig kommer att kunna återskapa deras rätta miljö. Vi måste börja inse att det är naturen som skapar

dessa djur och inte tvärt om, dvs om naturen består kommer också djuren att bestå. Denna vanföreställning föder nästa myt.

4. Myten om miljövård eller naturen som ett vårdobjekt. Miljöproblemen betraktas ofta som isolerade defekter i naturen. Myndigheter för naturvård inrättas och miljöteknik utvecklas. Marker kalkas — ibland med avfall från stålindustrin — och man talar om återhämtning och restaurering. Man talar om avgasrening och miljövänligt papper, men fortfarande är avgaserna orena och papperet miljöovänligt. Så kallad rening eller sanering innebär bara att problemen flyttas, men inte att de löses! Åtgärder riktas mer mot att dölja symptomen — om än bara verbalt genom en lek med ord — än att bekämpa orsakerna. Samhällets åtgärder blir därigenom lika tafatta som att försöka bota syfilis med plåster — eller genom att kalla det för akne. Liknande ordlekar finner vi i byggbranschen när man talar om “sjuka hus” istället för inkompetens.

Härigenom inriktas myndigheter mer på att i detalj kartlägga och bokföra hur katastrofen fortskrider, och att försvara den ekonomiska tillväxten, istället för att försöka förstå orsakerna till miljöförstöringen och eliminera dem.

5. Myten om människans gudomlighet. Från Första Mosebok lär vi oss att människan är skapelsens krona, men enligt Darwin är människan bara en gren på skapelsens träd precis som apor och insekter. Detta träd kommer, om det får bestå, att skjuta nya skott, som kommer att utveckla grenar med nya livsformer vida överlägsna människan. Även om människan har teknik för att ödelägga allt liv på jorden eller skapa de märkligaste livsformer i sina laboratorier kommer hon aldrig att kunna tävla med den mångfald och skaparkraft som naturen besitter. Härtill är den mänskliga organismen alltför primitiv.

Miljöproblemen är alltså framförallt en följd av en inkompetent resurshandling i samhället, ofta beroende på en alltför stark tilltro till den ekonomiska tillväxten. Vi måste därför istället öka kunskapen om resursanvändningen i samhället och försöka se helheten.

Exempel på verkligt kraftfulla åtgärder för att komma till rätta med miljöproblemen finner vi i Los Angeles lag mot förbud av bensindrivna fordon efter den 1 januari 1997 och i Tyskland. Där har konsumenterna lyckats genomdriva krav för industrin att ta tillbaka alla förpackningar. Från den 1 januari 1993 kan varje tysk konsument lämna tomma chipspåsar och mjölkförpackningar åter till affären som är tvungen att ta hand om dem. Denna typ av miljölagstiftning tvingar fram verkliga förändringar inom näringslivet. Detta är bara två exempel där även Göteborg skulle kunna gå i

bränschen, dessutom skulle t ex Volvo kunna bli en av världens första bilindustrier som tar tillbaks sina förbrukade produkter för återvinning. Här är redan många tyska och japanska biltillverkare långt framme.

### 3.11 Människosyn

Människlighetens största och kanske minst utnyttjade resurs är människornas hjärnor — intelligens. Det är inte bara vår kompetens och syn på naturen som är av betydelse för att bemästra resurs- och miljöproblemen i vårt samhälle. Det finns också en verkställande funktion i samhället som alltför ofta glöms bort — nämligen människan och hennes förmåga, som ofta underskattas. Stora resurser anslås för forskning och medvetandegörande för ett fåtal individer i samhället. Dessa människors uppfattningar, slutsatser och beslut skall sedan verkställas av den enskilda människan som ofta förväntas agera som en icke självständigt tänkande varelse. Resultatet blir ofta det motsatta eftersom folk av naturen är — och skall vara misstänksamma mot alla dekret från ovan. Listan på sådana exempel kan göras mycket lång men låt mig ta ett tankvärt exempel som jag själv mött. När varje hushåll under en period skulle förses med termostatventiler visade det sig snart att inställningen av dessa var av största vikt för husets värmefördelning och behov. Resultatet blev att alla skulle ha 20°C inomhus och att ventilen låstes för detta värde — det hade myndigheterna bestämt. “Fru Svensson”, som hade ont av reumatism och frös så snart temperaturen sjönk under 22°C, lärde sig snart att med hjälp av en fuktig trasa höja temperaturen till en, för henne behaglig nivå. Energibesparingen uteblev således och “fru Svenssons” tillvaro blev lite mer krånglig, allt till en merkostnad för samhället.

Inom miljöområdet finns ytterligare exempel på den tanklöshet och ibland nästan föraktfullhet som myndigheterna utövar mot enskilda människor. Idag har man t o m ibland institutionaliserat inkompetensen t ex inom byggbranschen. Tidigare, innan problemet med sk sjuka hus uppfunnits, fanns ett väl utbyggt gesällsystem för att utbilda byggnadsarbetare. I ett slag inkompetensförklarades en hel yrkeskår då man istället skulle läsa på högskola för att bli husbyggare. I det gamla bondesamhället kunde varje bondson bygga sitt eget hus av de material som naturen gav — idag klarar husbyggarna inte ens att hålla mögel och svampar borta än mindre att bygga resurssnålt. I det gamla bondesamhället tog man hand om sitt eget avfall i torrdasset — kissa gjorde man i det fria (vilket är viktigt för nedbrytningen av fekalierna) — och i komposten återvanns näringsämnen — både resurssnålt

och miljövänligt. Idag talar man om ekobyar, som om det vore någonting nytt när sanningen är att vi har långt kvar innan vi närmar oss den verkliga resursplanering och miljövänlighet som karakteriserar det gamla bondesamhället. Idag finns det t o m sk ekobyar där husen värms med elektricitet, Åkesta utanför Västerås är ett sådant exempel. Vi löser ju inte miljöproblemen med prat och tomma ord eller genom att kalla saker för miljövänliga, enligt vad vi såg i föregående avsnitt. Denna okänslighet för hur samhället fungerar och vilken skaparkraft och ansvar som varje människa besitter är bara ett exempel på bristande människosyn i samhällsplaneringen som kan bli ett hinder för en miljövänlig inriktning.

Då människor organiseras i kollektiv är valet av organisationsform avgörande för hur effektivt organisationen kan verka. Således har valet av samhällsorganisation en stor betydelse för hur samhället utvecklas, vilka synsätt som råder och hur kritik behandlas. Det västerländska demokratiska samhället bygger på en representativ demokrati, vilket innebär att besluten fattas centralt. Denna centralstyrning gör ibland samhället trögt och okänsligt — en egenskap som gör de allt snabbare förändringarna i miljön ännu allvarligare. I naturen gäller istället ekologiska principer som bygger på mångfald och individuellt inflytande.

Det finns skäl att fundera över varför just vårt samhälle hamnat i resursutarmning och miljöproblem. Har vår människosyn någon betydelse i detta sammanhang? Många mänskliga samhällen har ju existerat länge utan denna konflikt t ex den kinesiska kulturen som är mer än 5000 år. Är det så att vår samhällsorganisation har brister som framkallar dessa problem? Den representativa demokratin skapar många hinder för samhällsutvecklingen genom en påtvingad skiktning av informationsflödet och beslutsprocessen. Istället måste individen, som i de ekologiska systemen, ges ett större inflytande över utvecklingsprocessen. Hur detta kan ske ser vi idag inom den sk japanska företagsfilosofin. Den är inte hierarkisk, som i västerlandet, utan platt och har sina rötter i den österländska synen på människan och samhället, se app. F.

I många japanska fabriker har man t o m gått så långt att arbetarna själva helt bestämmer om förändringar av produktionen. Filosofin är följande: om arbetaren själv genomför sina förändringar utan ledningens inblandning går förändringen snabbt och blir billig, skulle förändringen visa sig vara bra är det en "hit", visar den sig vara en "flop" kommer den snabbt att justeras av arbetarna själva, systemet blir härigenom självförbättrande. Jämför med den ekologiska evolutionen där naturen med hjälp av enskilda individer prövar sig fram, ibland blir det bra, ibland blir det sämre, men i det långa loppet blir



det bättre. Eller som Darwin uttryckte det: *Survival of the Fittest*. Denna kraft till förändring som finns hos enskilda människor måste kanaliseras in i samhällets utvecklingsprocess. Den rådande resurs- och miljösituationen tillsammans med den globala klyftan mellan rika och fattiga kräver en utvecklingsstrategi som karakteriseras av mångfald inte enfald.

### 3.12 Exergiomsättningen i det svenska samhället

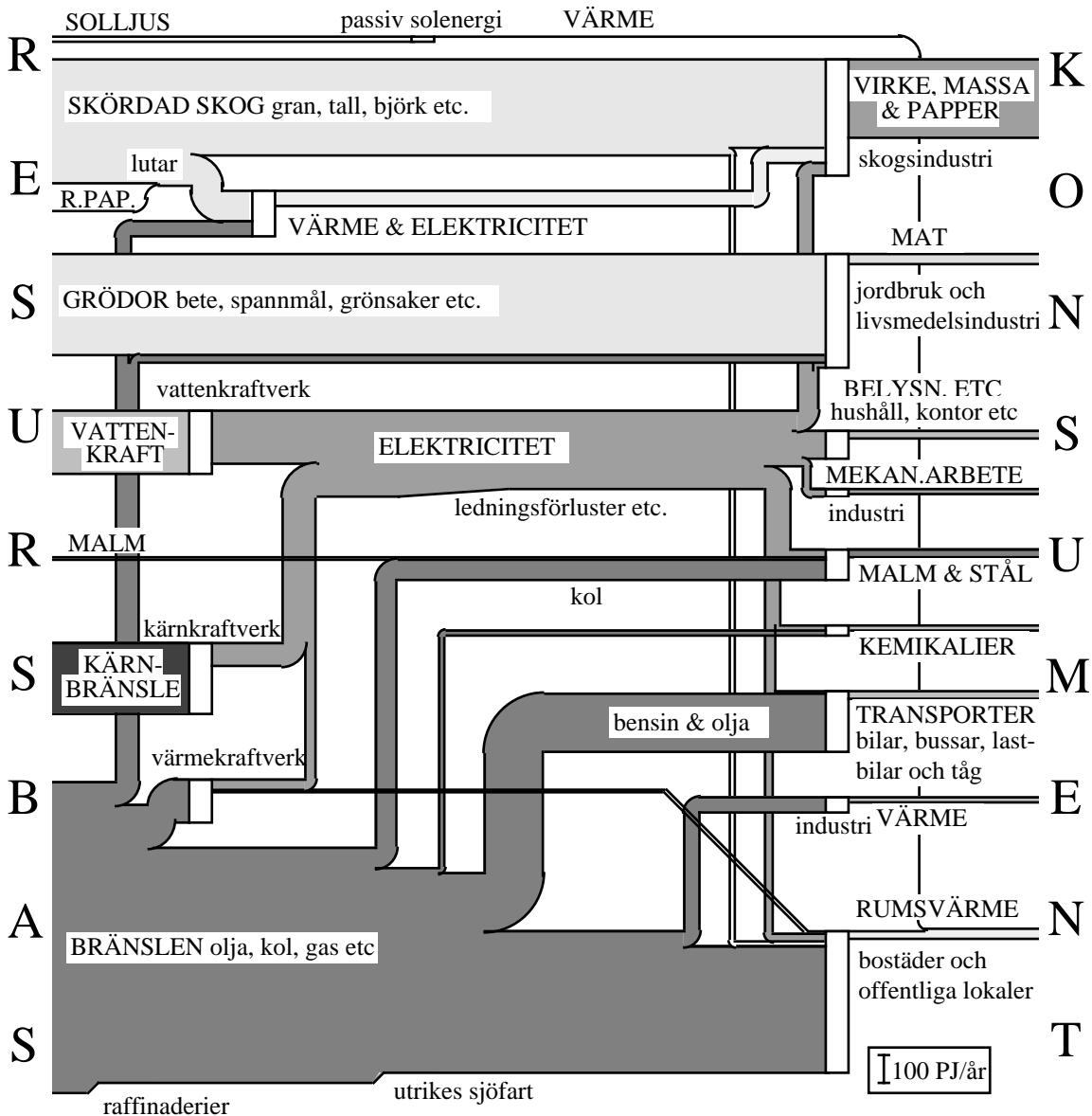
Man kan göra ett exergiflödesdiagram över den totala omsättningen av energi och material under ett år i det svenska samhället. Det ser då ut som i fig. 3.13 nedan.

Den nedre delen av diagrammet känner vi igen från exergiflödet i fig. 3.7 ovan. Här återfinner vi "inflödet" av kemisk exergi, kärnexergi och vattenkraft. Till skillnad mot tidigare ser vi nu tydligare var dessa flöden omsätts i samhället.

De nya flödena i diagrammet härrör från exergi som vi traditionellt betraktar som material, undantaget solvärme, skilda från energiomsättningen i samhället. Hit hör skördad skog dvs mängden av den skog som vi årligen avverkar. Skördad gröda är den under året bildade biologiska växtmassan som produceras på våra åkrar. Malm bryter vi ur marken som råmaterial, vilken innehåller den för oss värdefulla metallen järn (kemisk beteckning Fe, ferrum på latin). Tillkommer gör också solvärme dvs den del av solenergin som kommer oss tillgodo genom "gratis" uppvärmning av våra bostäder under uppvärmningssäsongen.

Data för detta diagram har hämtats ur tillgänglig statistik från framförallt Statistiska centralbyrån (SCB). Härtill kommer en del egna uppskattningar och beräkningar eftersom det ofta saknas tillräckliga uppgifter om kvaliteten på olika energi- och materialformer.

Låt oss nu se närmare på energi- och materialomsättningen i det svenska samhället år 1980 i termer av exergi i fig. 3.15.



Figur 3.13 Den svenska energi- och materialsomsättningen 1980 i exergienheter.  
 Total resursomsättning 2540 PJ eller 305 GJ/person. Nettoutbyte 500 PJ eller 60 GJ/person.

Flödena av energi- och materialresurser går från vänster till höger i diagrammet, från resursbasen till konsument. Bredden på flödena ges av deras exerginnehåll och anges i PJ/år (1 TWh = 3.6 PJ). Onoggrannheten på flödena varierar från ca 5% för elektricitet till ca 20% för värme till bostäder och offentliga lokaler. För att göra diagrammet överskådligt har jag valt att endast återge exergiflöden som överstiger 5 PJ/år, vilket samtidigt medför att många mindre flöden klumpats samman under rubriker som kemikalier och värme. Flödena ur samhällets resursbas är uppdelade med avseende på härkomst enligt klassificeringen ovan. Sålunda är solljus ett förnybart naturligt exergiflöde. Skördad skog, gröda och vattenkraft är förnybara exergiflöden från fonder på jorden. Malm, kärnbränsle och bränslen är icke

förnybara exergiflöden från lager på jorden. Exergiomvandlingar i samhället representeras av de ofyllda boxarna. De i samhället efterfrågade resurserna återfinns som utflöden till höger i diagrammet, som slutligen når oss som konsumenter.

### Solljus

Överst i diagrammet har vi ett inflöde av solljus som omvandlas till värme för rumsvärme under uppvärmningssäsongen (ca 20 PJ). (Det totala inflödet av solljus mot Sveriges yta är ca 1 000 000 PJ/år). Denna värme, ca 1 PJ, täcker ca 5% av värmebehovet under den kalla årstiden, vilket vi ser som rumsvärme längst ner till höger i diagrammet. Ett söderfönster släpper in omkring 7 MJ/m<sup>2</sup> och dygn under eldningssäsongen i Göteborg. Genom lämplig reglering med t ex fönsterluckor, som stängs under natten, kan ett söderfönster härigenom motsvara ett mindre värmeelement.

Under inflödet av solljus har vi ett inflöde av skördad skog.

### Skogsbruket

Den svenska skogsavverkningen 1980 uppskattas till 394 PJ rundtimmer (49.2 Mm<sup>3</sup> fub, fast mått utan bark). (Den årliga tillväxten uppskattas till 480 PJ eller 60 Mm<sup>3</sup> fub.) Lagerförändringarna innebar ett tillskott av 23 PJ. En stor del av detta rundvirke, 178 PJ, gick till sågverksindustrin. Sågverkens största produktion utgjordes av sågade och hyvlade trävaror (114 PJ). Hack och flis för massaindustrin uppgick till 74 PJ. 15 PJ som ribb och barkved användes för tillverkning av träfiberskivor, spånskivor och plywood. 266 PJ av skogsindustrins rundvirke användes av massa- och pappersindustrin. Pappersindustrin använde också 14 PJ returpapper. Produktionen bestod av: 43 PJ mekanisk, kemisk och dissolvingsmassa, 16 PJ från sulfitmassa och 96 PJ från sulfatmassa. Av denna massaproduktion gick 64 PJ till avsalu och resten, 91 PJ, användes för pappersproduktionen i landet. Främst produktion av papper, 54 PJ, och tidningspapper, 29 PJ. Övriga papper och papp produkter uppgick till 31 PJ. Exporten av skogsindustrins produkter utgjorde 194 PJ, i huvudsak papper, pappersmassa och hyvlade brädor. Den totala importen var 73 PJ, huvudsakligen massaved, 20 PJ och sågat timmer, 29 PJ. Från privata skogar användes 19 PJ som brännved. Flis och barkved från sågverk användes också som bränsle, 8 PJ.

Vid produktionen av pappersmassa görs stora exergiförluster då kemisk exergi i biprodukterna omvandlas till värme vid kokningen av flisen till massa. 120 PJ av vedämnen (lignin) tillsammans med 63 PJ övriga bränslen gav mindre än 60 PJ värme. Inom skogsindustrin används också 57 PJ

elektricitet. Exergiinnehållet i slutprodukterna, virke, massa och papper uppgick till 331 PJ.

### **Jordbruket**

Nästa omvandling i diagrammet visar jordbruket och livsmedelsindustrin. Skördad gröda omvandlas med hjälp av bränslen och elektricitet till mat. Maten består dels av vegetabilier, som grönsaker och bröd, dels animalier, som mjölk och kött. Vi ser att utflödet av mat är mycket litet jämfört med inflödet av skördad gröda. Detta beror på att vi relativt sett äter mycket animalier och lite vegetabilier. Ännu värre är att omkring en tredjedel av all producerad mat slängs.

Det totala exergiinnehållet i växtodlingens produkter var 190 PJ. Härtill kommer uppskattningar för foder och avfall, 138 PJ. Mängden avfall som återfördes till jorden uppskattas till 31 PJ. Den totala grödan är alltså ca 328 PJ/år. Inom jordbruket och livsmedelsindustrin omsätts förutom gröda även bränsle (30 PJ) och elektricitet (19 PJ) för maskiner och uppvärmning. (Den indirekta exergiförbrukningen i form av produktion av konstgödning, en produkt från den kemiska industrin, uppgick till 24 PJ.) Slutproduktionen inom denna sektor är mat. Ett dagligt intag av 2 862 kcal per person och dag motsvarar en årlig omsättning av 36 PJ för hela landet. Den borde med hänsyn till slöseri och hälsa vara 29 PJ. Enligt statistiken säljs mat motsvarande 42 PJ. En del av detta är icke ätbara delar som skal och ben, men även stora mängder ätbar mat slängs. Svensken av idag frossar i mat mer än någonsin tidigare och i en omfattning som tillsammans med andra rika länder som USA är unik i ett globalt perspektiv.

Det är viktigt att notera att insatserna i form av exergi för att producera den importerade givan av handelsgödsel inte framgår av diagrammet. För att se detta måste man tillämpa exergianalys, som behandlas kortfattat nedan. Då ser man bl a att det svenska jordbruket förbrukar mer exergi som insatsvaror än det producerar, dvs en i längden ohållbar situation.

### **Elektricitet från vattenkraft och värmekraft**

Vattenkraft är nästa omvandling i diagrammet. Av vattenkraft får vi elektricitet. Elektriciteten används som vi sett tidigare inom skogsindustrin (57 PJ) och vid livsmedelsproduktion (19 PJ). Dessutom används elektriciteten för belysning, hushållsström etc (114 PJ). Inom verkstadsindustrin användes elektricitet (27 PJ) för att bl a driva maskiner, dvs för mekaniskt arbete. Återstoden av elektricitet går till malm- och järn- och stålindustrin (34 PJ), kemisk industri (20 PJ), transporter (8 PJ) och elvärme (33 PJ).

1980 var produktionen av elektricitet genom vattenkraft 209 PJ. Om vi inkluderar omvandlingsförlusterna från lägesenergin i dammen till den levererade elektriciteten från kraftverket, transformationsförluster och förluster i pumpkraftverk blir den erforderliga exergin 248 PJ som vattenkraft.

Kärnbränsle (U-235) och bränslen som olja används också för att göra elektricitet. Denna omvandling sker i kondenskraftverk och kraftvärmeverk. Ett kraftvärmeverk ger förutom elektriciteten även fjärrvärme genom så kallat mottryck. I diagrammet ser vi hur detta flöde av fjärrvärme (10 PJ) går till uppvärmningen av bostäder och offentliga lokaler. Vi ser också av diagrammet att endast en tredjedel av kärnbränslet omvandlas till elektricitet, resten går förlorat — förstörs — vid själva omvandlingen. I kraftverk, kondenskraftverk och kraftvärmeverk är förlusterna omkring 60%.

Elektricitetsproduktionen var 1980 91 respektive 38 PJ från kärnbränslen och bränslen. Härtill kommer förluster på grund av egenförbrukning vid elproduktion inklusive förluster i krafttransformatorer och pumpning i pumpkraftverk enligt ovan. Den totala produktionen av elektrisk energi blir sålunda 340 PJ år 1980, varav 2 PJ är netto-importerad elektricitet. Av denna produktion används 307 PJ. Resten, 33 PJ, går förlorad som lednings- och anpassningsförluster på sin väg till konsumenten.

### **Järnmalm**

För Sverige är omsättningen av malmer helt dominerad av järnmalm. Svensk järnmalm håller i genomsnitt en järnhalt av ca 60 viktsprocent och består vanligen av skapatitjärnmalm. Järnet är kemiskt bundet till syre med kemisk beteckning  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetit), se avsnitt 3.5 och appendix B.

Den svenska järnmalmsproduktionen var 1980 26.9 Mton. Om vi antar att all denna malm är magnetitjärnmalm fås att malmen representerar en total exergimängd av 14 PJ.

Den svenska järnproduktionen var 1980 3.5 Mton. Grovt sett representerar detta alltså en exergimängd av 24 PJ. För att producera detta järn har åtgått 5.7 Mton malm, vilket motsvarar 3 PJ, 34 PJ elektricitet och 77 PJ kol, koks och andra bränslen.

### **Kärnbränsle**

Exergiinnehållet i kärnbränsle (anrikad uran) kan uppskattas på basis av hur mycket värme som frigörs i en reaktor för en viss mängd producerad elektricitet. Vid en termisk verkningsgrad på 32% motsvarar detta en exergi av 284 PJ i kärnbränslet.

## Kemiska bränslen

De vanligaste bränslena i Sverige är råolja, oljeprodukter, stenkol och koks. Införseln av dessa varor motsvarar år 1980 totalt 1140 PJ.

Bränslen används inom den kemiska industrin som materialråvara, 18 PJ olja och 20 PJ elektricitet omvandlas till ca 30 PJ gummi, plast etc. Den kemiska industrin är sålunda ett exempel på hur en traditionell energiråvara som olja används som material. Det förbrukade materialet kan sedan användas som energiråvara. Detta gäller naturligtvis många andra "förbrukade" material som trä och papper. Vi kan också konstatera att den petrokemiska industrin utnyttjar kemiska råvaror bättre än kraftindustrin, som i huvudsak förbränner råvarorna.

Transportsystemet tar som vi ser av diagrammet en stor del av bränsleinflödet (237 PJ). Bensin och olja omvandlas till transportarbete i bilar, bussar och lastbilar. Omkring 10% av bränslets exergiinnehåll används för att driva ett motorfordon (ca 1 ton stål) framåt. Varje kropp har en inneboende tröghet, en sk tröghetsmassa, vilken enligt Newton definieras i sambandet:  $kraften = tröghetsmassan \times accelerationen$ . För att flytta en kropp måste den accelereras dvs utsättas för en kraft. Enligt Newton är arbete lika med  $kraften \times vägen$ , dvs vi måste uträtta ett arbete för att förflytta kroppen. I princip kan detta arbete återfås då massan bromsas, vilket sker i vissa tåg, men i praktiken är detta arbete ofta förlorat, dessutom åtgår arbete för att hålla massan i rörelse p g a luftmotstånd och friktion mot vägbanan. Resten går förlorat till omgivningen eller används för att slita ut avgassystem, motor och däck på fordonet, se vidare avsn. 4.4 nedan.

Av de tidigare redovisade användningsområdena återstår 33 PJ till oljeraffinaderier, 36 PJ användes för utrikes sjöfart och 419 PJ för direkt omvandling till värme för bostäder och andra lokaler och 167 PJ till produktion av elektricitet och värme i värmekraftverk och kraftvärmeverk och 60 PJ för värmeproduktion etc inom industrin.

Nederst i diagrammet har vi så den största omvandlingen, bränslen, elektricitet, solvärme och fjärrvärme till värme. Denna omvandling är uppdelad mellan industri och bostäder samt offentliga lokaler. Här sker som vi ser stora förluster. I en vanlig oljepanna utnyttjas mindre än 5 % av bränslet för att göra värme. Hälften av den importerade oljan går till värmeproduktion. Exergiinnehållet i värme bestäms av värmets temperatur genom sambandet som tecknades av Carnot redan 1824, se ovan.

Om vi nu vill tillämpa detta på uppvärmning av bostäder, måste vi också naturligtvis ta hänsyn till att omgivningstemperaturen ändras med årstiden. Exergifaktorn för den svenska bostadsuppvärmningen kan då beräknas till

0.05. Detta medför att exergin för respektive värmeflöde blir: solvärme 1 PJ, fjärrvärme 2 PJ, elvärme 2 PJ och värme från bränslen 14 PJ, som också inkluderar energiförluster (ca 35%) i form av varma rökgaser.

En preliminär beskrivning över situationen idag återfinns i fig. 3.16. Den största skillnaden mellan situationen 1980 och idag är den ökade omsättningen av kärnbränsle och den minskade omsättningen av fossila bränslen. Denna förändring beror i stor utsträckning på att oljepannor för uppvärmning ersatts med elpannor, både inom hushållen och industrin. Övriga förändringar är som vi ser i diagrammen marginella.

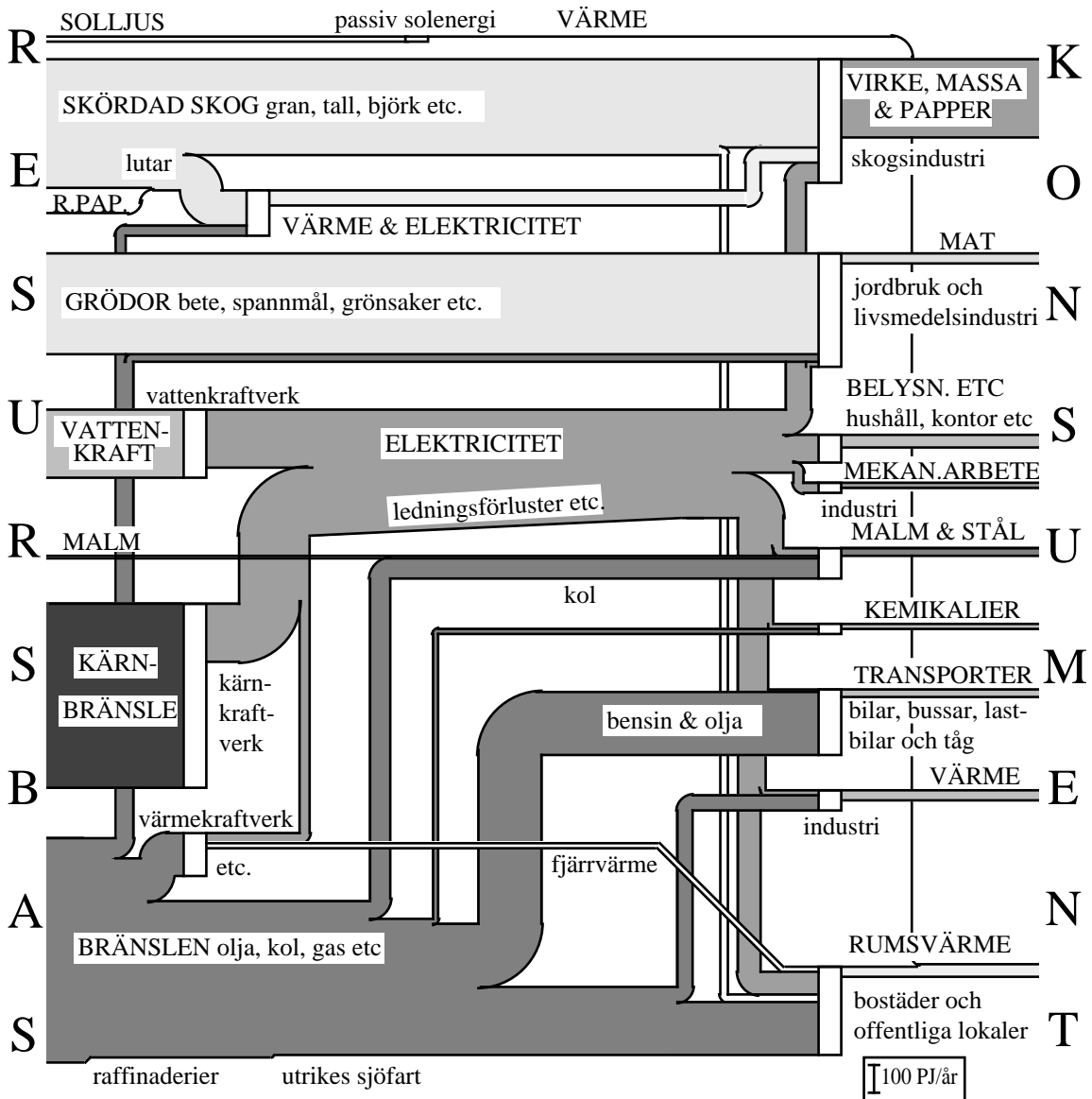
Andra naturliga exergiflöden underhåller också samhället genom en mer indirekt funktion. De renar vatten, luft och jord och lagrar t ex tungmetaller och sulfider. En grov uppskattning av vad den naturliga luft- och vattenreningen kan betyda i termer av exergi per år i Sverige ger som resultat ca 2 PJ/år, vilket är för litet för att åskådliggöras i diagrammet i fig. 3.13 och 3.16. Emellertid skulle samma rening med industriella metoder kosta många gånger mer både exergetiskt och ekonomiskt.

Av det totala resursinflödet av exergi i det svenska samhället år 1980 på 2 540 PJ utnyttjades endast 20% eller 500 PJ. Denna förlust kan minskas betydligt genom aktiv resurshushållning på alla nivåer i samhället. (Om vi endast ser till användningen av kommersiella energiresurser blir effektiviteten sämre, ca 14%.)

Genom att använda diagram som figurerna 3.13 och 3.14 för att beskriva resursflöden får man en klarare uppfattning om var man bör sätta in ansträngningar för att bättre ta tillvara resurserna. Detta bör göras på alla nivåer av resurssystemet.

En ytterligare fördel med dessa diagram är att alla inflöden är uppdelade med avseende på naturliga flöden, fonder och lager. Inflödet av solvärme är sålunda ett direkt exergiflöde från solen. Därefter följer inflödena av skördad skog, skördad gröda och vattenkraft. Alla dessa flöden härrör från exergifonder på jorden. De återstående inflödena av malm, kärnbränsle och bränslen kommer från ändliga bestånd, lager, på jorden.

För att under lång tid upprätthålla ett samhälles resursomsättning måste samhällets resursbas nästan helt utgöras av naturliga flöden och flöden som fångas in och omformas av fonder på jorden. Som vi klart ser av det svenska samhällets resursomsättning år 1980 och idag är detta inte alls fallet. Vi befinner oss alltså i en i längden ohållbar situation.



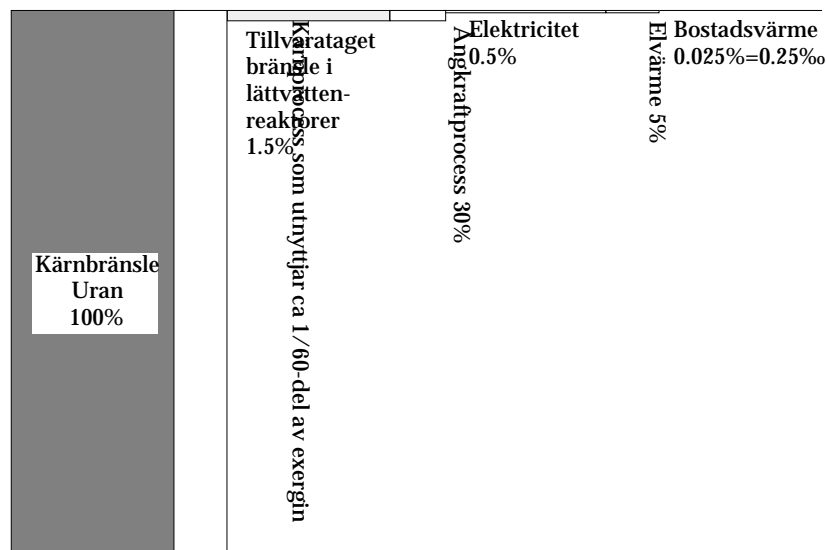
Figur 3.14 Den totala exergiomsättningen i det svenska samhället idag.

Analys av detta slag ger alltså kunskap om hur effektivt och hur balanserat ett samhälle är när det gäller att hushålla med naturresurserna. Sådan kunskap kan avslöja var tekniska och andra förbättringar bör sättas in, samt hur besparingsåtgärder bör prioriteras. Att på detta sätt jämföra olika samhällen på jorden och att studera det internationella systemet blir också av fundamentalt intresse, om vi på allvar vill medverka till en solidarisk resursfördelning. Mot bakgrund av detta skall jag nu beskriva hur vi skulle kunna bygga ett tryggare samhälle med hänsyn till resursförsörjning och miljö.



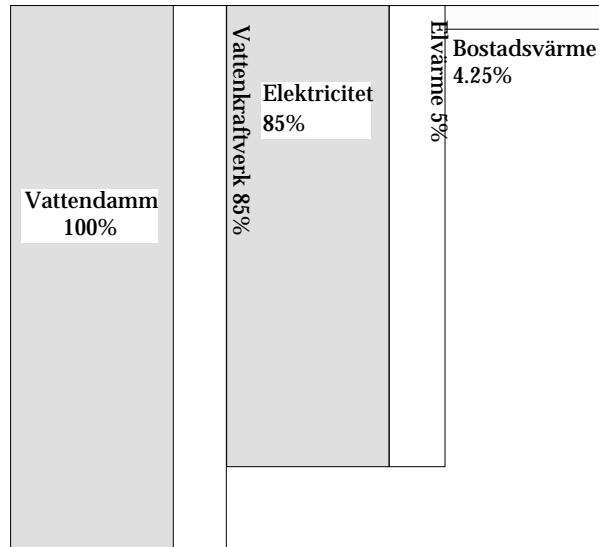
### 3.13 Resurskedjor

I exergidiagrammet över den svenska resursomsättningen ser vi hur många resurser byter form flera gånger innan de till sist når konsumenten. Vi kan tala om en resurskedja där varje ny länk representerar en resurs och där byte av länk — resursbyte — innebär exergiförluster. Låt oss se på följande resurskedja: kärnbränsle – elektricitet – husvärme i fig. 3.13 och 3.14. Vid omvandlingen kärnbränsle – elektricitet tillvaratas ca 30 % av kärnbränslets exergiinnehåll. Följer vi sedan elflödet ner till elvärme via en elradior, dvs ett elektriskt motstånd — elektrisk kortslutning — omvandlas endast 5 % av exergin i elektriciteten till värme. Den totala omvandlingen till värme utnyttjar alltså endast 1.5 % av exergin som frigörs i ett kärnkraftverk. Härtill kommer också att endast ca 1.5 % eller 1/60-del av exergin i kärnbränslet utnyttjas i dagens kärnkraftverk av lättvattentyp, se fig. 3.15. Omkring 59/60 av exergin i kärnbränslet återfinns således i kärnavfallet, vilket delvis förklarar svårigheterna att ta hand om detta mycket exergirika avfall.



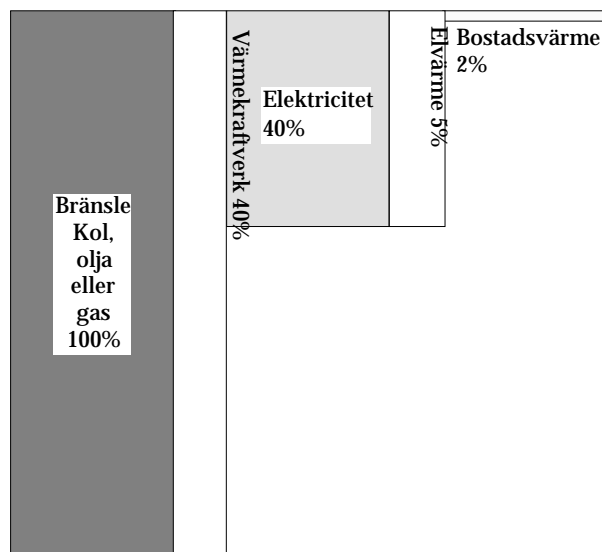
Figur 3.15 Utbytet för kärnkraftsproducerad el i lättvattenreaktorer för elvärme

Denna exergiförlust återfinns ej i fig. 3.13 eftersom den skulle dominera hela diagrammet, då den utgör ca 17 000 PJ under år 1980, dvs nära 7 gånger den totala resursomsättningen. Idag, som presenterades i fig. 3.14, motsvarar kärnbränslet ca 36 000 PJ. Nettoutbytet då kärnbränsle via elvärmare blir värme i våra hus är alltså bara ca 0.25 %, se fig. 3.15.



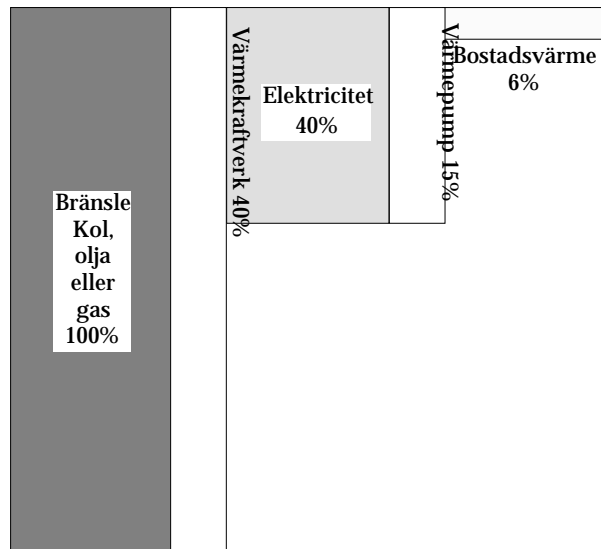
Figur 3.16 Utbyte för elvärme ur vattenkraftsproducerad el

Då vattenkraft omvandlas till elvärme blir utbytet istället ca 4.25%, se fig. 3.16 ovan.



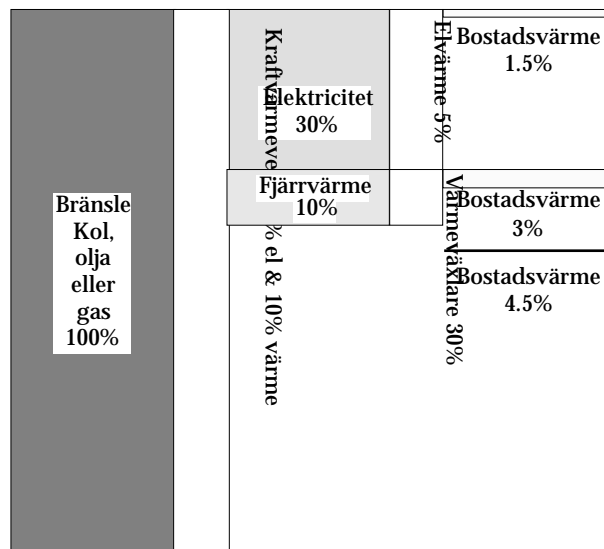
Figur 3.17 Utbytet för elvärme ur bränsleproducerad el

Då bränsle (kol, olja eller gas) omvandlas till el och värme blir utbytet ca 2.0 %, se fig. 3.17 ovan. En bra kakelugn, som visserligen bara kan omvandla ved till värme, har ungefär 1 % exergiverkningsgrad. Den använder också ved, som är en förnybar resurs.



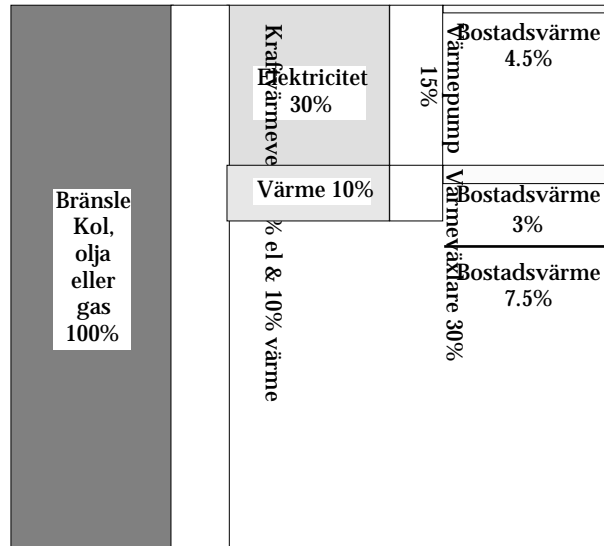
Figur 3.18 Utbytet för värme ur en elvärmepump och bränsleproducerad el

Då vi ersätter den direktverkande elradiatorn med en elvärmepump förbättras utbytet på exergiutbytet i värmepumpen som är 15%, se fig. 3.18 ovan, till ca 6%.



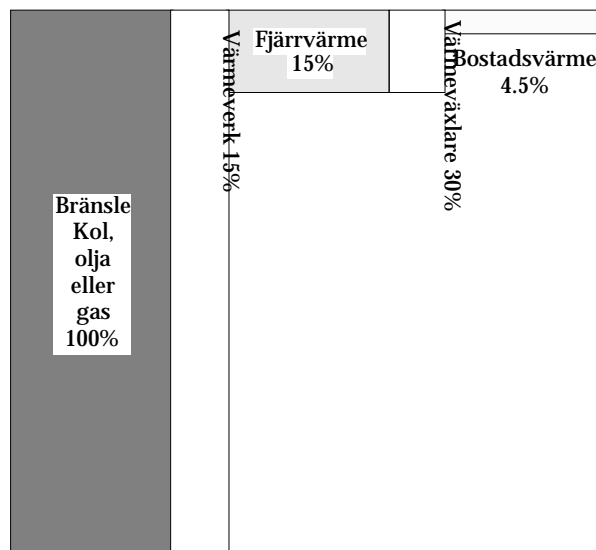
Figur 3.19 Utbytet för bränsleproducerad el i kraftvärmeverk för elvärme och fjärrvärme

Om vi ersätter värmekraftverket med ett kraftvärmeverk, dvs samtidig produktion av el och fjärrvärme förbättras utbytet en del. Låt oss för enkelhets skull anta exergiutbytet 30% el och 10% fjärrvärme, vilket motsvarar ett energiutbyte av ca 89%. I fig. 3.19 och 3.20 ser vi kraftvärme i kombination med elvärme respektive elvärmepump, dvs hela produktionen används för uppvärmning. I första fallet blir utbytet ca 4.5% och i andra fallet hela 7.5%.



Figur 3.20 Utbytet Effektiviteten för bränsleproducerad el i kraftvärmeverk för elvärmepump och fjärrvärme

Låt oss slutligen se på utbytet då bränsle omvandlas till fjärrvärme och bostadsvärme i ett värmeverk, se fig. 3.21.



Figur 3.21 Utbytet för bränsleproducerad fjärrvärme för bostadsuppvärmning

Slutsatsen blir alltså att elektricitet ej bör användas för direktverkande elvärme. Elvärme blir dock tyvärr allt vanligare, trots att den innebär ett ökat resursslöseri, vilket framgår i fig. 3.13 och 3.14 över exergiomsättningen i Sverige 1980 och idag. I stället bör man använda en värmepump och förbättra omvandlingen elektricitet till värme till över 15 % eller ännu hellre spara genom energihushållning som bättre isolering. I alternativet mellan värmekraftverk, kraftvärmeverk och värmeverk är kraftvärmeverk det klart

mest effektiva. I princip kan ett kraftvärmeverk uppfattas som ett värmekraftverk plus en fiktiv värmepump med exergiverkningsgraden 100%, vilket är praktiskt omöjligt att förverkliga. Vi ersätter ju en fjärdedel av elproduktionen i värmekraftverket, fig. 3.18, med lika stor produktion av fjärrvärme istället, fig 3.19 och 3.20. Kraftvärme är således idag det mest effektiva sättet att "producera" fjärrvärme ur elektricitet.

Detta avsnitt exemplifierar alltså vikten av att även göra exergi- och miljöstudier vid planeringen av nya energisystem. Ekonomiska kalkyler eller energistudier ger oss ju ingen insikt om den verkliga effektiviteten i vårt energiförsörjningssystem.

## 4 EXERGIOMSÄTTNINGEN I GÖTEBORG

### 4.1 Exergiinflöden

Exergiomsättningen i Göteborg utgör en del i den omsättning som beskrevs i avsn. 3.13 Exergiomsättningen i det svenska samhället. Skillnaden mellan medelgöteborgaren och medelsvensken är marginell. En stor del av de resurser som omsätts i Göteborg har dessutom producerats utanför kommunen, dvs i övriga Sverige eller världen. Det är därför viktigt att även ha med bilden över det svenska samhället då vi betraktar göteborgaren.

Göteborgs landareal uppgår till 445 km<sup>2</sup> och härtill kommer havsytan 290 km<sup>2</sup>. Landarealen fördelar sig mellan: tätort 22%, jordbruksmark 11%, skog 45% och övrig mark 22%. Inflödet av solljus motsvarar ca 1 000 kWh/m<sup>2</sup> och är dvs 3.6 PJ/km<sup>2</sup> år, vilket ger 1 600 PJ/år över landarealen och 1 040 PJ/år över havsytan dvs totalt 2 640 PJ energi. Enligt tab. 2.1 ovan är exergifaktorn för solljus 0.93 vilket medför att  $2\,640 \times 0.93 \approx 2\,460$  eller ca 2 500 PJ exergi når Göteborg som solljus varje år. Tillgången på vindexergi kan uppskattas till ca 0.1 PJ/km<sup>2</sup> år, vilket ger en total vindexergi över havsytan på ca 30 PJ per år. Avkastningen från jordbruksmarken kan uppskattas till ca 1% av solexergiinflödet vilket ger en total exergi i grödan av ca 2 PJ per år. Avkastningen från skogsmarken är ca 0.1% av solexergiinflödet vilket ger nära 1 PJ från skogsmarken i Göteborg. Göta älvs sötvatten som rinner ut i det salta havet innebär att stora exergimängder omvandlas till värme. Göta älvs utlopp i Kattegat motsvarar ett vattenfall på ca 150 meters fallhöjd. Tyvärr är denna exergi mycket svår att utvinna eftersom det krävs mycket sofistikerad teknik som tunna membraner, vilka snabbt skulle sättas igen av växtligheten. De naturliga fysiska resurserna behandlas utförligare i app. G. {Wall 1991}

Exergi når alltså Göteborg i naturliga flöden som solljus, vind och sötvatten, genom fonder sk levande bestånd i form av mat och trä och från lager sk döda bestånd (ej förnybara) som kol, olja och gas. Uppskattningarna av de årliga förnybara resurserna gav: solljus 2 500 PJ mot Göteborgs land- och havsytan, vind 30 PJ över havsytan, gröda 2 PJ, virke 1 PJ och Göta älvs sötvatten 4 000 PJ.

Det naturliga resursflödet över Göteborg framstår således som enormt. Av detta skulle sol och vind kunna göra göteborgarna mer än självförsörjande på värme och el. De enorma exergiresurserna som går förlorade då Göta älvs sötvatten blandas med det salta havsvattnet är svårt att utnyttja, men de kommer oss i alla fall till godo som en varmare och fuktigare omgivning.

De förnybara resurserna kan vi tillåta oss att slösa med, men de ej förnybara måste utnyttjas maximalt då de också innebär svåra miljöstörningar.

Idag tillvaratas endast avkastningen från åker och skog, dvs en bråkdel av exergiinflödet. Solexergiinflödet över Göteborgs tätort, som utgör ca 100 km<sup>2</sup>, är ca 330 PJ per år samtidigt som exergibehovet för uppvärmning i Göteborg, se fig. 4.1, är 1.27 PJ per år. Mindre än 0.5 procent av solexergin skulle alltså kunna täcka hela uppvärmningsbehovet. Solexergiinflödet mot ett enskilt hus motsvar ofta 100 gånger uppvärmningsbehovet.

## 4.2 Uppvärmningen

Energi- och exergiomsättningen för uppvärmningssystemet för rumsvärme och varmvatten i Göteborg 1984 återfinns i fig. 4.1. {Energiplan för Göteborg, 1987} Som vi ser är exergiuutbytet endast 10% trots att energiuutbytet är 84%. Detta är intressant eftersom just värme ger stora skillnad vid en energi- och exergibetraktelse. Det totala uppvärmningsbehovet i Göteborg blir 18.18 PJ energi eller 1.27 PJ exergi.

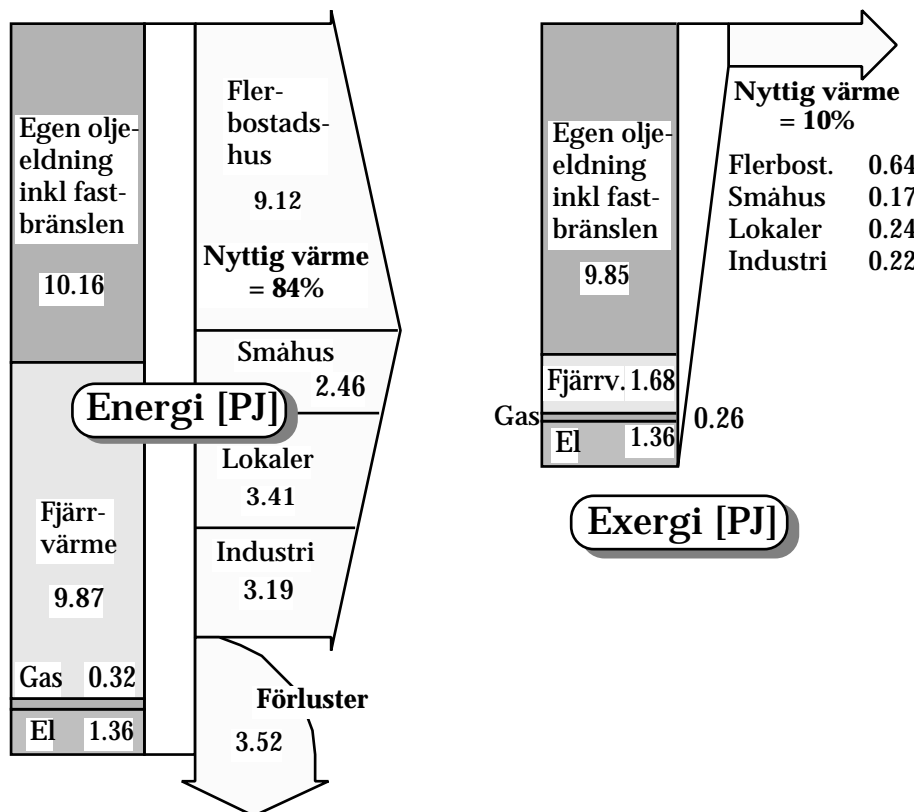
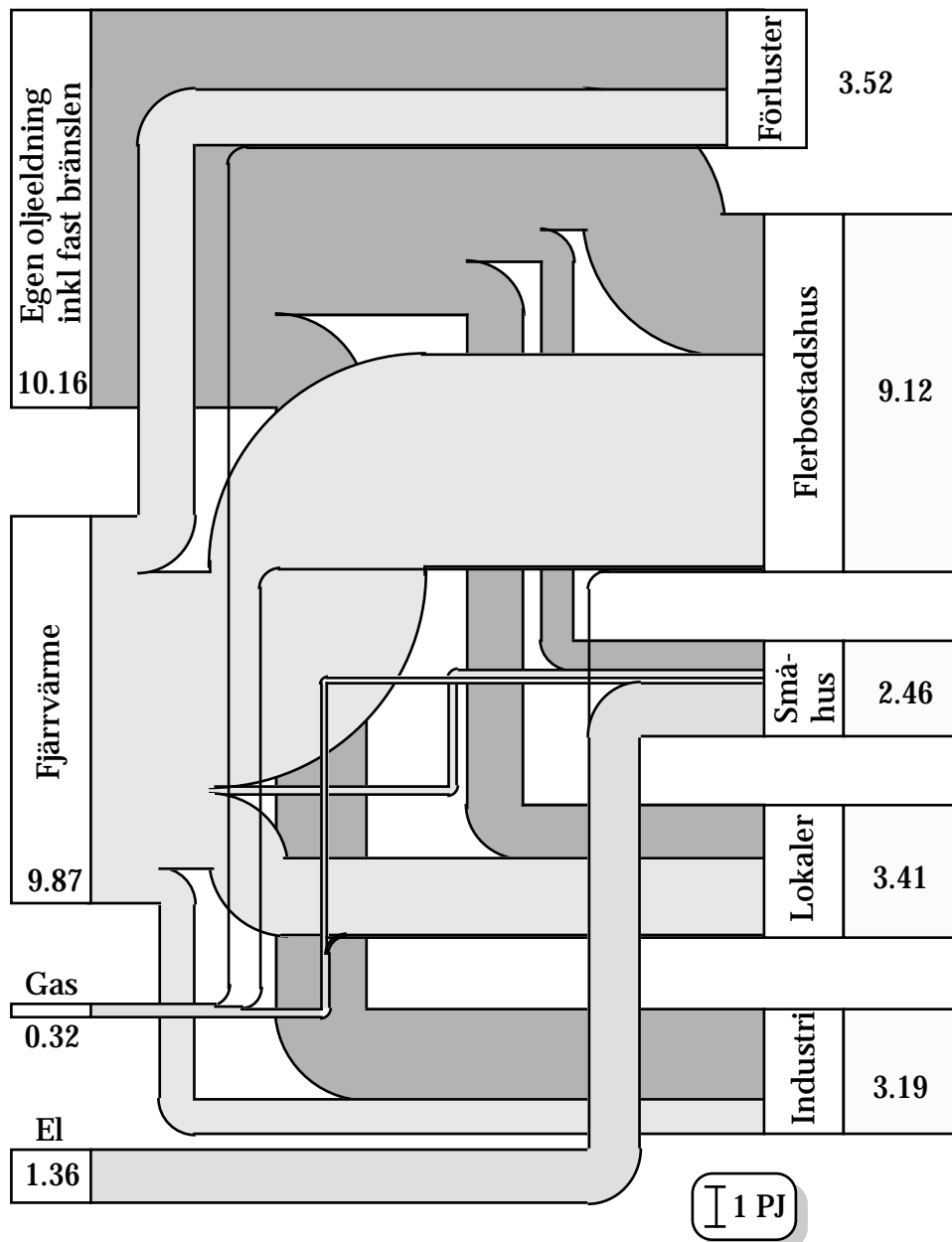


Fig. 4.1 Uppvärmningssystemet i Göteborg 1984.

Låt oss se närmare på själva omvandlingen enligt fig. 4.2 och 4.3.

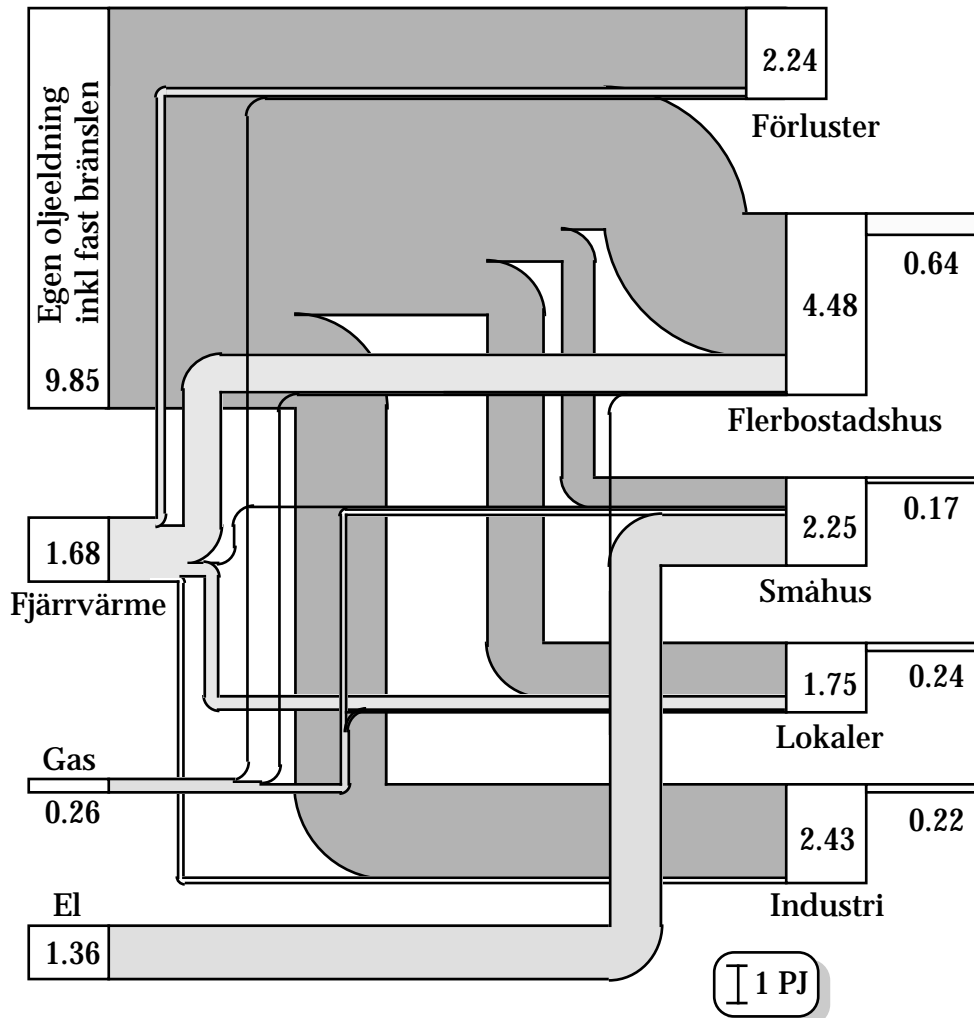


Figur 4.2 Energiomsättningen för uppvärmning av all bebyggelse i Göteborg 1984. Total omsättning 21.71 PJ varav olja 10.16, fjärrvärme 9.87, gas 0.32, el 1.36, till förluster 3.52, flerbostadshus 9.12, småhus 2.46, lokaler 3.41 och industri 3.19.

Som vi ser framstår energiomsättningen som effektiv, fig. 4.2. Förlusterna har samlats i en omvandlingssektor och utgör ca 16% av den totala omsättningen på 21.71 PJ. Fördelningen över de olika energibärarna är: olja 10.16, fjärrvärme 9.87, gas 0.32 och el 1.36. Användarna omsätter: flerbostadshus 9.12, småhus 2.46, lokaler 3.41 och industri 3.19, dessutom till förluster 3.52. Energitillgången för användarna är identiskt med energiomsättningen eftersom energi inte kan skapas eller förbrukas, enligt den grundläggande naturlagen om energins oförstörbarhet. Exergiflödet ger som vi ser en helt annan bild av omsättningen, se fig. 4.3. Exergin i fjärrvärme, vilken är 17% av



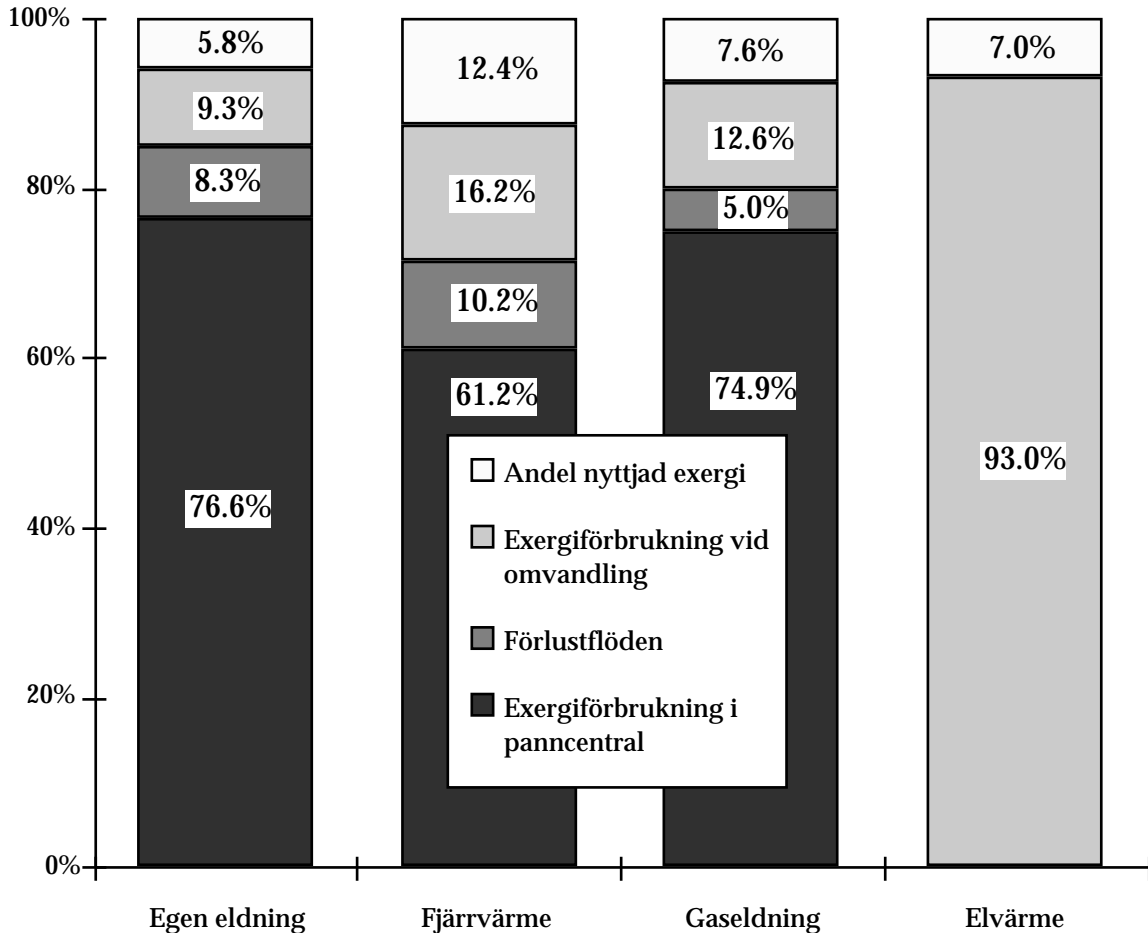
energin, innebär en stor skillnad mellan de två figurerna och exergibehovet hos abonnenterna framstår som mycket litet. Detta beror av att behovet är rumsvärme och varmvatten, vilka har lågt exergivärde.



Figur 4.3 Exergiomsättningen för uppvärmning av all bebyggelse i Göteborg 1984. Total omsättning 13.15 PJ varav olja 9.85, fjärrvärme 1.68, gas 0.26, el 1.36, till förluster 2.24, flerbostadshus 4.48, småhus 2.25, lokaler 1.75 och industri 2.43.

Med hänsyn till bl a temperaturnivåerna i uppvärmningssystemet, som för rumsvärme antas till 21°C och för varmvatten 55°C, kan exergifaktorerna för de olika energiflödena beräknas {Cardfelt, 1988}. Exergins fördelning mellan förbrukning i panncentral, förlustflöde, förlust vid omvandling hos abonnent och nyttjad exergi vid egen eldning, fjärrvärme, gaseldning och elvärme framgår av fig. 4.4 nedan. Vi ser att fjärrvärme framstår som mest effektivt. Vid en energibetraktelse av egen eldning (olja och fastbränsle) är förlusterna ca 20% och således utnyttjas ca 80% av energiflödet för uppvärmning. Det förefaller således som om vi maximalt kan öka effektiviteten med sådär 25% — vilket är fel. Detta ser vi först vid en exergibetraktelse. Som framgår av fig. 4.4 sker den största delen av exergiförbrukningen 76.6% redan

vid förbränningen i panncentraler. Härtill kommer förlustflöden 8.3% och omvandlingsförluster 9.3%, vilket innebär att den tillvaratagna exergin endast utgör 5.8%. Effektiviteten kan alltså ökas med  $(100\% - 5.8\%)/5.8\% \approx 16.2$  gånger eller 1620%, vilket alltså utgör en stor potential för att dels minska energiberoendet, men också och kanske ännu viktigare minska miljöbelastningen. Lägg därtill möjligheten att minska uppvärmningsbehovet genom byggnadstekniska åtgärder, som för ett flerbostadshus kan minskas till praktiskt taget noll, vilket vi skall se senare.



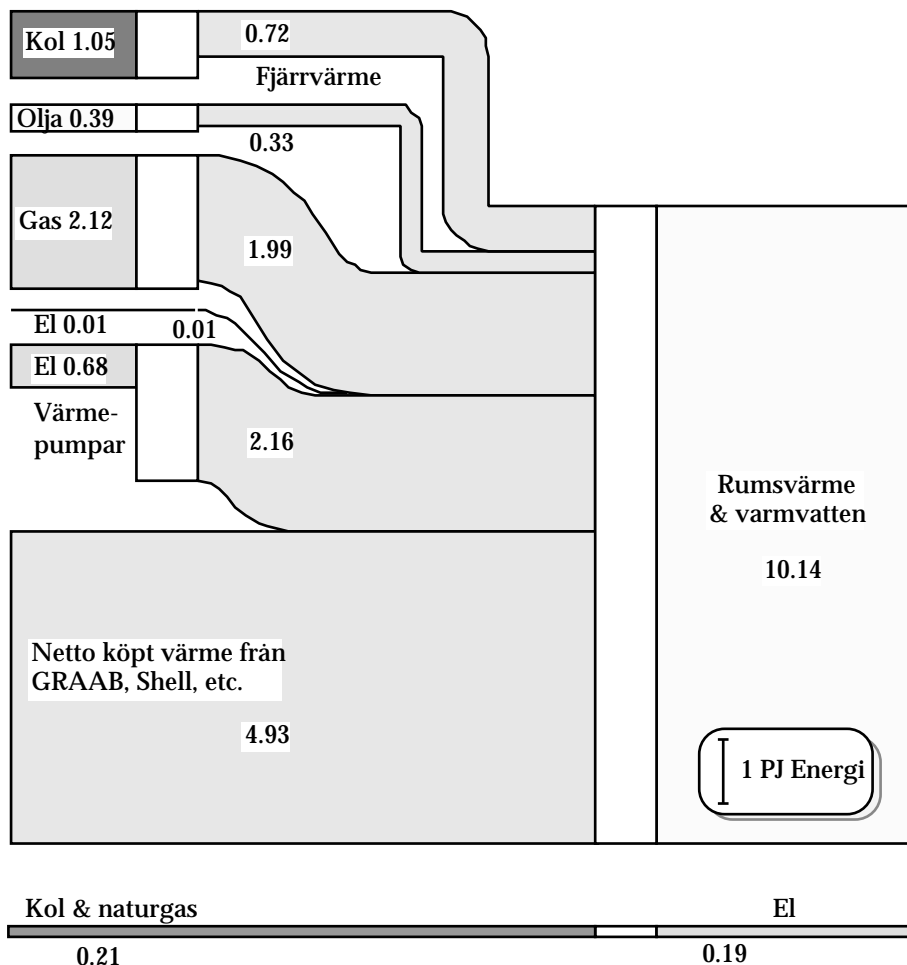
Figur 4.4 Fördelningen av exergin för de olika uppvärmningsalternativen i Göteborg.

Under senare år har en allt större del av oljeeldningen ersatts av fjärrvärme från spillvärme och avfallsförbränning samt gaseldning. Även om övergången till spillvärme kan ses som en förbättring på kort sikt är det ingen lösning på lite längre sikt. Förekomsten av spillvärme är ju uttryck för stora exergiförluster som borde undvikas. Risken finns att man annars ekonomiskt bygger fast en ineffektiv teknik. Det är därför viktigt att inte binda sig i avtal för lång tid till en sådan lösning. Ett sätt kan vara att teckna avtal som kan brytas då exergieffektivare lösningar står till buds eller genom att teckna samarbetsavtal för att istället gemensamt försöka undvika onödig

produktion av spillvärme och istället satsa på exergieffektivare lösningar som gagnar alla parter.

Att ersätta ett fossilt bränsle med ett annat, olja med gas, är inte heller en miljö- och resursmässig lösning i ett längre perspektiv. På sikt måste samhällets resurser vara förnybara och miljövänliga. Som vi senare ska se kan ett förslag till lösningen på uppvärmningsproblemet vara effektiv värmeisolering och solfångare.

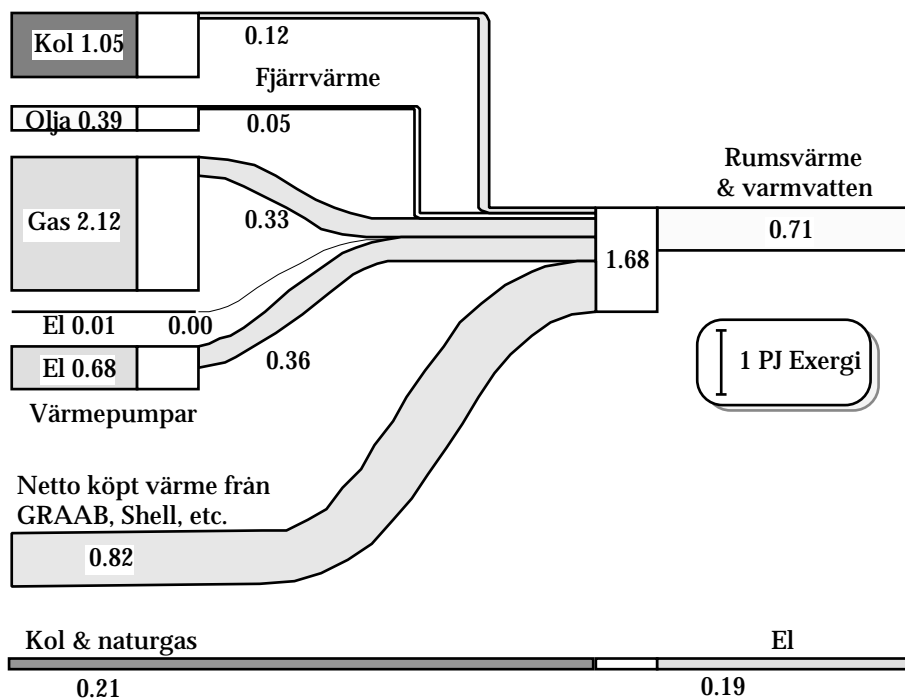
Om vi också tar hänsyn till förlusterna vid produktionen av fjärrvärme i kommunen kommer den samlade exergiförlusten att överstiga 94%. Dessutom tillkommer förluster utanför kommunen, t ex vid produktionen av elektricitet i kärnkraftverk. Den totala förlusten överstiger därför 95%, vilket innebär att vi måste tillföra mer än 20 gånger mer energiresurser än det egentliga behovet. Detta behov bestäms dessutom av dagens byggnadsstandard, vad avser isolering, värmeåtervinning, fönsterkvalitet etc. Resursslöseriet i uppvärmningssystemet framstår således som enormt.



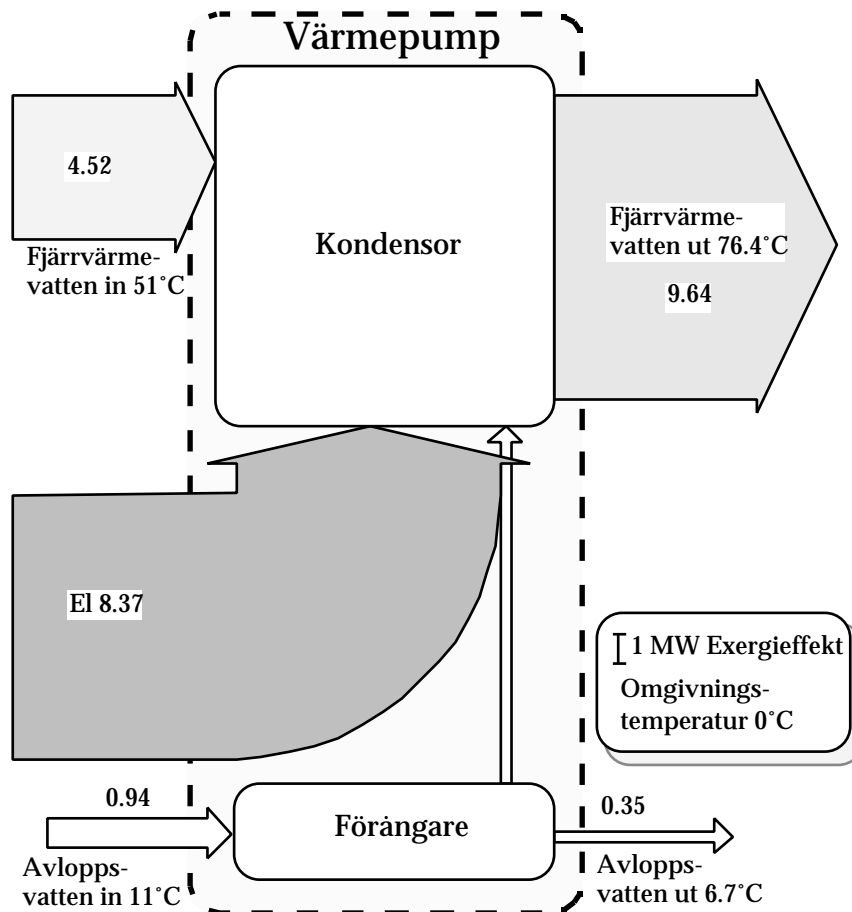
Figur 4.5 Kraft- och värmeproduktionen 1990 vid Göteborg Energi AB i energi.

En teoretisk behandling av exergi för värme och kyla i Göteborg återfinns i app. H. Där behandlas också exergin i fjärrvärme samt exergibehovet för att upprätthålla en konstant temperatur under några olika förutsättningar som förekommer i Göteborg.

På basis av tillgängliga uppgifter {Hesselmar & Winberg, 1992} har energi- och exergiflödet över kraft- och värmeproduktionen vid Göteborg Energi AB upprättats, se fig. 4.5 och 4.6 nedan. Som vi ser är andelen gas betydande och som tidigare framstår utbytet som mycket gott vid en energibetraktelse, fig. 4.5. I exergifallet däremot, fig. 4.6, ser vi som tidigare att förlusterna är betydande och utbytet således mycket lågt eller av totalt 5.07 PJ exergi tillvaratas endast 0.71 PJ som värme för rumsvärme och varmvatten, dvs ett utbyte av ca 14%. Om vi även ser till exergiförlusterna i produktionen vid GRAAB och Shell kommer utbytet att krypa ner mot 5% som tidigare. Den enda omvandling som framstår som någorlunda effektiv i exergidiagrammet, om vi bortser från produktionen av el, är omvandlingen av el till fjärrvärme i värmepumpar, 0.68 PJ el omvandlas till 0.36 PJ fjärrvärme, dvs ett utbyte på nära 50% utbyte. Låt oss därför se närmare på ett tänkt driftfall för en av dessa värmepumpar i Rya, se fig. 4.7.



Figur 4.6 Kraft- och värmeproduktionen 1990 vid Göteborg Energi AB i exergi.



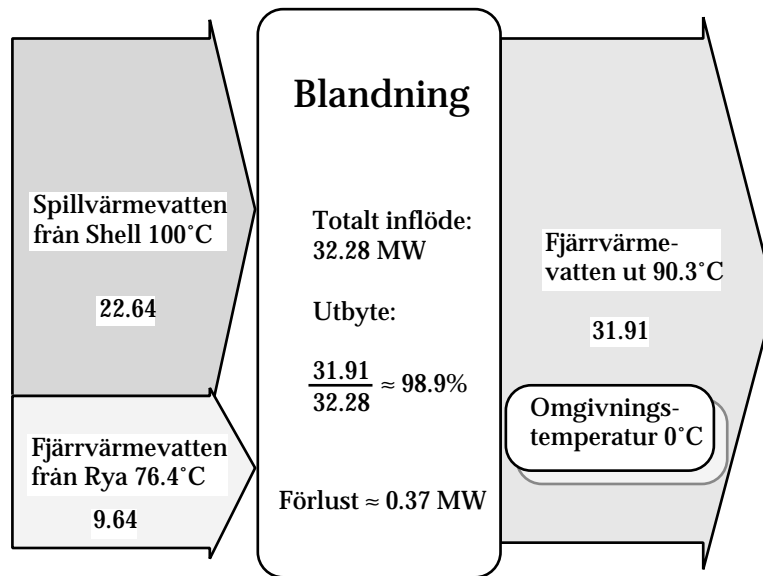
Figur 4.7 Schematisk skiss över värmepump VP1 i Rya.

Driftfallet motsvarar en värmeproduktion av 27.11 MW energi per sekund, vilket utgör effekten för den första värmepumpen som installerades 1983. {Värmepumpsanläggningen i Rya, 1983} Med hänsyn till antagna temperaturer och förluster kan exergiuutbytet beräknas till ca 57%. Härtill kommer naturligtvis förluster vid produktionen av el. Värmepumpsanläggningen i Rya motsvarar dock en betydande besparing jämfört med att istället använda el i elradiatorer för uppvärmning, vilket då skulle kräva 27.11 MW el istället för de ca 9 MW som nu åtgår i värmepumpen och övrig pumpkraft. Besparingen utgör således ca 2/3-delar eller ca 18 MW.

Vid blandningen av fjärrvärme vid olika temperaturer uppstår exergiförluster trots att ingen energi går förlorad. Detta beror på att en kontrast utjämnas och inte kan återskapas, en sk irreversibel process. Låt oss illustrera detta med hjälp av det fjärrvärmevatten som produceras i fig. 4.7. Detta vatten antar vi blandas med 100°C spillvärmevatten från Shell enligt fig. 4.8. Vi ser att utbytet (exergiverkningsgraden) är 98.9%, vilket naturligtvis är högt men på att stora exergimängder omsätts blir effektförlusten 370 kW.

Idag framstår alltmer kyla som ett behov under perioder då värme finns i överskott, dvs under sommaren då värme produceras från Shells raffinaderi

och sopförbränningen. Detta innebär att denna överskottsvärme kan tas tillvara för kylning genom att utnyttja värmedrivna kylprocesser. {Hagenfors 1991} Tekniken är enkel och lämpar sig särskilt väl om hus med kylbehov är anslutna till fjärrvärmenätet eftersom man då kan installera den värmedrivna kylanläggningen i direkt anslutning till den befintliga värmeanläggningen, vilket antagligen innebär stora besparingar jämfört med att istället bygga ledningar för fjärrkyla.



Figur 4.8 Exergiförlusten vid blandning av fjärrvärme från Rya och Shell.

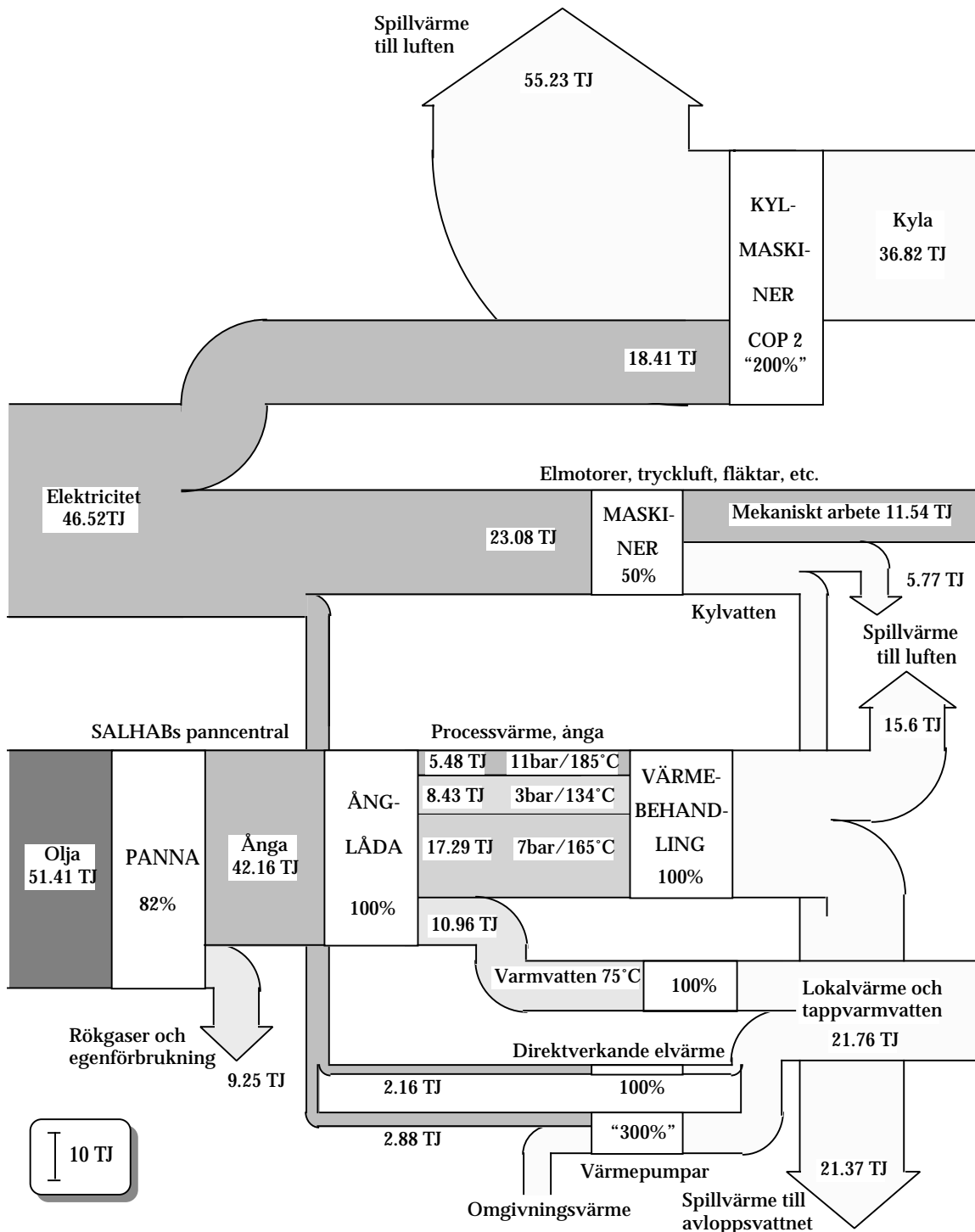
## 4.3 Industrin

I detta avsnitt kommer två industrier att behandlas Slakthusets industriområde och Arlas mejeri i Kallebäck. I både dessa industrier omsätts stora energimängder för produktion av värme och kyla, vilket gör dem särskilt intressanta att studera ur exergisynpunkt. Som vi kommer att se är exergiförlusterna betydande och stora besparingar kan göras genom ett effektivare utnyttjande av exergin och genom energihushållningsåtgärder.

### 4.3.1 Slakthusets industriområde

Energiflödet för Slakthusets industriområde 1986 {Wall, Cardfelt, 1988} återfinns i fig. 4.9 nedan. Området omfattar ca 45 000 m<sup>2</sup> och består av ca 40 olika livsmedelsföretag med totalt ca 600 anställda, varav ca hälften vid Scan Väst/Scan Dukat. Den årliga energiomsättningen uppgår till ca 98 TJ. Eftersom det finns ett samtidigt behov av värme och kyla är det särskilt intressant

att studera exergiförlusterna inom området. Processånga används vid korv-rökning, kokning och fettraffinering och stora kylbehov förekommer vid nedkylning av produkterna, s k processkyla, samt för kylning av råvaru- och färdigvarulager. Den största elförbrukningen sker i kylkompressorer och för diskning och rengöring av maskiner åtgår periodvis stora mängder varmvatten. Hygienkraven motiverar ett stort ventilationsbehov, men då en låg inomhustemperatur eftersträvas blir värmebehovet ändå relativt lågt.



Figur 4.9 Energiflödet för Slakthusets industriområde 1986.

Elektriciteten används i huvudsak av elmaskiner för kylproduktion samt övrig mekanisk drift. Kyla anges som den värme som tas ur systemet, således illustreras kylmaskiner, se översta omvandlingen i fig. 4.9, genom att producera spillvärme till luften, vilken tas ur kyl- och frysrums som härigenom kyls. Flödet av kyla är alltså riktat från höger till vänster. Denna "värme" plus den förbrukade elektriciteten avges som spillvärme till luft, vilket vi ser är det största enskilda energiflödet inom området ca 55 TJ. Som vi ser har kylfaktorn (COP) antagits till 2 för kylmaskinerna. För maskiner som används för beredning, tryckluft, fläktar, pumpar etc har antagits en genomsnittlig verkningsgrad av 50%. För stora elmotorer kan vi ha verkningsgrader över 90% men för tryckluftssystem är verkningsgraden ofta under 10%. Energiförlusten från dessa maskiner antas sedan fördelas lika mellan kylvatten, som värmer avloppsvattnet, och spillvärme till luft.

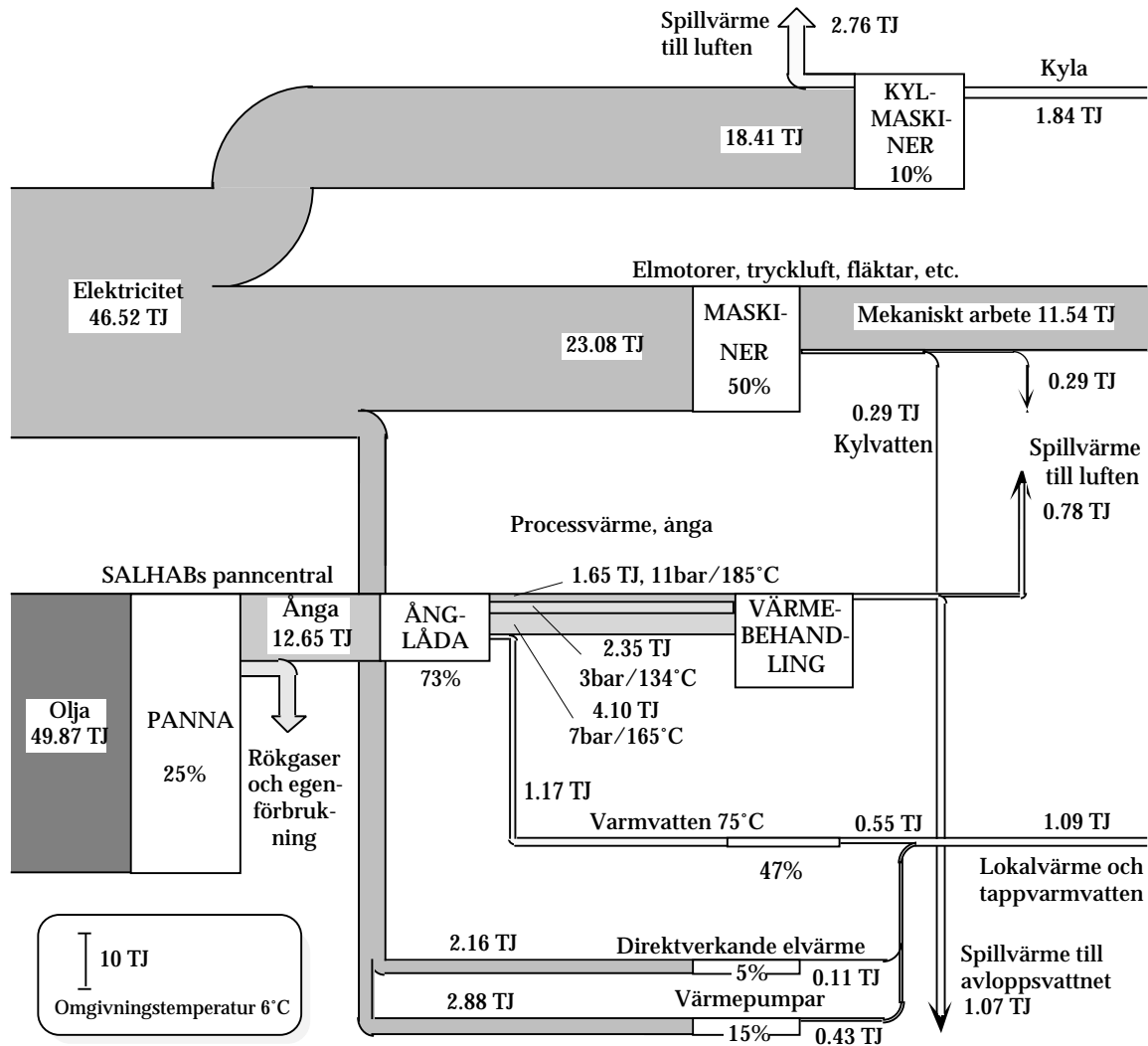
Olja används uteslutande för produktion av ånga via värme. Energiverkningsgraden för panncentralen är 82% och för ånglådan 100%. Tryck och temperatur för den producerade ångan reduceras i ånglådan för att passa de olika värmebehoven inom området. För processvärmnet antar vi för enkelhets skull också en verkningsgrad av 100%. Det använda processvärmnet antas sedan fördelas lika mellan spillvärme till den omgivande luften samt till uppvärmning av avloppsvattnet. Vi ser också att produktionen av varmvatten är betydande, vilket används för diskning etc, men även för uppvärmning under den kalla årstiden. Elektricitet för direktverkande elvärme och drift av värmepumpar, för vilka värmefaktorn antagits till 3, förekommer också, men i mindre skala. Under den kalla årstiden kommer naturligtvis en hel del av spillvärmnet till luft, men också all övrig energi som används inom lokalerna, att bidra till uppvärmningen.

Figur 4.10 beskriver exergiflödet inom området, och som vi ser skiljer sig detta väsentligt ifrån energiflödet i fig. 4.9. För enkelhets skull har den genomsnittliga exergifaktorn för alla värmeflöden och temperaturnivåer för kyla, spillvärme, lokalvärme och tappvarmvatten antagits till 5%. Även om exergifaktorn skulle variera mellan 3 och 10%, medför det ingen väsentlig skillnad för exergiflödet i fig. 4.10.

Vi ser att det är framför allt alla värmeflöden som krympt betydligt. Istället för en "verkningsgrad på 200%" (COP = 2) för kylmaskinerna får vi nu 10%. Detta framstår visserligen som betydligt sämre, men är istället en mer korrekt beskrivning av systemet. Det är således bara att konstatera att vi kan effektivisera kylmaskinerna betydligt. De mest exergiförbrukande processerna är lätta att urskilja. Den största enskilda exergiförlusten återfinns vi i ångpan-



nan. Istället för verkningsgraden 82%, som i energifallet, får vi nu 25.4%. Om vi även tar hänsyn till ånglådan är exergiverkningsgraden bara 18%, trots att ånglådan antas ha en energiverkningsgrad av 100%. Omvandlingen av varmvatten till lokalvärme innebär en exergiverkningsgrad av 47%, direktverkande elvärme har verkningsgraden 5% och eldrivna värmepumpar har verkningsgraden 15%.



Figur 4.10 Exergiflödet för Slakthusets industriområde 1986.

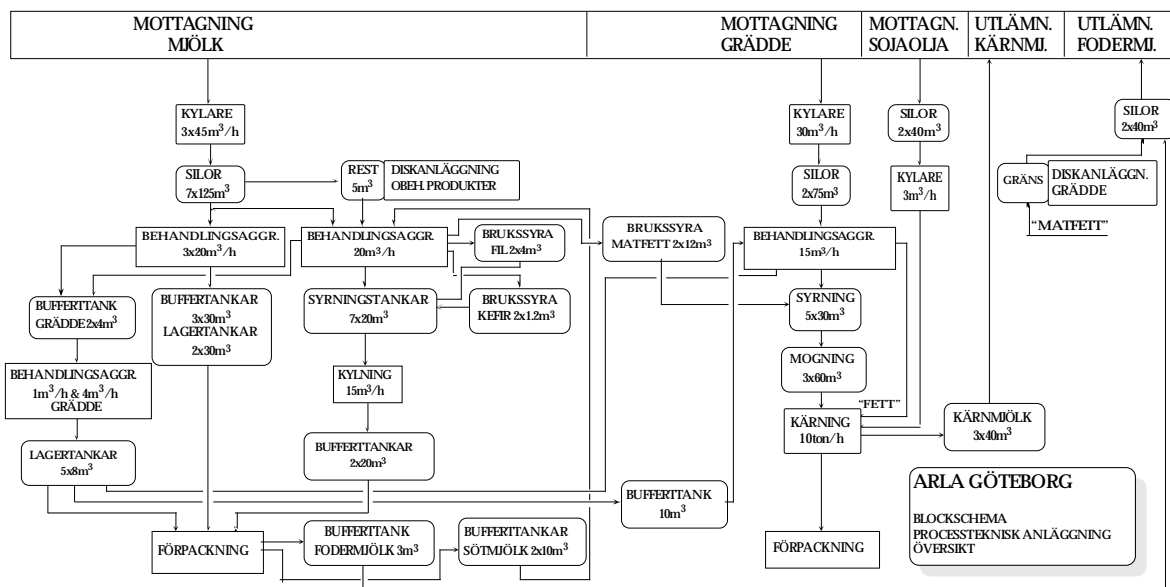
I energidiagrammet framstår förlustflödena till omgivningen som mycket betydelsefulla, men som vi ser i exergidiagrammet saknar dessa något egentligt värde. Istället är det i omvandlingsprocesserna vi skall söka möjligheterna till effektivisering. Exergiflödet avslöjar ju all värme- och kylproduktion som mycket ineffektiv. De stora möjligheterna till effektivisering som avslöjas bör alltså tillvaratas genom en bra planering av det framtida energiförsörjningssystemet inom området. Befintlig spillvärme bör alltså utnyttjas och möjligheter till minskade förluster bör undersökas innan ny

energitillförselsteknik installeras. Och det bör även stimulera tillverkare att utveckla effektivare värme- och kylproduktionsteknik t ex genom kombinerade värmepump-kylmaskiner.

Ett mycket viktigt konstaterande är att energiflödesdiagrammet i fig. 4.9 ger oss ingen hjälp för att upptäcka möjligheterna att effektivisera anläggningen. Det är endast med hjälp av exergidiagrammet i fig. 4.10 vi ser förlusterna och hur anläggningen kan effektiviseras för att minska såväl energibehovet som miljöeffekterna.

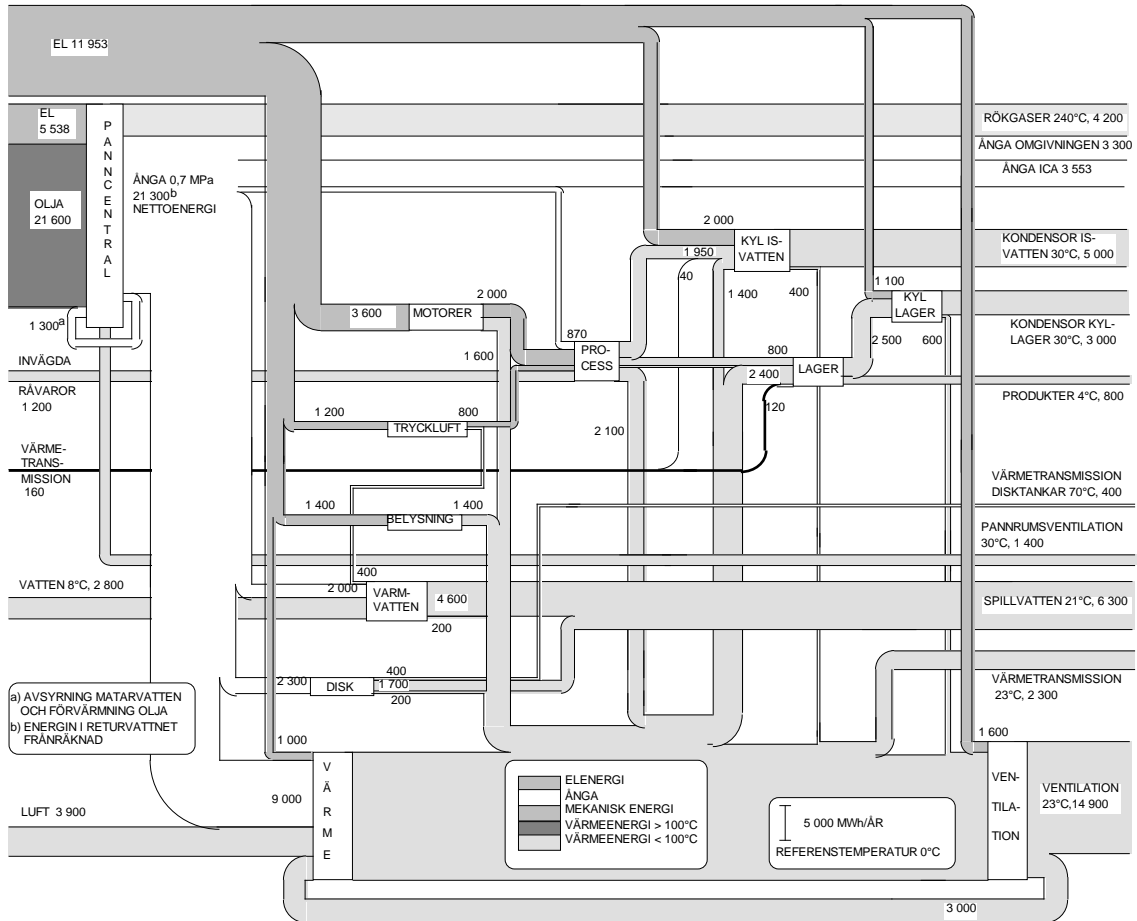
### 4.3.2 Arlas mejeri i Kallebäck

ARLAs mejeri i Kallebäck, Göteborg omsätter ca 400 ton mjölk per dygn, se fig. 4.11. Mjölprodukterna genomgår en omfattande värme- och kylbehandling, och under 1986 omsattes totalt ca 170 000 ton. {Cardfelt, 1987}

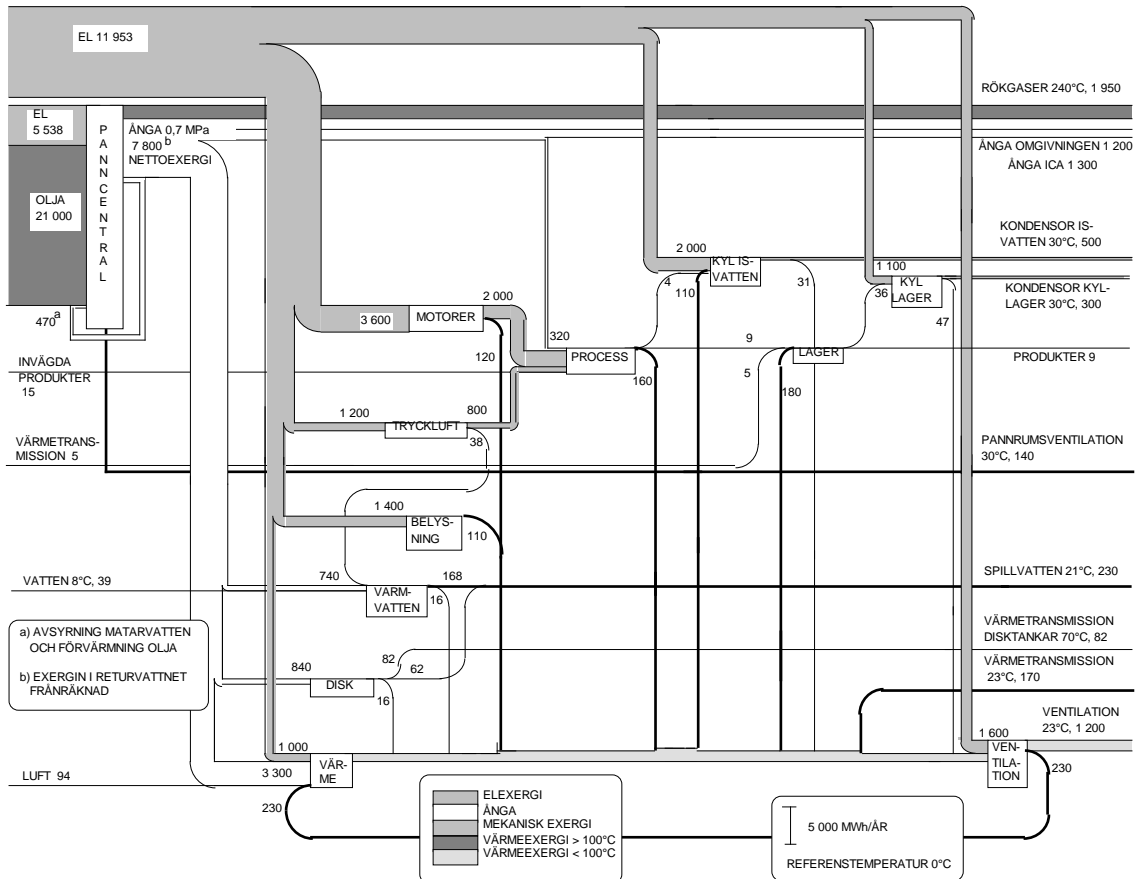


Figur 4.11 Schema över Arlas mejeri i Kallebäck.

Ett energi- och exergiflöde har upprättats över anläggningen, se fig. 4.12 och 4.13. Systemgränsen för anläggningen är "staketet" och byggnadernas ytterväggar och tak. "Processen" har definierats som direkt behandling av mjölken: pumpning, kylning, pastörisering, kärning etc. Omgivningstemperaturen har valts till 0°C och omgivningens relativa luftfuktighet till 50%.



Figur 4.12 Energidigram över Arlas mejeri i Kallebäck.



Figur 4.13 Exergidiagram över Arlas mejeri i Kallebäck.

Exergin i produktflödet avser endast värmeexergi. Förändringar i exergin beroende på ändring i koncentration och sammansättning bedöms vara försumbara då processen inte innefattar kemiska förändringar som antas påverka exergiinnehållet.

Av energiflödet, fig. 4.12, framgår att energin till stor del är värmeflöden vid låg temperatur. I exergidiagrammet, fig. 4.13, blir dessa värmeflöden mycket små. Exergiverkningsgraden i panncentralen där olja och el omvandlas ånga är endast ca 28%. De stora energiförlusterna med utflödena är som tidigare skenbara. Som framgår av in- och utflödena till de olika omvandlingsenheterna i exergidiagrammet, sker de stora förlusterna vid dessa omvandlingar. Det är således endast genom en effektivisering av dessa som stora energi- och exergibesparingar kan göras. Hushållning med värme som varmvatten, uppvärmning och ventilation innebär omedelbara besparingar. Då värmen produceras med låg exergiverkningsgrad blir energibesparingen stor om värmeflödet minskas. Installering av återvinningsaggregat för värmning av ingående ventilationsluft är därför ett bra exempel på en lämplig effektiviseringsåtgärd.

På samma sätt som för Slakthuset har vi här en samtidig produktion och omsättning av värme och kyla, vilka produceras i separata system. Detta gör det extra viktigt att dessa medier hålls väl åtskilda så att inte värme "läcker över" från de varma till de kalla flödena eftersom det innebär att vi då måste tillföra både mer värme och mer kyla. Att användande av ånga som energibärare istället för hetvatten ger i allmänhet större förluster, då temperaturdifferensen till omgivningen blir betydligt högre. Eftersom behovet av temperaturer över eller kring 100°C är mycket begränsat kan hetvatten av normalt tryck användas i stället för ånga, vilket skulle spara exergi.

Tabell 4.1 Inflöden av energi och exergi vid Arlas mejeri i Kallebäck 1986.

Inflöden [MWh]	Energi	Exergi
El	17491	17491
Olja	21600	21000
Värmetransmission	160	6
Luft	3900	94
Vatten	2800	39
Invägd mjölk m m	1200	15
<b>Totalt</b>	<b>47151</b>	<b>38645</b>

En sammanställning över in- och utflöden av energi och exergi i anläggningen kan göras, se tab. 4.1 och 4.2. Som vi ser uppstår stora skillnader mellan energi- och exergiflödena då energin är i form av värme som för luft, vatten och ventilationsluft.

Tabell 4.2 Utflöden av energi och exergi vid Arlas mejeri i Kallebäck 1986.

Utflöden [MWh]	Energi	Exergi
Rökgaser	4200	1950
Ånga ut	3300	1200
Ånga ICA	3553	1300
Kondensor isvatten	5000	500
Kondensor kylager	3000	300
Spillvatten	6300	230
Värmetransmission	2700	252
Ventilationsluft	14900	1200
Pannrumsventilation	1400	140
Produkter	800	9
<b>Totalt</b>	<b>45153</b>	<b>7081</b>

Energiutbytet i anläggningen blir enligt tab. 4.1 och 4.2 ca 96% medan exergiuutbytet endast blir 18%. Således finns stora möjligheter till effektiviseringar.

#### 4.4 Bilen som transportmedel

Bilen svarar för den största exergiförbrukningen inom transportsektorn, vilket framgår av fig. 3.13 och 3.16. I fig. 4.14 återfinns exergiomsättningen för en bil som körs ca 1500 mil. Som vi ser sker stora förluster av exergi och endast en bråkdel eller ca 0.6% används för att flytta personer eller varor. De mesta av arbetet används ju för att flytta själva bilen — 1000 kg stål etc. Arbeta eller exergi åtgår, som tidigare nämnts, för att accelerera en kropp samt för att motverka luftmotstånd och friktion mot vägbanan.

Exergiuutbytet för bilen, som transportmedel är alltså ca 0.6 procent, dvs för att flytta göteborgaren 1500 mil med bil används 1500 liter bensin när utbytet endast är 0.3 GJ eller 9 l bensin. Dessutom "kostar" det ca 25 GJ exergi för att tillverka och underhålla en bil. Härtill kommer byggnation och underhåll av vägar. Det redan låga exergiuutbytet blir alltså ännu lägre om man också tar

hänsyn till "kringkostnaden". Här erbjuder cykeln och de kollektiva transportmedlen ett vettigt alternativ även i många andra avseenden — inte minst trafiksäkerheten. Transportbehovet kan också ses som resultatet av en bristande samhällsplanering. Genom ett bättre utnyttjande av våra hus och en större samordning av olika samhällsfunktioner blir många transporter onödiga, se skissen på huset i fig. 4.15.

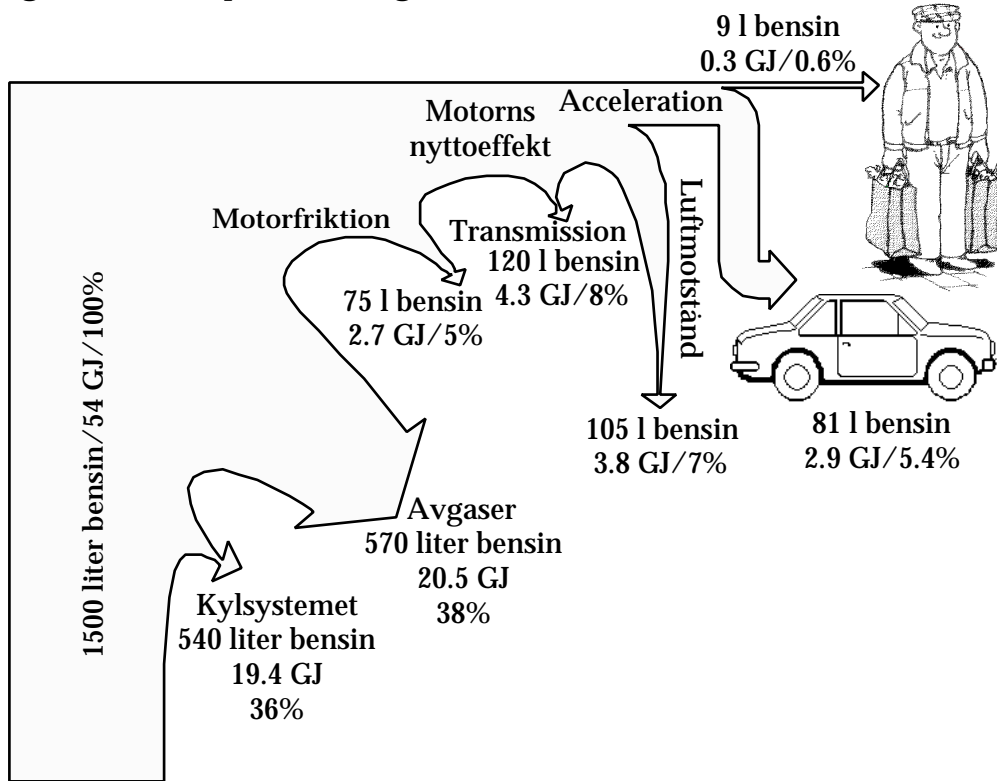


Fig. 4.14 Exergiomsättningen för en bil som körs ca 1500 mil.

Det största arbetet i en bilmotor går faktiskt åt till att "trycka undan" omgivning för att avgaserna skall få plats, se fig. 4.14. Då bensinen som är en vätska övergår till gas i bilmotorn ökar dess volym betydligt. Denna volymökning innebär att avgaserna tar mer plats än den ingående luften och bensinen, och volymändringen gör att omgivningen måste tryckas undan. Att trycka undan  $1 \text{ m}^3$  erfordrar ett arbete — en exergi — av 100 000 J eller 30 Wh.

För en elbil skulle motsvarande effektivitet bli ca 1.5% om vi räknar med samma massa för själva bilen, dvs en fördubbling av utbytet jämfört med bensinbilen. Om elen produceras i fossileldade värmekraftverk blir vinsten däremot försumbar. Valet av elproduktionsanläggning är således viktig, vilket talar till vindkraftens fördel. För en elmoped, som ju även kan göras täckt, blir effektiviteten ännu bättre eller ca 10% om mopeden görs lätt. Ett eldrivet fordon kan dessutom förses med bromsar som genererar elektricitet för laddning av batterierna, vilket ytterligare förbättrar effektiviteten.

En vanlig cykel framstår dock som det helt överlägsna transportmedlet på land för kortare sträckor. Dessutom ger det nyttig motion.

#### 4.5 Huset

De så typiska göteborgska landshövdingehusen har många fördelar — de erbjuder ett vettigt mellanting mellan höghus och villa — och skulle med enkla medel kunna byggas om till hus i ett resurssnålt och miljövänligt samhälle, se fig. 4. 15 nedan.

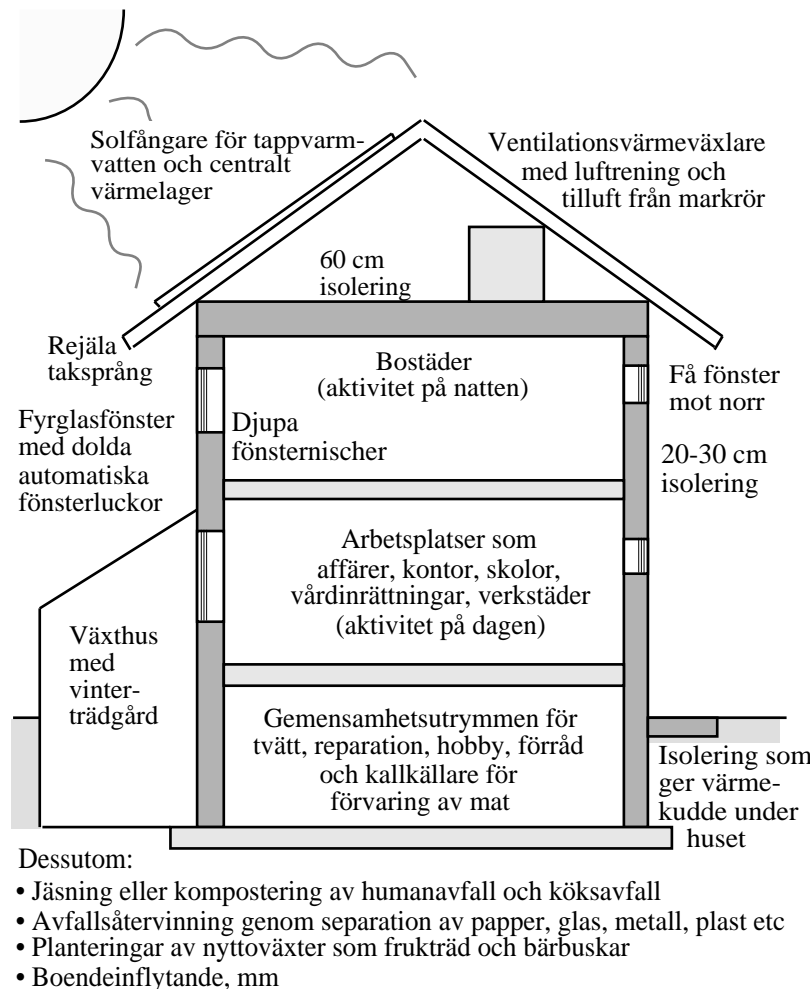


Fig. 4.15 Hus för ett resurssnålt och miljövänligt samhälle.

Ordentlig värmeisolering och ombyggnad av flerfamiljshus skulle innebära att behovet av energiresurser minskade samtidigt som fler arbeten skulle erbjudas just där människor bor. En ombyggnad enligt fig. 4.15 — innebär att behovet av uppvärmning och transporter reduceras till ett minimum — våra hus skulle t o m kunna producera värme i överskott från solfångare på taken. På Rundradiogatan 12 i Göteborg har man kommit en bit på väg med ett 3-vånings smalhus från 1953. Med hjälp av ett sinnrikt

**solfångarsystem och luftkanaler i fasaden har Christer och Kerstin Nordström reducerat uppvärmningsbehovet med en tredjedel. {Nordström 1987}**



## 5 EPILOG

### 5.1 Exergibegreppet i samhällsplaneringen

Alla levande system befinner sig i ett flöde av exergi, som energi, materia och/eller information. De mottar exergirika flöden och avger exergifattiga flöden. Resultatet blir en nettotillförsel av exergi, vilket håller systemet vid liv. I levande organismer från enskilda celler till det globala samhället används exergi för att driva metaboliska processer och för att upprätthålla och utveckla strukturer från molekylnivå och uppåt. Det är därför viktigt att förstå hur exergi omvandlas. Exergibegreppet bör alltså vara användbart inom all beskrivning av sådana system.

De metaboliska processerna i samhället beskrivs vanligen inom ekonomin men även inom övriga samhällsvetenskaper. Även dessa processer drivs med exergi. Samhällsvetenskapliga och ekonomiska studier av samhällen borde därför kompletteras med studier av exergiomsättningen.

Exergi är ett naturvetenskapligt begrepp som kan användas för att beskriva den verklighet vi lever i. Oklara begrepp som energi och bristande konventioner kan förhindra eller fördröja att viktiga resursproblem angrips på ett rationellt sätt. Exergibegreppet är ingen omedelbar lösning på resursförsörjningen och miljöproblemen utan ett hjälpmedel för att beskriva resursomsättningen i samhället. Ofta hävdas att exergibegreppet är oanvändbart då det relateras till omgivningen, men detta är istället det värdefulla med exergibegreppet. Det mänskliga samhället måste leva i harmoni med naturen och mänsklig verksamhet måste anpassas till omgivningen. Alla resursuttag och miljöutsläpp påverkar naturen och denna påverkan är starkt kopplad till exergimängden i uttaget eller utsläppet. Exergibegreppet är därför ett mycket värdefullt hjälpmedel i samhällsplaneringen.

### 5.2 Huset — en viktig komponent i ett resursnått och miljövänligt samhälle

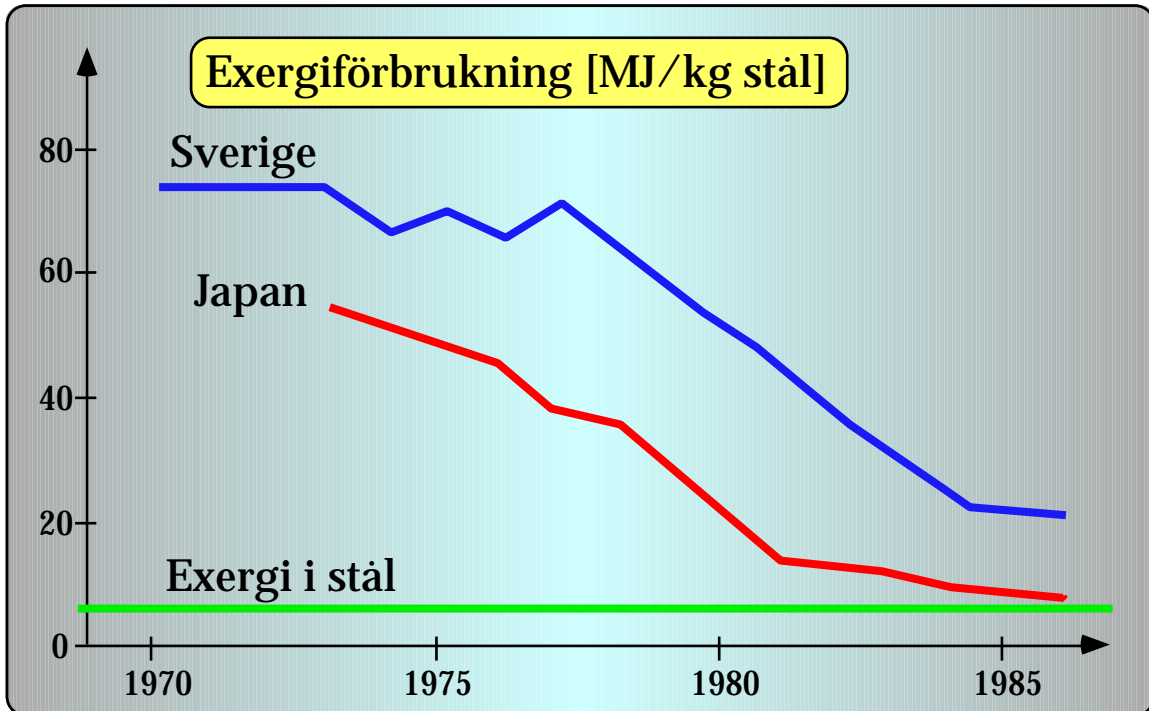
Dagens hus är ett bra exempel på hur bristen på exergitänkande och helhetssyn innebär allvarliga konsekvenser resursförbrukningen och miljön. Bostaden har en central roll i vårt samhälle. Den utgör bl a ett skydd mot regn och kyla och en samlingsplats för familjen och innebär värme och trygghet. Men den kommersialisering som utarmat det mesta i vårt samhälle allt ifrån julfriden till sexualdriften har även drabbat bostaden och huset. Tidigare

kunde varje bondson bygga sitt eget hus utifrån de material och förutsättningar som stod till buds — resurseffektivt och miljövänligt. Idag bygger vi hus som ofta inte ens klarar de mest elementära kraven på hygien — “sjuka hus”. Moderna hus tenderar också alltmer att bli konsumtionsvaror med en allt kortare livslängd. Förr utsmyckade vi också våra hus, förmodligen utan att ens fundera över lönsamheten — snickarglädje eller kultur kallas det. Idag genomsyras nästan allt vi gör av krav på lönsamhet. Ibland till den grad att våra behov att utföra känslomässigt engagerande handlingar, utan minsta tanke på lönsamhet, tar alltmer absurda uttryck. Vi lagar den industriellt framställda maten i mikrovågsugn för att hinna i tid till bingolokalen eller solariet. Kort sagt ett hus borde stå för mycket mer än en kapitalplacering.

Uformningen av våra bostäder och vår närmiljö utgör grunden för hur vårt samhälle kommer att fungera i stort. Efter andra världskriget har vi flyttat isär samhällsfunktioner som bostad, arbete, skola, affärer och vård till allt större enheter. Detta har i sin tur inneburit att bilen och privata transporter fått en allt mer dominerande roll i samhället. Det är inte ovanligt med två timmars bilresa per dag för att klara livets nödtorft. Resursanvändningen har härigenom ökat, men också slöseriet, vilket förklarar den stora ökningen. Resursanvändningen kan alltså minskas genom att återskapa närheten till arbete och service. Våra hus kan t ex, som tidigare, rymma fler samhällsfunktioner i samma byggnad. Dessutom bör husen vara välisolerade och av högre kvalitet. Jag tror att de flesta människor vill bo i ett mellanting mellan höghus och villa. Två- till trevånings flerfamiljhus, enligt avsn. 4.5 ovan, med närhet till arbete, natur och service tror jag tilltalar folk mer än många av dagens alternativ.

### **5.3 Ett rationellt resurssystem baserat på en integration av produktion och konsumtion**

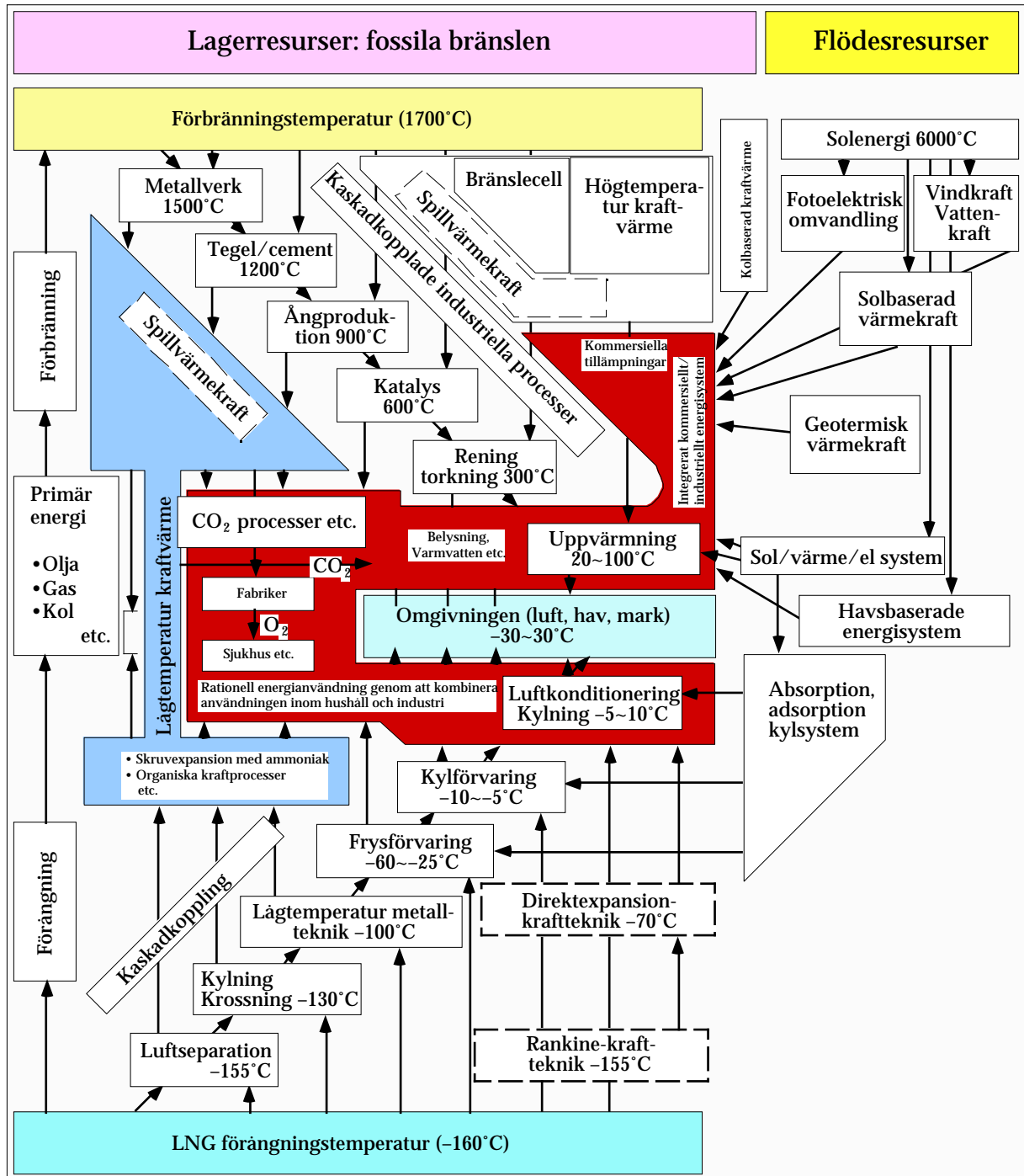
Industrin har under de senaste åren effektiviserats genom en massiv satsning på energibesparande åtgärder. Så har t ex energiåtgången för varor som stål och papper minskat avsevärt. Svensk industri omsätter trots detta omkring dubbelt så mycket energi i sin stålproduktion som den japanska, se fig. 5.1, där utvecklingen i Sverige och Japan för stålproduktionen jämförs. Som vi ser är svensk stålindustri ca 5 år efter den japanska, som är effektivast i världen och idag i stort sett nåt den teoretiska gränsen för effektiviteten, dvs exergin i stål, se fig. 5.1.



Figur 5.1 Exergiförbrukningen vid stålproduktionen i Sverige och Japan.

En större mängd arbete kan utvinnas ur en given värmemängd vid hög temperatur än vid låg temperatur eftersom exergin ökar med temperaturen. (Förutsatt naturligtvis att temperaturen överstiger omgivningstemperaturen.) Och som vi sett innebär det stora exergiförluster och onödig miljöpåverkan då bränslen eller el används för att direkt omvandlas till rumsvärme. Energiverkningsgraden må vara 100%, men exergiverkningsgraden är ofta långt mindre än 5%.

I Japan görs därför idag stora ansträngningar för att anpassa industrins värmebehov till rätt temperaturnivå, även under omgivningens temperatur, som för flytande gas (LNG). LNG lagras vid  $-160^{\circ}\text{C}$  och förångas vanligen med havsvatten, vilket medför stora exergiförluster då den kalla gasen värms till omgivningstemperatur. Denna exergi skall istället utnyttjas av industrin. Genom att kaskadkoppla verksamheter enligt fig. 5.2 {Kashiwagi, 1990} kan samma energi utnyttjas flera gånger, dvs exergin tillvaratas optimalt.



Figur 5.2 En integrerad resursomsättning.

För framtiden är ett oskadliggörande av CO<sub>2</sub>, en effektivare exergianvändning och en samordning av produktion och konsumtion viktiga delar i ett mer livskraftigt samhälle. Varje tekniskt system måste därför anpassas till sin omgivning, både tekniskt och miljömässigt. Dessutom måste framtida teknik underlätta en integration av produktions- och konsumtionssystemen i samhället. På kommunal nivå innebär detta en övergripande och väl optimerad omsättning av energi och material. Där måste hela omsättningen från "vaggan till graven" rymmas, dvs från brytningen eller importen av

råvaror till hanteringen av avfall och restprodukter — det vi idag kallar kretsloppsteknik. Effektiviseringen av resursanvändningen måste alltså riktas mot hela resurssystem istället för enskilda komponenter. Precis som vi diskuterade i anslutning till den svenska exergiomsättningen är det viktigt att betrakta hela systemet vid optimeringen och inte en del i taget.

## 5.4 Hinder mot ett resursnått och miljövänligt samhälle

### Bakgrund eller Hur kunde det bli så här?

Teknikutvecklingen handlar idag mer om eleganta bilkarosser än nya effektiva transportsystem eller kosmetisk husdesign istället för välisolerade och välbyggda hus och den militära tekniska utvecklingen gränsar idag till rent vansinne. Den tekniska forskningen och utvecklingen har i många fall fastnat i detaljstudier utan något perspektiv på helheten. Detta illustrerades tydligt i exemplet med resurskedjan: kärnkraft - elektricitet - bostadsvärme i fig. 3.15 ovan. Forskningen och utvecklingen bör också till någon del behandla systemaspekter. Idag är den nästan enbart inriktad på avgränsade teknikområden dvs förbättringar av enskilda komponenter. En mer övergripande analys av energiomsättande system innebär en större överblick och ibland nya oanade lösningar på gamla problem. En alltför massiv satsning på komponenter istället för systemaspekter kan i olyckliga fall också leda till att nya effektivare lösningar hålls tillbaka.

### Dagens ekonomi och politik — ett hinder för en resurshushållning

Ett bekymmer i detta sammanhang är en ibland begränsad förmåga att inte se skillnad på kostnader av olika slag i skilda sammanhang. Låt oss ta följande exempel: en krona investerad i energibesparande åtgärder eller samma krona till olja för uppvärmning. Det första fallet innebär att kronan stannar inom landet i form av sysselsättning och investeringar — arbete och kapital. En fortsatt oljekonsumtion betyder ökade utlandsskulder och sämre miljö — skulder och miljöförstöring. På sikt innebär detta alltså kostnader som vi ännu inte bryr oss om utan överlämnar till kommande generationer.. Enkla kostnadskalkyler har således inte mycket med planeringen av ett lands resurshushållning att skaffa.

Ett annat exempel är politikernas tafatta försök att spara resurser genom att spara in på arbete. Samhällets budgetunderskott kan endast minskas genom att spara på samhällets utgifter, inte genom att arbeta mindre dvs att minska lönekostnaderna genom att friställa arbetskraft. Samhällets stora utgifter är i

detta sammanhang importerade resurser som olja och uran. Samhällets oförmåga att utnyttja den viktiga resurs som medborgarnas arbetskraft innebär är bara en annan form av slöseri. En person kostar dessutom samhället mer som arbetslös förutom att det innebär ett fruktansvärt personligt lidande.

En massiv satsning på energibesparingsåtgärder som isolering av flerfamiljshus skulle innebära att behovet av energiresurser minskade samtidigt som fler arbeten skulle erbjudas just där människor bor. En ombyggnad enligt fig. 4.15 innebär att behovet av uppvärmning och transporter reduceras till ett minimum. Vi skulle, på sikt, klara oss utan både oljepannor och kärnkraftverk. Sveriges naturrikedomar som skog och vattenkraft skulle kanske t o m kunna komma andra länder till del. Det som hindrar detta synsätt är det inskränkta och kortsynta ekonomiska tänkande som dominerar i dagens samhälle. Där gäller de snabba klippen.

### **Framtiden skall vi skapa tillsammans**

I diskussionen om vilken framtid vi vill ha kan och måste vi alla delta. Här saknas vetenskapliga metoder och begrepp. Man kan nämligen inte studera eller forska på något som inte existerar. Precis som de gamla romarna går vi med ryggen in i framtiden och ser historien framför oss. Föreställningen om att vi skulle gå med ansiktet in i framtiden kan bara gälla om vi samtidigt blundar. Det blir då också svårt att se bakåt. En liknelse som verkar påfallande bekant i perspektivet av den rådande resurs- och miljösituationen. Dåtiden eller historien kan man sålunda utforska, och framskrivningar, prognoser, scenarier etc kan upprättas på basis av denna forskning.

Varje förslag till framtidsstrategi återspeglar vissa mål, mer eller mindre uttalade. Dessa bygger i sin tur på en moral, vilken skall uttalas och ifrågasättas av alla i en demokrati. Ibland framgår moralen och målen tydligt:

*“Vårt land skall bidra till att skapa en rättvisare fördelning av de globala tillgångarna och till skyddet av de grundläggande livsbetingelserna i vår värld. Internationella hänsyn måste därför spela in när vi planerar vår förbrukningsnivå och energiproduktionens fördelning på energikällor.” (Föredragande statsministern i Prop 1975:30, Energihushållning m m, sid 9)*

Politikerna i en demokrati har i detta sammanhang ett ofrånkomligt ansvar. En stor risk vid presentation av strategier för framtiden är att moralen döljs t ex

bakom tekniska visioner. Alltför många framtidstudier är talande exempel på detta. Ett undantag är dock en framtidsstudie från Centrum för tvärvetenskapliga studier av människans villkor, Göteborg universitet, *Sverige 2020 – en framtid för människor*, (Eriksson & Eriksson, 1980):

“Våra utgångspunkter för bilden av Sverige år 2020 är i huvudsak två,

i) att de tekniska och ekonomiska systemen bör tjäna människorna, förse dem med vad de behöver och ge dem handlingsutrymme i stället för att härska över dem

ii) att Sverige aktivt arbetar för global utveckling mot fred och jämlikhet, en process som pågår men som är långtifrån avslutad år 2020.”

Den viktigaste frågan för framtiden är den orättvisa resursfördelningen på jorden. Den rika världen bär här det största ansvaret till att detta förhållande upprätthålls och i vissa fall förvärras. Orättvisan i världen har aldrig tidigare drabbat så många människor. Vi vet om den och vi möter den i våra barns frågor. Själva gömmer vi oss bakom tal om bistånd och en växande materiell konsumtion allt medan massmedia underhåller oss i rollen som “hovnarr”. Våra folkvalda beslutsfattare är fullt upptagna att registrera och protokollföra hur katastrofen fortskrider istället för att förebygga den. T o m framtidsstudier tenderar att bli lovsånger över den rådande teknologiska och ekonomiska inriktningen.

Inför en utredning om framtidsstudier i Sverige, *Att välja framtid* (SOU 1972:59), uttalade statsministern följande (Pressmedelände från stadsrådsberedningen, 4.5.1971):

“Ett viktigt och nödvändigt medel blir att vi själva studerar framtiden, för oss och för vår omvärld, och gör det utifrån demokratiska målsättningar och med uttalade krav på internationell solidaritet. På så vis kan den lilla staten skapa opinion för andra möjliga alternativ om hur framtidens värld bör vara beskaffad.”

Det är viktigt att konstatera att framtidsstudier skall inkludera vår omvärld samt att kraven på internationell solidaritet skall vara uttalade.

Framtidsfrågor kan därför inte bedrivas vid sidan av den övriga samhällsdebatten utan måste utgöra en naturlig del i denna. Framtidsfrågor kan inte

heller bedrivs av enbart specialister vid särskilda institutioner. Framtidsfrågor måste behandlas på ett sådant sätt att alla människor i samhället kan ta del i debatten om vi vill upprätthålla demokratin.

*“– Framtidsskapande verksamhet måste som ett viktigt element innehålla fördjupning av den demokratiska processen, ökat informationsutbyte mellan olika aktörer och garantier för medborgarnas deltagande i beslutsfattandet.”*  
(SOU 1972:59, sid 12)

Slutsatsen av detta blir att vi på allvar måste börja diskutera våra samhällsmål och börja inse att det är vi som måste forma vår framtid så att den blir som vi vill. Samhället måste skapas av alla människor genom vår vilja och våra önskemål inte av vad som passar tekniken eller några få människor i världen.

Anledningen till att detta avsnitt framförallt refererar till källor från 70-talet beror på att framtidsfrågorna, såväl som många andra viktiga frågor, kom att skjutas åt sidan under 80-talet. Decenniet då miljonbelopp satsades på energiforskning utan överblick och samordning. Resultaten kan enkelt sammanfattas i Vattenfalls nyligen konstaterade faktum att dansk småskalig vindkraft idag producerar el till en kostnaden som understiger kostnaden för el från våra senast byggda kärnkraftverk i Sverige. {Kåberger 1992} För 20 år sedan hade vi en konkurenskraftig verkstadsindustri som kunde gått från tillverkning av fartyg till tillverkning av vindkraftverk. Vi hade god kompetens vad gäller elkraftteknik och aerodynamik. Vi hade således idag kunnat varit världsledande på vindkraftsområdet — istället har vi kanske snart ingen industri alls kvar i Sverige. Med tanke på den epidemi som drabbar våra hus — de sjuka husen — framstår 80-talet således alltmer som mer än ett förlorat decennium, då vi fortfarande har mycket att lära.

Låt därför 90-talet bli ett decennium av eftertanke och självrannsakan. Genom att rusta oss med begrepp som exergi, en helhetsyn och en samhällsordning som bättre tillvaratar alla människors behov och förmåga kan vi skapa en livskraftig framtid.



## APPENDIX A

### Härledning av exergibegreppet

Antag ett system A i en stor homogen referensomgivning (reservoir)  $A_0$  som beskrivs av de intensiva parametrarna  $T_0$ ,  $p_0$  och  $\mu_{i0}$  (temperatur, tryck och kemisk potential). Låt de intensiva parametrarna för A betecknas  $T$ ,  $p$  och  $\mu_i$ . De extensiva parametrarna för A och  $A_0$  betecknas  $U$ ,  $V$ ,  $S$  och  $N_i$  (inre energi, volym, entropi och antal mol av olika kemiska substanser) respektive  $U_0$ ,  $V_0$ ,  $S_0$  och  $N_{i0}$  för  $A_0$  (Fig. A.1 nedan). Antag att alla extensiva parametrar för A är mycket mindre än motsvarande parametrar för  $A_0$  och vidare att det totala systemet  $A \cup A_0$  är isolerat från omgivningen fränsett arbete  $W$  som på ett kontrollerat sätt tas ur det totala systemet,

$$\begin{cases} U \ll U_0 \\ V \ll V_0 \\ N_i \ll N_{i0} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{cases} U + U_0 + W = \text{konstant} \\ V + V_0 = \text{konstant} \\ N_i + N_{i0} = \text{konstant} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Antag vidare att A och  $A_0$  var för sig i jämvikt. Växelverkan mellan A och  $A_0$  kan ske under kontroll längs systemgränsen. På grund av den relativa litenheten hos A (ekv. A.1), påverkas inte de intensiva parametrarna i  $A_0$  av ändringar i A, dvs

$$\begin{cases} dT_0 = 0 \\ dp_0 = 0 \\ d\mu_{i0} = 0 \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Differentialen av ekv. A.2 är

$$\begin{cases} dU_0 + dU + dW = 0 \\ dV_0 + dV = 0 \\ dN_{i0} + dN_i = 0 \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

där  $dW$  är energi taget ur det totala systemet som yttre arbete.

Enropidifferensen för reservoiren  $A_0$  är enligt termodynamiken

$$dS_0 = \frac{dU_0 + p_0 dV_0 - \sum_{i=1}^n \mu_{i0} dN_i}{T_0} \quad (\text{A.5})$$

som med hjälp av ekv. A.4 kan transformeras till

$$dS_0 = - \frac{dU + p_0 dV - \sum_{i=1}^n \mu_{i0} dN_i}{T_0} - \frac{dW}{T_0} \quad (\text{A.6})$$

Den totala entropidifferensen hos det totala systemet blir

$$dS^{\text{tot}} = dS + dS_0 = - \frac{dU + p_0 dV - T_0 dS - \sum_{i=1}^n \mu_{i0} dN_i}{T_0} - \frac{dW}{T_0} \quad (\text{A.7})$$

Detta kan skrivas (se (55) )

$$dS^{\text{tot}} = - \frac{1}{T_0} (dE + dW) \quad (\text{A.8})$$

där

$$E = U + p_0 V - T_0 S - \sum_{i=1}^n \mu_{i0} dN_i \quad (\text{A.9})$$

Om Gibbs relation

$$U = TS - pV + \sum_{i=1}^n \mu_i N_i \quad (\text{A.10})$$

införs i ekv. A.9 fås

$$E = S(T - T_0) - V(p - p_0) + \sum_{i=1}^n N_i (\mu_i - \mu_{i0}) \quad (\text{A.11})$$

vilket betyder att E försvinner vid jämvikt, dvs

$$\begin{cases} T = T_0 \\ p = p_0 \\ \mu_i = \mu_{i0} \end{cases} \Leftrightarrow E \equiv 0 \quad (\text{A.12})$$

Storheten  $E$  definierad i ekv. A.9 kallas **exergi**. För att förstå innebörden i denna storhet låt oss antaga att system A går mot jämvikt med sin omgivning  $A_0$  och att arbetet  $\Delta W$  utförs vid denna process. Antag också att den totala

entropin  $S^{\text{tot}}$  ändras med  $\Delta S^{\text{tot}}$ . Exergin ändras med mängden  $-E$  från  $E$  till 0. Då fås frånekv. A.8 att

$$\Delta S^{\text{tot}} = - \frac{(-E + \Delta W)}{T_0} \quad (\text{A.13})$$

eller

$$\Delta W = E - T_0 \Delta S^{\text{tot}} \quad (\text{A.14})$$

Eftersom

$$\Delta S^{\text{tot}} \geq 0 \quad (\text{A.15})$$

enligt termodynamikens andra huvudsats fås att

$$\Delta W \geq E \quad (\text{A.16})$$

där likheten gäller då  $\Delta S^{\text{tot}} = 0$ , dvs för reversibel process.

Alltså är exergin  $E$  det maximala arbete som kan utvinnas ur ett system  $A$  under växelverkan med sin (referens-) omgivning  $A_0$ .

Låt nu  $U_{\text{eq}}$ ,  $V_{\text{eq}}$ ,  $S_{\text{eq}}$  och  $N_{i, \text{eq}}$  beteckna de extensiva parametrarna för systemet  $A$  efter det att fullständig jämvikt med omgivningen har uppnåtts. Då gäller att  $E_{\text{eq}} = 0$  och enligt ekv. A.9 får vi

$$0 = U_{\text{eq}} + p_0 V_{\text{eq}} - T_0 S_{\text{eq}} - \sum_{i=1}^n \mu_{i0} N_{i, \text{eq}} \quad (\text{A.17})$$

som subtraherat från ekv. A.9 ger

$$E = U - U_{\text{eq}} + p_0(V - V_{\text{eq}}) - T_0(S - S_{\text{eq}}) - \sum_{i=1}^n \mu_{i0}(N_i - N_{i, \text{eq}}) \quad (\text{A.18})$$

Utvidgning av denna härledning av exergi till mer generella fall med gravitationsenergi, elektromagnetiska och/eller mekanisk energi är analog.

Utgående från ekv. A.9 kan begränsade termodynamiska potentialer som Gibbs fria energi  $G$  och  $G_0$ , Helmholtz fria energi  $F$  och  $F_0$  samt entalpin  $H$  härledas som specialfall av exergin  $E$ ,

$$G = U + pV - TS \quad \text{dvs } \Delta E = \Delta G \quad \text{då } \Delta N_i = 0, p = p_0 \text{ och } T = T_0$$

$$\begin{array}{lll}
 G_0 = U + p_0V - T_0S & \text{dvs } \Delta E = \Delta G_0 & \text{då } \Delta N_i = 0 \\
 F = U - TS & \text{dvs } \Delta E = \Delta A & \text{då } \Delta N_i = 0, \Delta V = 0 \text{ och } T = T_0 \\
 F_0 = U - T_0S & \text{dvs } \Delta E = \Delta A_0 & \text{då } \Delta N_i = 0 \text{ och } \Delta V = 0 \\
 H = U + pV & \text{dvs } \Delta E = \Delta H & \text{då } \Delta N_i = 0, \Delta S = 0 \text{ och } p = p_0
 \end{array}$$

Exergi är ett fysiskt mått på om ett system avviker från omgivningen. Det är ofta värdefullt att se vad en lokal omgivning, som avviker från den globala omgivningen, betyder för ett systems exergiinnehåll. Antag en lokal omgivning  $A_L$  till system A i en global omgivning  $A_0$ , se fig. A.2. Då har vi en ”lokal” exergi.

$$E_L = U + p_LV - T_LS - \sum_{i=1}^n \mu_{iL}N_i \quad (\text{A.19})$$

och en ”global” exergi, ekv. A.9:

$$E = U + p_0V - T_0S - \sum_{i=1}^n \mu_{i0}N_i \quad (\text{A.9})$$

Med sambandet

$$E = E_{L0} + E_L \quad (\text{A.20})$$

där  $E_{L0}$  ger bidraget i exergi pga skillnad mellan lokal och global omgivning,

$$E_{L0} = (T_L - T_0)S - (p_L - p_0)V + \sum_{i=1}^n (\mu_{iL} - \mu_{i0})N_i \quad (\text{A.21})$$

som enligt (A.11) är exergin för A men med de intensiva parametrarna för  $A_L$  istället för A. Uppenbarligen är  $E_{L0}$  ingen exergifunktion och är därför inte positivt definit.

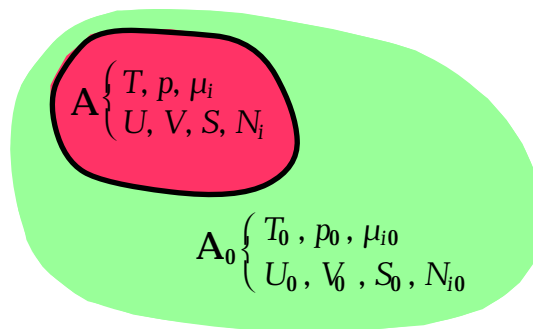


Fig. A.1 System A i en omgivning  $A_0$ .

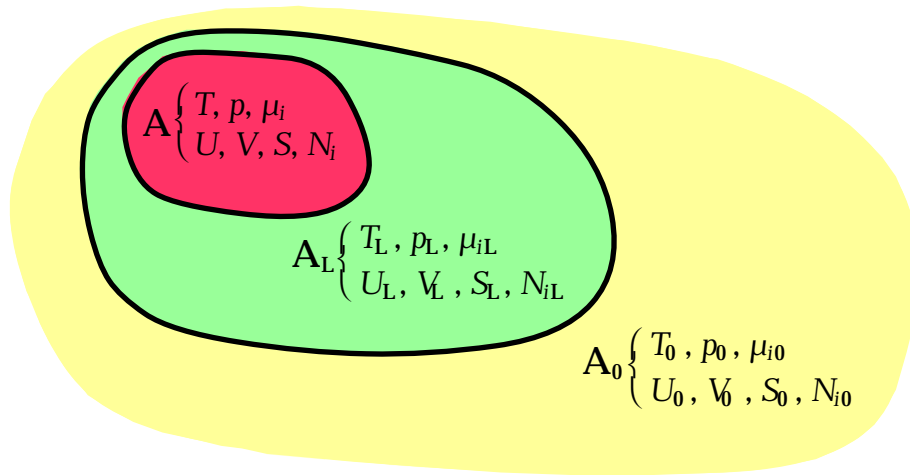


Fig. A.2 System A i en lokal omgivning A<sub>L</sub> i en omgivning A<sub>0</sub>.

## APPENDIX B

### Exergiinnehållet i material

Antag att temperaturen  $T$  och trycket  $p$  är konstanta dvs  $T = T_0$  och  $p = p_0$  så gäller enligt ekv. A.11:

$$E = \sum_{i=1}^n N_i (\mu_i - \mu_{i0}) \quad (\text{B.1})$$

Från den kemiska jämviktsläran fås att den kemiska potentialen för ämne  $i$  kan skrivas

$$\mu_i = \mu_i^0 + \bar{R} T_0 \ln a_i \quad (\text{B.2})$$

där  $a_i$  är aktiviteten för ämne  $i$  och  $\mu_i^0$  är kemiska potentialen för ämne  $i$  relativt sitt referenstillstånd.

Vidare gäller att

$$a_i \propto c_i \quad (\text{B.3})$$

där  $c_i$  är koncentrationen av ämne  $i$ . Med hjälp av ekv. B.2 och B.3 kan nu ekv. B.1 skrivas:

$$E = \sum_{i=1}^n N_i (\mu_i^0 - \mu_{i0}^0) + \bar{R} T_0 \sum_{i=1}^n N_i \ln \frac{c_i}{c_{i0}} \quad (\text{B.4})$$

Exergin för ett material kan alltså bestämmas utgående från dess kemiska potential och koncentration i begynnelse- och sluttillståndet.

Nedan följer ett numeriskt exempel med en förenklad bild av svensk järnmalmshantering år 1980. Beskrivningen skall endast ses som ett försök till en förenklad beskrivning av exergins användning inom resursräkenskap.

Eftersom vi här betraktar endast ett ämne kan ekv. B.4 skrivas

$$E = N_1 (\mu_1^0 - \mu_{10}^0) + \bar{R} T_0 \ln \frac{c_1}{c_{10}} \quad (\text{B.5})$$

där 1 alltså står för järn, Fe.

Låt oss beräkna exergin för den svenska järnmalmen.

Den svenska järnmalmen har en genomsnittlig järnhalt av ca 60% (vikt) och består vanligen av magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Molvikten för järn 55.8 g, vilket medför att 1 kg järnmalm innehåller  $600/55.8 = 10.7$  mol järn.

Anta att järn finns i omgivningen som hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) i fast form och med molkoncentrationen  $2.7 \times 10^{-4}$  och att syre  $\text{O}_2$  är i gasform vid partialtrycket 20.40 kPa i omgivningen {Szargut et al. 1988}.

De kemiska potentialerna för järn i magnetit respektive hematit blir då:

$$\mu^0(\text{Fe}_{\text{magnetit}}) \approx \frac{1}{3} (-1014.2 + 2 \times 3.84) \text{ kJ/mol} \approx -335.5 \text{ kJ/mol}$$

$$\mu_0^0(\text{Fe}_{\text{hematit}}) \approx \frac{1}{2} (-741.0 + 1.5 \times 3.84) \text{ kJ/mol} \approx -367.6 \text{ kJ/mol}$$

Där 3.84 kJ är mängden exergi som frigörs då partialtrycket för 1 mol syrgas ( $\text{O}_2$ ) sjunker från 101.325 kPa till 20.40 kPa vid 15°C.

Specifika exergin för järnmalm och järn blir då:

$$e_{\text{järnmalm}} \approx 10.7 \left[ \{-335.5 - (-367.6)\} \times 10^3 + 8.31 \times 288 \times \ln \left( \frac{0.83^\dagger \times 0.43}{2 \times 2.7 \times 10^{-4}} \right) \right] =$$

$$\approx 0.51 \text{ MJ/kg}$$

$$e_{\text{järn}} \approx 17.9 \left[ \{0 - (-367.6)\} \times 10^3 + 8.31 \times 288 \times \ln \left( \frac{1}{2 \times 2.7 \times 10^{-4}} \right) \right] = 6.90 \text{ MJ/kg}$$

då 1 kg järn motsvarar 17.9 mol.

Dessa värden överensstämmer väl med liknande beräkningar {McGannon 1971, Gyftopoulos et al. 1974}.

Den svenska brytningen av järnmalm var 1980 ca 26.9 Mton. Om vi antar att detta är magnetit motsvarar det 14 PJ.

Den svenska stålproduktionen var 3.5 Mton, dvs ca 24 PJ exergi. För att producera detta åtgick 5.7 Mton malm, dvs ca 3 PJ tillsammans med ca 34 PJ elektricitet och ca 77 PJ kol och andra bränslen. Exergiverkningsgraden vid stålproduktionen blir således ca 31%. En grov bild av svensk järnomsättning 1980 blir alltså som omvandlingen i fig. 3.8 i avsnitt 3.5 illustrerar.

---

<sup>†</sup> 1 kg järnmalm = 0.6 kg Fe = 10.7 mol Fe = 10.7/3 mol  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  = 0.83 kg  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

## APPENDIX C

### Effektivitetsbegrepp vid exergiomvandlingar

En process som sker med en hastighet  $v$  (exergi per tidsenhet) skild från noll måste drivas av en gradient  $g$  skild från noll. Vanligen kan man antaga linjärt samband dvs

$$v = \varepsilon g \quad (\text{C.1})$$

där  $\varepsilon$  är en konstant oberoende av  $g$ .

Entropiproduktionen per tidsenhet för en sådan process beror av  $v$  i kvadrat

$$\frac{dS}{dt} = \chi v^2 \quad (\text{C.2})$$

där  $\chi$  är beroende av  $v$ . Om många vägar är möjliga i processen, från begynnelse- till sluttillståndet, så låt  $\chi_0$  beteckna det lägsta möjliga värdet på  $\chi$ . Vi har då en minimal entropiproduktion per tidsenhet

$$\frac{dS}{dt}_{\min}(v) = \chi_0 v^2 \quad (\text{C.3})$$

och därmed en minimal exergiförlust per tidsenhet  $T_0(dS/dt)_{\min}(v)$  där  $T_0$  är omgivningstemperaturen. Den maximala exergieffekten  $P_{\text{ex}}$  (exergi per tidsenhet) som kan överföras till önskat sluttillstånd blir

$$P_{\text{ex}} = v - T_0 \chi_0 v^2 \quad (\text{C.4})$$

vi leds därför till följande definition: den maximala exergiverkningsgraden som funktion av hastigheten  $v$

$$\eta_{\max}(v) = 1 - \frac{v}{v_0} \quad (\text{C.5})$$

där

$$v_0 = \frac{1}{T_0 \chi_0} \quad (\text{C.6})$$

är den karaktéristiska effekten för processen. Från (ii) och (iii) kan vi också definiera en relativ exergiverkningsgrad  $\eta_{\text{rel}}$  vid en processhastighet skild från noll

$$\eta_{\text{ex}} = \eta_{\text{rel}} \eta_{\max}(v) \quad (\text{C.7})$$



## APPENDIX D

### Exergi och information

Termodynamiken behandlar fysiska lagar för system som ur makroskopisk synpunkt är mycket små (ca  $10^{-15}$  cm<sup>3</sup>) men ur mikroskopisk synpunkt är mycket stora och följaktligen består av ett stort antal partiklar ( $10^{-15}$  cm<sup>3</sup> innehåller ungefär  $10^9$  atomer). En fullständig kunskap om varje partikels rörelse är alltså omöjlig. I statistisk mekanik tar man som utgångspunkt det stora antalet partiklar och använder statistiska metoder för att beskriva makroskopiska fenomen som resultat av rörelsen och växelverkan mellan många partiklar. Statistisk mekanik utgör sålunda den teoretiska basen för förståelsen av termodynamik.

Behandlingen av ofullständig information studeras inom informationsteorin. Det generella problemet om hur man skall värdera ofullständig information kan relateras till statistisk mekanik som en del av informationsteorin. Omvänt gäller också att användbara begrepp och metoder framtagna inom statistisk mekanik kan genom informationsteorin utvidgas till att även kunna användas inom andra områden.

Låt det system vi betraktar bestå av  $N$  partiklar. Antalet tillåtna tillstånd  $\Omega$  beror exponentiellt av  $N$ . Låt sannolikheten för det  $j$ :te tillståndet vara  $P_j$  och att

$$\sum_{j=1}^{\Omega} P_j = 1 \quad (\text{D.1})$$

Entropin för systemet är då enligt statistisk mekanik definierad som

$$S = -k \sum_{j=1}^{\Omega} P_j \ln P_j \quad (\text{D.2})$$

där  $k$  är Boltzmanns konstant.

Sannolikheten vid jämvikt  $P_j^0$  är sådana att de maximerar entropin  $S$  oavsett vilka yttre villkor som finns på systemet.

$$S_{\text{eq}} = S_{\text{max}} = -k \sum_{j=1}^{\Omega} P_j^0 \ln P_j^0 \quad (\text{D.3})$$

Den tillgängliga negentropin för systemet beskrivs då med hjälp av sannolikheterna  $P_j$  som

$$S_{\text{eq}} - S = k \left( \sum_{j=1}^{\Omega} P_j \ln P_j - \sum_{j=1}^{\Omega} P_j^0 \ln P_j^0 \right) \quad (\text{D.4})$$

Informationsinnehållet  $I$  blir då, enligt informationsteorin, i binära enheter (bitar)

$$I = \frac{1}{\ln 2} \left( \sum_{j=1}^{\Omega} P_j \ln P_j - \sum_{j=1}^{\Omega} P_j^0 \ln P_j^0 \right) \quad (\text{D.5})$$

Som exempel kan vi anta att ett system består av  $N$  olika partiklar med vardera två möjliga tillstånd. Då gäller att  $\Omega = 2^N$ . Om det inte finns några ytterligare villkor så måste gälla att alla  $P_j^0$  är lika med  $2^{-N}$ . Total information om systemet (en av  $P_j$  lika med ett och alla övriga med noll) ger då att  $I = N$ . För varje partikel finns alltså information som motsvarar ett "ja" eller "nej" svar till en speciell fråga. Varje sådant svar motsvarar en binär enhet (bit) av information.

Från ekv. D.4 och D.5 ser vi att negentropi och information är nära relaterade

$$S_{\text{eq}} = S_{\text{max}} = -k' i \quad (\text{D.6})$$

där

$$k' = k \ln 2 \approx 1.0 \times 10^{-23} \text{ [J/K]}. \quad (\text{D.7})$$

En bit information är alltså ekvivalent med  $1.0 \times 10^{-23}$  J/K av negentropi.

Från ekv. 3 i kapitel 2 har vi en relation mellan exergi och negentropi

$$E = T_0 (S_{\text{eq}}^{\text{tot}} - S^{\text{tot}}) \quad (\text{D.8})$$

tot står här för det totala systemet, men kallas endast systemet.

Kombinerar vi denna relation med (D.6) får vi följande relation mellan exergi och information

$$E = k' T_0 I \quad (\text{D.9})$$

Alltså gäller att  $k' T_0 \approx 2.9 \times 10^{-21}$  J är mängden exergi relaterad till en bit information vid rumstemperatur.

Det bör observeras att "information", som är ett mått på informationskapaciteten, inte nödvändigtvis måste vara meningsfull information. Information används här som ett mått på ordning eller struktur i fysisk mening, vilket inte är liktydigt med "information" i dagligt tal.

## APPENDIX E

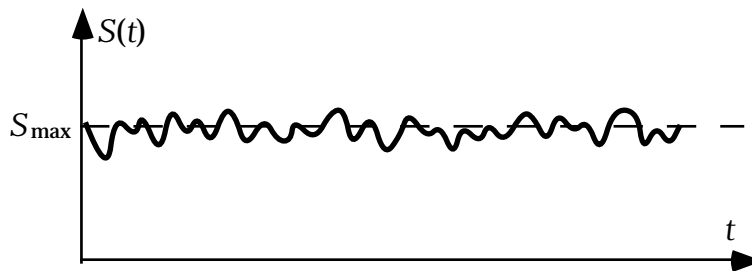
### Några idealiserade termodynamiska system

#### I. Jämvikt

Ett isolerat system A i jämvikt har maximal entropi,  $S = S_{eq}$ . Låt systemet beskrivas med de intensiva variablerna  $X_i(\mathbf{x}, t)$  som beror av läget  $\mathbf{x}$  i A och tiden  $t$ . Värdet på variablerna  $X_i$  bestäms då genom villkoret att entropin  $S$  är maximal, dvs

$$\frac{\delta S}{\delta X_i} = 0 \quad (\text{E.1})$$

Entropin kan endast minska lokalt genom termiska fluktuationer, vilket illustreras av figur E.1 nedan

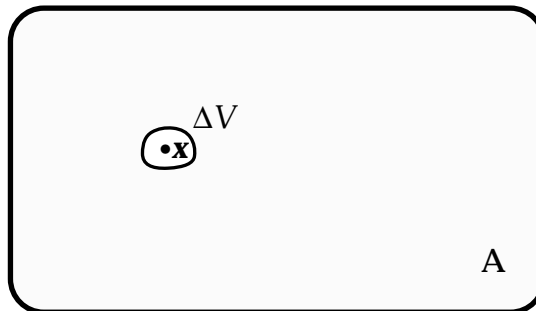


Figur E.1 Entropin som funktion av tiden för ett system i jämvikt

Vid jämvikt är parametrar som temperatur och entropi väl definierade.

#### II. Ett system nära jämvikt

Betrakta en liten volym  $\Delta V$  omkring punkten  $\mathbf{x}$  i system A, figur E.2 nedan.



Figur E.2 En liten volym  $\Delta V$  kring en punkt  $\mathbf{x}$  i systemet A

Om  $\Delta V$  är makroskopiskt liten men tillräckligt stor för att innehålla ett stort antal partiklar kan vi anta att det råder inre termodynamisk jämvikt i  $\Delta V$ . (Relaxationstiden för att uppnå jämvikt i  $\Delta V$  antas liten i jämförelse med reaktionstider mellan  $\Delta V$  och omgivningen.) Då kan temperatur, tryck, entropitäthet och andra intensiva variabler för  $\Delta V$  anges som funktioner av läget  $\mathbf{x}$  och tiden  $t$ .

Flödet  $\mathbf{J}_i(\mathbf{x}, t)$  drivs av gradienter i de intensiva variablerna  $X_i$ . Vi kan anta ett linjärt förhållande dvs

$$\mathbf{J}_i(\mathbf{x}, t) = \sum_j L_{ij} \nabla X_j(\mathbf{x}, t) \quad (\text{E.2})$$

där koefficienterna  $L_{ij}$  satisfierar Onsagerrelationerna

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (\text{E.3})$$

Då systemet utvecklas ökar entropin. Låt entropiproduktionen per tidsenhet vara  $\sigma(\mathbf{x}, t)$ . Då gäller för den totala entropi för system A (59)

$$\frac{dS}{dt} = \int_A d^3\mathbf{x} \sigma(\mathbf{x}, t) \quad (\text{E.4})$$

där

$$\sigma(\mathbf{x}, t) = \sum_{i,j} L_{ij} [\nabla X_i(\mathbf{x}, t)] [\nabla X_j(\mathbf{x}, t)] > 0 \quad (\text{E.5})$$

Vi ser från ekv. E.5 att för system som inte är isolerade, dvs  $L_{ij} \neq 0$  att en gradient alltid ger upphov till en entropiproduktion. Entropiproduktionen har sitt minimum för källfria gradienter, dvs då

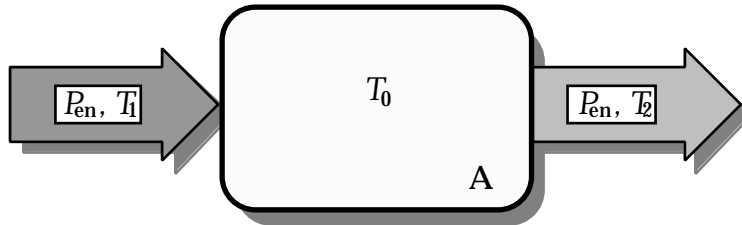
$$\nabla[\nabla X_i(\mathbf{x}, t)] = 0 \quad (\text{E.6})$$

### III. Icke-jämviktssystem. Stationära tillstånd

Ett system kan upprätthållas i ett icke jämviktstillstånd om det befinner sig i ett exergiflöde, se figur 2.1 ovan. Låt oss anta ett system A, se figur E.3, som befinner sig i ett exergiflöde av värme. Den inkommande värmen har temperaturen  $T_1$  och den utgående värmen har temperaturen  $T_2$ . Då  $T_1$  är större än  $T_2$  som i sin tur är större än medeltemperaturen  $T_0$  ( $T_1 > T_2 > T_0$ ) ger detta ett nettoflöde av entropi från systemet A. Om värmeffektens energieffekten är  $P_{en}$  gäller att exergieffekten dvs nettoflödet av exergi per tidsenhet till systemet blir

$$P_{\text{ex}} = T_0 P_{\text{en}} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (\text{E.7})$$

Detta exergiflöde kan användas för att konstruera och upprätthålla strukturer långt från jämvikt inom systemet A.



Figur E.3 Ett system A med medeltemperaturen  $T_0$  i ett värmefflöde  $P_{\text{en}}$

För levande organismer är döden det egentliga jämviktstillståndet. Människan och andra organismer kan upprätthålla ett tillstånd från jämvikt genom att de lever i ett ständigt flöde av exergi. Den kemiska exergin i födan omvandlas och ger ett nettoutbyte av exergi. De förbrukade exergibärarna avges till omgivningen som avfall och värmestrålning. Hela biosfären lever genom att omvandla högvärdig energi till värme som strålar ut i rymden, se figur 3.3. Den fundamentala processen i detta sammanhang är fotosyntesen i växterna.

Fysikaliskt sett är naturligtvis levande system mycket komplicerade. Ett mycket enklare exempel på figur E.3 är en metallstav som leder värme från en varm till en kall reservoar.

Om avvikelser från jämvikt inte är för stora kan ett system som befinner sig mellan en konstant energigivare och en konstant energitagare utvecklas till ett stationärt tillstånd. Detta gäller t ex för metallstaven i exemplet ovan. Ett stationärt tillstånd nära termodynamisk jämvikt karakteriseras av minimal entropiproduktion dvs

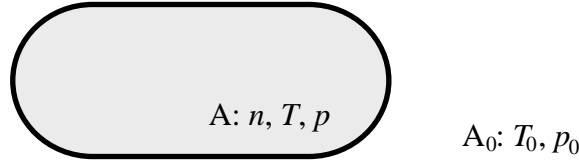
$$\frac{\delta}{\delta X_i} \left( \frac{dS}{dt} \right) = 0 \quad (\text{E.8})$$

och av randvillkoren vid energigivaren och energitagaren.

Utvecklingen mot ett stationärt tillstånd innebär alltså att entropiproduktionen minskar tills den nått det minimala värdet som ges av ekv. E.8.

#### IV. Exergin för en enatomig idealgas

Låt system A i Appendix A vara  $n$  mol av en speciell enatomig gas i en behållare i en omgivning  $A_0$  av samma gas, se fig. E.4. Låt  $T_0$  och  $p_0$  vara temperatur och tryck för  $A$ . Om  $T$  eller  $p$  avviker från  $T_0$  eller  $p_0$  kan arbete utvinnas ur systemet A.



Figur E.4 En gas i en behållare i en omgivning av samma gas

Låt oss beräkna exergin  $E$  för A då vi antar att gasen är tillräckligt tunn för att kunna betraktas som en idealgas. Då gäller för volymen  $V$ , inre energin  $U$  och entropin  $S$  för systemet A

$$\begin{cases} V = \frac{nRT}{p} \\ U = \frac{3}{2} nRT \\ S = S_{\text{eq}} + nR \left[ \frac{3}{2} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{V}{V_{\text{eq}}}\right) \right] \end{cases} \quad (\text{E.9})$$

där  $n$  är antalet mol och  $R$  är allmänna gaskonstanten. Vid jämvikt "eq" gäller för jämviktsvolymen

$$V_{\text{eq}} = \frac{nRT_0}{p_0} \quad (\text{E.10})$$

och för jämviktsenergin  $U_{\text{eq}}$

$$U_{\text{eq}} = \frac{3}{2} nRT_0 \quad (\text{E.11})$$

För exergin gäller i detta fall (ekv. A.18 med  $n = n_{\text{eq}}$ , det finns bara en slags molekyler i gasen dvs inget index  $i$  behövs)

$$E = U - U_{\text{eq}} - p_0(U - U_{\text{eq}}) - T_0(S - S_{\text{eq}}) \quad (\text{E.12})$$

Genom att sätta in ekv. E.9, E.10 och E.11 i E.12 kan vi skriva exergin  $E$  som en funktion av temperatur  $T$  och volym  $V$  enligt

$$E = nRT_0 \left\{ \frac{3}{2} \left[ \frac{T}{T_0} - 1 - \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right] + \frac{V}{V_{\text{eq}}} - 1 - \ln\left(\frac{V}{V_{\text{eq}}}\right) \right\} \quad (\text{E.13})$$

I termer av relativa avvikelser (från jämvikt med omgivningen) i temperatur och volym

$$\begin{cases} t = \frac{T - T_0}{T_0} \\ v = \frac{V - V_{\text{eq}}}{V_{\text{eq}}} \end{cases} \quad (\text{E.14})$$

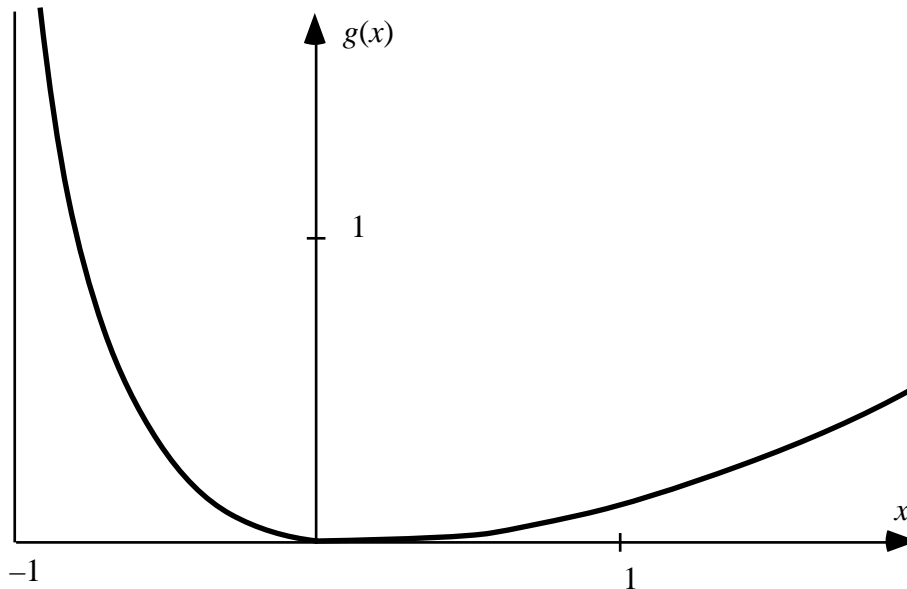
har vi

$$E = nRT_0 \left[ \frac{3}{2} g(t) + g(v) \right] \quad (\text{E.15})$$

där funktionen  $g(x)$  är definierad enligt

$$g(x) = x - \ln(1+x) \quad (\text{E.16})$$

Denna funktion visas i figur E.5 nedan



Figur E.5 Funktionen  $g(x) = x - \ln(1+x)$

Vi ser att  $g(x)$  ökar kraftigt med ökande negativt argument  $x$ . För temperaturtermen i ekv. E.15 betyder detta att om gasen är mycket kallare än omgivningen bär den en stor mängd exergi.

Den logaritmiska divergensen i funktionen  $g(x)$  för  $x = -1$  beror av att Stirlings formel, se ekv. E.17 använts vid härledning av ekv. E.9. För stora  $n$  gäller

$$\ln n! \approx n(\ln n - 1) \quad (\text{E.17})$$

Då  $x \rightarrow -1$  gäller ej längre Stirlings formel eftersom  $n$  blir liten, gasen kan inte betraktas som en idealgas.

## APPENDIX F

### Människosynens betydelse för samhällutvecklingen

Myndigheternas brist på fantasi när det gäller att föreställa sig vanligt folks uppfinningsförmåga illustreras kanske bäst i vårt beskattningssystem eller i parkeringsreglerna i våra storstäder vilka antagligen är en förtäckt beskattning av medborgarna. Kort sagt agerar myndigheterna alltför ofta som om vanliga människor inte har något att tänka med. Effekterna av detta blir onödigt "friktion" och kontroll i samhället och ett ökat ömsesidigt misstroende mellan medborgarna och myndigheterna. Inom industrin resulterar detta i minskad produktivitet, vilket i forna Sovjetunionen bl a bidrog till dess sönderfall. Men inom industrin börjar man också inse värdet av att se medarbetarna som tänkande varelser, vilket medför stora möjligheter till effektivisering av verksamheten. Inom näringslivet börjar man således att succesivt inse betydelsen av den rådande människosynen för produktiviteten. Denna insikt talar också för att detta har betydelse för samhället i stort. Eftersom samhällsplanerings- och miljöfrågor inbegriper även människan så har rimligen människosynen en viktig betydelse, därför ägnar jag ett särskilt appendix åt detta.

Den sk japanska företagsfilosofin är inte hierarkisk, som i västerlandet, utan platt och har sina rötter i den österländska synen på människan och samhället och idéer hämtade från amerikanska kvalitetsexperter. I en platt organisation får bl a demokratin en helt annan innebörd.

W. Edwards Deming är den person som mer än någon annan förknippas med detta nytänkande inom näringslivet, han har upprättat följande regler, "Deming's 14 Points", för att öka produktiviteten: {Tribus 1987}

1. *Create consistency and continuity of purpose.*
2. *Refuse to allow commonly accepted levels of delay for mistakes, defective material, defective workmanship.*
3. *Eliminate the need for and dependence upon mass inspection.*
4. *Reduce the number of suppliers. Buy on statistical evidence, not on price.*
5. *Search continually for problems in the system and seek ways to improve it.*
6. *Institute modern methods of training, using statistics.*
7. *Focus supervision on helping people to do a better job. Provide the tools and techniques for people to have pride of workmanship.*
8. *Eliminate fear. Encourage two-way communication.*



9. Break down barriers between departments. Encourage problem solving through teamwork.
10. Eliminate the use of numerical goals, slogans, posters for the workforce.
11. Use statistical methods for continuing improvement of quality and productivity and eliminate all standards prescribing numerical quotas.
12. Remove barriers to pride of workmanship.
13. Institute a vigorous program of education and training to keep people abreast of new developments in materials, methods, and technologies.
14. Clearly define management's permanent commitment to quality and productivity.

#### Demings 14 punkter (fritt översatt)

1. Upprätta långsiktiga mål för verksamheten.
2. Acceptera aldrig misstag, defekter och slarv.
3. Avskaffa behovet och beroendet av kontroll.
4. Minska antalet leverantörer. Köp på säkerhet, inte pris.
5. Sök brister i systemet och förbättringar av dessa.
6. Inrätta moderna träningsmetoder i statistik.
7. Hjälp medarbetarna till bättre resultat. Återupprätta yrkesstoltheten.
8. Eliminera rädslan för och uppmuntra till tvåvägskommunikation.
9. Riv reviren och sök lösningar gemensamt. (Dvs raka rör, både vertikalt och horisontellt.)
10. Avskaffa slogans, produktionsmål och direktiv till arbetarna.
11. Använd statistik för att kontinuerligt öka kvaliteten och produktiviteten och avskaffa alla produktionstal.
12. Låt yrkesstoltheten växa.
13. Ge personalen utbildning i ny teknik, nya metoder och teknologier.
14. Övertyga ledningen om betydelsen av kvalitet och produktivitet.

Som vi ser är förslagen i många stycken mycket radikala, men också självklara. Det kan kanske tyckas märkligt att dessa krav överhuvudtaget måste deklarerars, men tyvärr tillämpas dessa idéer endast undantagsvis inom näringslivet såväl som samhället i övrigt. Alltför ofta ser man exempel på när människor antas vara helt intelligensbefriade och inte kapabla att fatta de mest enkla beslut.

Låt oss se vidare på några av erfarenheterna inom denna nya organisationsfilosofi inom näringslivet. {Tribus, 1987}

<p style="text-align: center;">WHENEVER THERE IS A PROBLEM 85% OF THE TIME IT WILL BE IN THE SYSTEM 15% OF THE TIME IT WILL BE THE WORKER.</p>
--

("JURAN'S RULE")

## THE PERVERSITY PRINCIPLE

IF YOU TRY TO IMPROVE THE PERFORMANCE  
OF A SYSTEM OF PEOPLE, MACHINES AND PROCEDURES  
BY SETTING NUMERICAL GOALS FOR THE  
IMPROVEMENT OF INDIVIDUAL PARTS OF THE SYSTEM  
THE SYSTEM WILL DEFEAT YOU AND  
YOU WILL PAY A PRICE WHERE YOU LEAST EXPECTED TO.

Denna *perversitetsprincip* ger bl a många funderingar kring den egentliga effekten av att sätta gränsvärden för miljöutsläpp och anslå stora resurser för bevakning och kontroll.

THE MANAGER'S JOB HAS CHANGED  
  
THE PEOPLE WORK IN A SYSTEM.  
THE JOB OF THE MANAGER IS TO WORK ON THE SYSTEM  
TO IMPROVE IT, WITH THEIR HELP.

Om vi tillämpar den sista av dessa teser på hela samhället, dvs utanför den egentliga produktionsprocessen i samhället får vi en annorlunda syn på samhället och dess styrning. Istället för att styra individens beteende borde ansträngningar riktas mot brister i systemet, som gör att människor t ex handlar fel. Det handlar således i grunden om en alternativ människosyn.

Kortfattat kan vi alltså säga att det i näringslivet handlar om att återupprätta arbetarens status och inflytande i produktionen och analogt kan man tänka sig att inom samhället återupprätta medborgarnas status och inflytande över samhällsprocessen.

I Japan har denna organisationsfilosofi tagits väl tillvara. Idag är Japan tillsammans med västra Tyskland de starkaste ekonomierna i världen. Båda länder har två saker gemensamt sedan 1945: (1) besegrade och sönderbombade (2) ingen militär rustning. Detta innebar bl a att industrin kunde byggas om från början, i Tysklands fall med hjälp utifrån, samt att militären inte tilläts dränera vare sig ekonomin eller intelligen. En av de mer framgångsrika japanska skolorna är den sk Kaizen, vilket står för en kontinuerlig förbättring som involverar alla i hela organisationen. (Imai, 1986) Följande citat är hämtat ur den svenska utgåvan av boken om Kaizen:

“Vi kallar vissa samhällen primitiva på grund av deras önskan att förbli i samma tillstånd som gudarna eller förfäderna skapade dem i tidernas begynnelse, med en demografisk balans som de vet hur de skall upprätthålla och en oföränderlig levnadsnivå skyddad av deras sociala regler och metafysiska tro.’

Det är min uppriktiga förhoppning att vi ska kunna komma ur vårt 'primitiva' tillstånd och att Kaizen-strategin sist och slutligen ska vinna tillämpning inte bara i affärsvärlden utan också i alla institutioner och samhällen över hela världen.”

Samhällsutvecklingen måste således byggas på föränderlighet istället för beständighet. Låt oss jämföra hur den västerländska och japanska organisationsfilosofin skiljer sig åt.

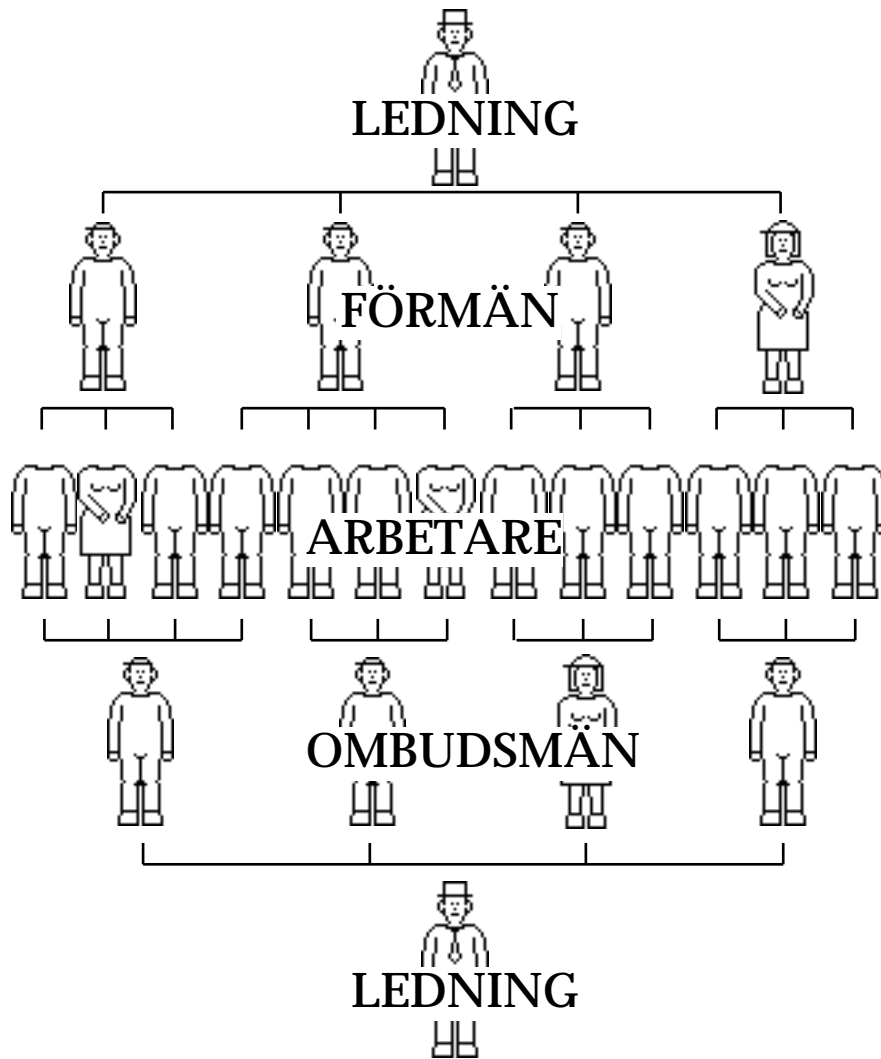
I Västerlandet säger vi ofta att “ensam är stark” men i Österlandet gäller snarare att “ensam är död”. Vårt förhållande till andra människor och inställningen till oss själva visavi kollektivet skiljer sig alltså väsentligt mellan österländs och västerländs filosofi, vilket genomsyrar mycket i våra samhällen bl a konst, religionen, medicinen, naturens roll och teknikens betydelse.

Den västerländska företagsmodellen kan förenklat beskrivas med fig. F.1. Överst har vi företagsledningen och nederst har vi den fackliga ledningen—två poler i en maktkamp. Notera att arbetarna saknar huvuden, eftersom de inte anses kunna fatta egna beslut utan skall följa direktiv, från båda håll. Organisationsen är starkt hierarkisk och bygger på kontroll och lydnad.

I Japan ser motsvarande system istället ofta ut som en pannkaka, dvs en platt organisation, där arbetarna och deras medarbetare, dvs ledningen för företaget och facket, samarbetar för verksamhetens utveckling, se fig. F.2.

Demings regler ovan talar inte om förbud av fackföreningar eller förtryck, istället talar han om en öppen dialog, ett arbetarinflytande i produktionen och en yrkesstolthet byggd på kvalitet. Det råd som många japanska industriledare ger till sina västerländska kolleger är att vistas mer på verkstadsgolvet. Produktionen sker ju inte i direktionsrummen den sker på golvet och av arbetarna. På samma sätt måste samhällsplaneringen bygga på ett långt större inflytande av enskilda människor.

För en japansk företagsledare är arbetaren företagets viktigaste kapital. Detta har många konsekvenser för verksamheten, bl a är de japanska företagen ofta mycket breda i sitt produktsortiment, dvs de utnyttjar sitt kapital bättre.



Figur F.1 Den västerländska "dubbelpyramiden"



Figur F.2 Den japanska platta organisationen

## APPENDIX G

### Naturliga fysiska resurser i Göteborg

#### G.1 Solenergi

Solens yta har en temperatur av ca 6 000 K och utsänder elektromagnetisk strålning, fotoner.

Fotonenergin är

$$U = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$$

där  $U$  är energi,  $h$  är Plancks konstant, dvs  $6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ,  $\nu$  är frekvens,  $\lambda$  är våglängd,  $c$  är ljushastigheten i vakuum, dvs  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .  $\lambda = 500 \text{ nm}$  ger  $U \approx 4 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.5 \text{ eV}$ .

Den solenergi som når jordytan ligger i våglängdsområdet 300-2500 nm (0.5-4 eV). Strålning med våglängd under 300 nm absorberas av ozonskikt på 20-40 km höjd (stratosfären). Strålning med våglängd över 2500 nm absorberas av koldioxid och vattenånga i atmosfären.

Exergiinnehållet i solenergi är i medeltal ca 93% av energiinnehållet. Ju högre fotonenergi, desto högre

Solen utstrålar totalt  $4 \times 10^{26} \text{ W}$  (energieffekt). Av denna energieffekt infaller  $1.7 \times 10^{17} \text{ W}$  mot jorden. Utanför jordatmosfären är solstrålningens intensitet (vinkelrätt mot solen)  $1350 \text{ W/m}^2$ . På jorden är intensiteten (vinkelrätt mot solen) i medeltal  $800 \text{ W/m}^2$  när solen skiner. Vid inträdet i atmosfären reflekteras 30% av solstrålningen. Ytterligare 20% absorberas i medeltal i atmosfären av i huvudsak moln, varför 50% av mot jorden infallande solenergi når jordytan. 6% av den energi som når jordytan reflekteras direkt, vilket gör att 47% av den ursprungliga energin absorberas vid jordytan på något sätt.

Eftersom jorden står i värmebalans med sin omgivning strålar absorberad solenergi förr eller senare ut igen i form av långvägig värmestrålning.

På grund av brytning och spridning av solljuset i atmosfären är inte all solstrålning som når jordytan parallell, utan en andel blir diffust ljus. Halten diffust ljus ökar med mängden vattenånga, fria vattendroppar och andra partiklar i luften. I Sverige är andelen diffust ljus ca 50% av den totala instrålningen. På sommaren är andelen diffust ljus ca 20% och på vintern ca 80%.

I Göteborg mottar en vertikal söderorienterad yta total mer energi per ytenhet än en horisontell yta. Optimal lutning med horisontalplanet är ca 60°. Ju närmare ekvatorn man kommer desto mindre lutning med

horisontalplanet skall en söderorienterad yta ha för att ta emot så mycket energi som möjligt.

Mot jorden infaller årligen 1500 miljoner TWh. 750 miljoner TWh når jordytan. I de solrikaste områdena på jorden (t ex Sahara, Arizona) infaller maximalt 3400 kWh/m<sup>2</sup>år på horisontella ytor. Sveriges landyta mottar 360000 TWh/år. Solinstrålningen i Sverige på horisontella ytor varierar mellan 800 kWh/m<sup>2</sup>år (norra Norrland) och 1000 kWh/m<sup>2</sup>år (Skåne).

I Sverige mottar en horisontell yta 800-1000 kWh/m<sup>2</sup>år. Räknat över hela året mottar en vertikal yta något mer energi än en horisontell. Med 50% verkningsgrad erhålls 400-500 kWh/m<sup>2</sup>år.

## G.2 Biomassa

Med biomassa avses organiskt material som härrör från växternas fotosyntes. Vid fotosyntesen bildas, med växternas klorofyll som enzym, kolhydrater och syre ur koldioxid, vatten och solenergi. Solenergi omvandlas till kemiskt bunden energi.

Fotosyntesen utnyttjar strålning endast i den synliga delen av spektrum, 400-700 nm. I huvudsak utnyttjas de blå och röda områdena (400-500 nm & 600-700 nm), vilka motsvarar 40-45% av insträlad energi. Den teoretiska verkningsgraden för fotosyntesen, räknat på allt infallande solljus, är 15%.

På grund av växternas egen andning, vegetationsperiodens korthet, brist på näringsämnen och vatten samt andra faktorer, är förhållandet mellan kemiskt lagrad energi och infallande solenergi oftast under 1%. I gynnsamma fall kan denna verkningsgrad uppgå till 4%. Sett över hela jordklotet lagras i växterna 0.1% av den solenergi som når jordytan.

Växterna har vanligtvis ett energiinnehåll mellan 4.5 och 5.0 kWh/kg (torrsbstans). Halm har ett energiinnehåll på 4.5 kWh/kg (torrsbstans) och ved 5.0 kWh/kg (torrsbstans). Energiinnehållet i produkterna varierar. I ved kan energiinnehållet uppgå till 5.6 kWh/kg (torrsbstans).

Kemisk energi är molekylärt sett rörelseenergi och potentiell energi. Atomkärnor och elektroner har rörelseenergi. Den potentiella energin härrör från elektromagnetisk attraktion mellan kärnor och elektroner, och repulsion mellan kärnor respektive elektroner sinsemellan. Kemisk bindning innebär förändringar av dessa kraftverkningar. Kemisk energi har i princip 100% exergiinnehåll.

### G.3 Vindkraft

Vindenergi är en form av mekanisk rörelseenergi och har sålunda 100% exergiinnehall.

Vindens effekt, dvs vindens kinetiska energi per tidsenhet som strömmar genom en tvärsnittsarea är

$$P = \frac{\rho A v^3}{2}$$

$\rho$  är luftens densitet, dvs 1.29 kg/m<sup>3</sup>.  $A$  är tvärsnittsarean,  $v$  är vindhastigheten.

Effekttätheten  $P/A$ , dvs effekten per ytenhet (tvärsnittsarea) blir

$$\frac{P}{A} = \frac{\rho v^3}{2}$$

Effekten är alltså proportionell mot vindhastighetens tredje potens.

Några exempel på effekttätheter vid olika vindstyrkor:

$v = 5 \text{ m/s}$	ger	$P/A = 80 \text{ W/m}^2$
$v = 11.5 \text{ m/s}$	ger	$P/A = 1000 \text{ W/m}^2$
$v = 20 \text{ m/s}$	ger	$P/A = 5200 \text{ W/m}^2$

Energi kan utvinnas ur vinden via vindturbiner. Teoretiskt största möjliga energiutbytet för en vindturbin i en fri luftström är 16/27 dvs ca 59% av vindenergin. Detta fås då vinden bromsas till en hastighet som är en tredjedel av den ursprungliga hastigheten.

Vindarna ger över längre tidsperioder (år) konstant effekt. Korttidsvariationerna i effekt är en av vindenerginns nackdelar. I Sverige kan stiltjeperioder på upp till 6 dagar i sträck förekomma på sommaren. Vintertid är 3-4 dagar maximala stiltjeperioder.

Ett stort antal geografiskt väl utspridda vindkraftverk skulle kunna producera elenergi så att korttidsvariationerna (minuter – timmar) istor utsträckning utjämnas. Även på lite längre sikt (dagar – veckor) skulle en relativt jämn energiutvinning kunna ske. Men det kommer att behövas ett kompletterande energilagringssystem för att vinden ska kunna ge "prima kraft".

Energiuttaget vintertid blir minst dubbelt så stort som sommartid, vilket överensstämmer väl med efterfrågesituationen på elkraft. Vidare är elbehovet störst i södra Sverige där det också blåser mest. De största vindenergi-resurserna finns i närheten av kusterna. Markfriktionens inverkan gör att vindhastigheten ökar med höjden över marken. I kustterräng är den

tillgängliga vindenergin på 100 m höjd i allmänhet tre gånger så stor som på 10 m höjd. I inlandet kan förhållandet öka till en faktor fem à sex.

I genomsnitt omvandlas två procent av den solenergi som faller in på jorden till vindenergi. Detta innebär en energipotential på ca  $2 \times 10^7$  TWh/år. Tillgängliga vindenergiressurser har uppskattats till ca 100 000 TWh/år. I Sverige uppgår total vindeffekt till ca 1 TW vilket innebär ca 10 000 TWh/år.

De ur vindsynpunkt intressantaste områdena, inom vilka det blåser minst 7 m/s på 100 m höjd under halvåret (medianvind) finns utmed västkusten, i stora delar av Skåne, på Öland och Gotland, öster om Vättern samt i norra Uppland. Dessa områden omfattar totalt 12 000 km<sup>2</sup>. Med restriktioner för bl a områden för friluftsliv och kulturminnesvård och med 1 km avstånd till samhällen återstår 7 500 km<sup>2</sup> där 32 TWh elenergi bedöms kunna produceras under normalår. Detta förutsätter anläggning av 3300 vindkraftverk med turbindiameter 100 meter, samt att aggregaten i medeltal står 1.3 km från varandra.

Områden med 6-7 m/s medianvind på 100 m höjd skulle överslagsvis ge 90 TWh/år. Tillgänglig yta är 23 000 km<sup>2</sup> och ca 13 000 aggregat med turbindiameter 100 meter krävs. Totalt sett skulle alltså på de nämnda ytorna ca 120 TWh/år kunna utvinnas.

För Sverige är omvandling till elenergi av störst intresse. Elproduktion till kraftnätet är lämpligt genom att vattenkraften kan utnyttjas för produktionsutjämning.

Upp till 5 000 MW (motsvarar ca 15 TWh/år) torde kunna tas omhand i det svenska kraftsystemet utan andra lagringsmagasin än de som redan finns i anslutning till vattenkraftverken.

På grund av att vindkraftverken "skuggar" varandra kan de ej stå alltför nära varandra. Man får därför ta hänsyn till både bruttobehov och nettobehov när det gäller vindkraftens markanspråk. Bruttobehovet är den sammanlagda ytan av de områden inom vilka aggregaten står. Större delen av ytan påverkas ej på annat sätt än att vindkraftsaggregaten finns inom synhåll. Nettobehovet är den yta som krävs för aggregatet, fria ytor runt aggregatet samt för vägar och kraftledningar.

Bruttobehovet för ett 2 MW-aggregat uppskattas till ca 1 km<sup>2</sup>, medan nettobehovet blir ungefär 0.02 km<sup>2</sup> (2ha).

Med ett årsmedelvärde för utvunnen effekt på 25% av den nominella effekten fås att utvunnen energi per m<sup>2</sup> markyta (nettobehov) och år blir ungefär 200 kWh/m<sup>2</sup>år. Om man räknar på bruttobehovet erhålls 4 kWh/m<sup>2</sup>år.

Med större aggregat ökar utvunnen energi per m<sup>2</sup> markyta och år.



## G.4 Saltgradientenergi (osmotisk energi)

Skillnader i saltkoncentration mellan sötvatten och saltvatten ger möjligheter att utvinna energi vid sötvattenutflöden i hav. Ett system med sötvatten och saltvatten utgör ett ordnat system som strävar efter största möjliga oordning, dvs homogen blandning. Genom att konstruera hinder kan molekylerna tvingas uträtta arbete på sin väg mot homogen blandning.

Den tillgängliga exergin kan skrivas:

$$E = n R T \ln \frac{X_{\text{sötvatten}}}{X_{\text{saltvatten}}}$$

där  $E$  = exergi,  $n$  = antal mol sötvatten,  $R = 8.31$  J/mol K,  $T$  = temperatur,  $X$  = vattnets molbråk.

Med temperaturen 280 K och salthalten 3% fås  $E = 2500$  J per kilogram, sötvatten. Denna energi är lika stor som den potentiella energin i ett vattenfall vars fallhöjd är 250 meter. Saltgradientenergi har 100%-igt exergiinnehåll.

De globala tillgångarna av saltgradientenergi uppskattas till 20000 TWh/år. Sveriges potential är ca 100 TWh/år. Idag finns ej saltgradientkraftverk någonstans i världen. Osäkerheten är stor beträffande saltgradientkraftverkens framtid eftersom giftiga färger och tillsatser till vattnet för att förhindra beväxning kan komma att krävas.

Beräkningar för ett fiktivt 200 MW saltgradientkraftverk placerat vid Nordre Älvs mynning (Göta Älvs norra arm) ger att en sådan anläggning skulle kräva en yta på ca 0.25 km<sup>2</sup> (250x1000 m<sup>2</sup>).

För att erhålla en jämn energiutvinning skulle dessutom Nordre Älvs fjord utnyttjas som regleringsmagasin. Ytan som behövs är 12 km<sup>2</sup>. Genom att låta gränsytan mellan sötvatten och saltvatten röra sig mellan en eller två meters djup under ett dygn torde dock mycket små förändringar av Nordre Älvs fjords vattennivå uppkomma.

Om kraftverket kan erhålla 70% tillgänglighet, dvs om man kan utvinna 200 MW under 70% av året, blir den utvunna energin under ett år drygt 1.2 TWh. Utvunnen energi per ytenhet blir 5000 MWh/m<sup>2</sup> om Nordre Älvs fjords yta ej inräknas.

## APPENDIX H

### H.1 Exergin för värme och kyla i Göteborg

Låt oss benämna förhållandet mellan exergin  $E$  och energin  $Q$  dvs  $E/Q$  för *exergifaktorn*. Genom att multiplicera energivärdet med exergifaktorn får vi exergivärdet. Exergifaktorn för en energimängd vid konstant temperatur (värmereservoar) som skiljer sig i temperatur från omgivningen är således

$$\frac{E}{Q} = \left| \frac{T - T_0}{T} \right|, \quad (\text{H.1})$$

vilket är en generalisering av Carnots uttryck i avsn. 2.2 ovan. Låt oss ta ett enkelt exempel för att illustrera detta samband.

**Exempel:** Vad är exergifaktorn för en värmereservoar vid temperaturen  $20^\circ\text{C}$  ( $\approx 293\text{ K}$ ) i en omgivning vid  $0^\circ\text{C}$  ( $\approx 273\text{ K}$ )?

*Lösning:* Om vi sätter in temperaturvärdena i ekv. F1, så får vi:

$$\frac{E}{Q} = \left| \frac{293 - 273}{293} \right| = \frac{20}{293} \approx 0.06826 \approx 7\%$$

Svaret blir således att exergifaktorn är ca 7%.

Låt oss också se närmare på begreppet verkningsgrad i samband med exergifaktorn.

**Exempel:** Vad är energiverkningsgraden för en energiomvandlare t ex en oljepanna då exergiverkningsgraden är 3%, exergifaktorn för inflödet är 0.9 och för utflödet 0.04?

*Lösning:* Vi har följande samband:

$$\text{Exergifaktorn} = \frac{\text{Exergin}}{\text{Energin}} \text{ dvs } \frac{E}{Q},$$

$$\text{Energiverkningsgraden} = \frac{\text{Nyttjat energiutflöde}}{\text{Nyttjat energiinflöde}} \text{ dvs } \eta_{en} = \frac{Q_{ut}}{Q_{in}} \text{ där } Q \text{ anger den nyttjade energin och på samma sätt för exergin:}$$

Exergiverkningsgraden =  $\frac{\text{Nyttjat exergiutflöde}}{\text{Nyttjat exergiinflöde}}$  dvs  $\eta_{ex} = \frac{E_{ut}}{E_{in}}$  där  $E$  anger den nyttjade exergin.

Härur kan vi härleda följande samband:

$$\eta_{en} = \frac{Q_{ut}}{Q_{in}} = \frac{Q_{ut} \frac{E_{ut}}{E_{in}}}{Q_{in} \frac{E_{in}}{E_{in}}} = \frac{E_{ut} \frac{Q_{ut}}{E_{in}}}{E_{in} \frac{E_{in}}{E_{in}}} = \eta_{ex} \frac{Q_{ut}}{Q_{in}} = \eta_{ex} \frac{E_{in}}{E_{ut}} \cdot \frac{E_{in}}{Q_{ut}}$$

Om vi nu sätter in numeriska värden får vi:

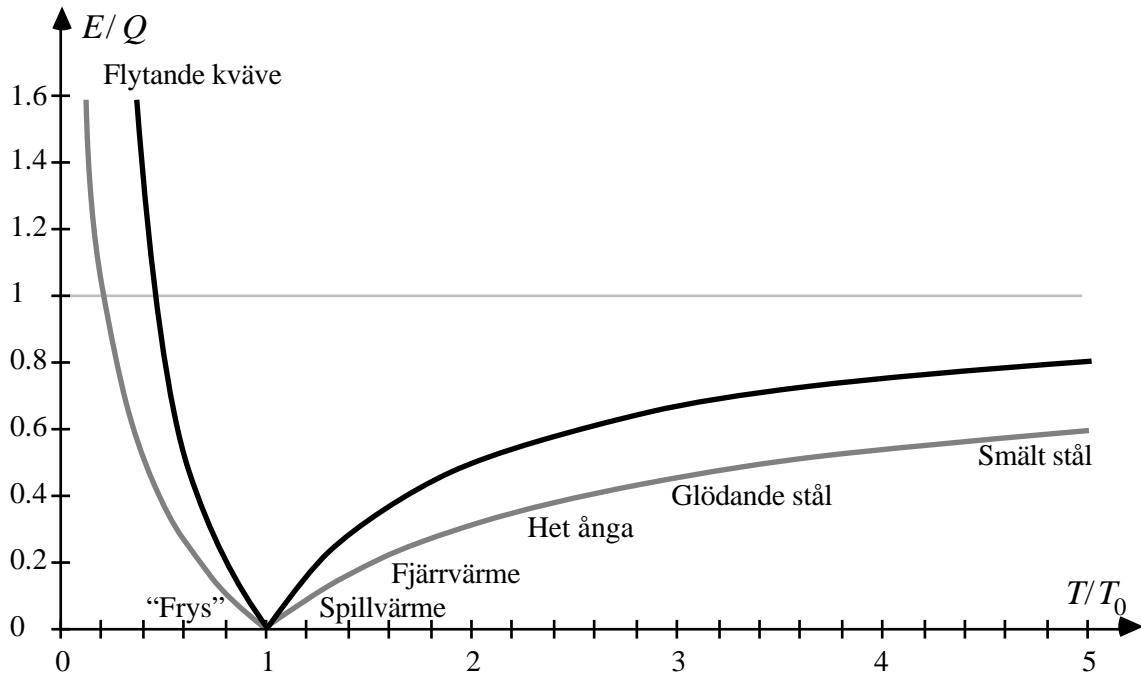
$$\eta_{en} = 0.03 \frac{0.9}{0.04} = 0.675 = 67.5\%$$

Svaret blir således att energiverkningsgraden blir 67.5%.

Den övre svarta kurvan i fig. H.1 illustrerar sambandet i ekv. H.1. (Den skuggade kurvan kommer vi att beskriva i nästa avsnitt.) Härigenom kommer även ett kallt utrymme att innehålla en positiv mängd exergi även om energiinnehållet betraktas som negativt. I figur 1 nedan framgår hur exergifaktorn varierar för några olika temperaturtillstånd som "frys" och fjärrvärme. Som vi ser ökar exergifaktorn kraftigt för låga temperaturer, vilket också förklarar varför det är så svårt att uppnå den absoluta nollpunkten, dvs 0K eller  $-273^{\circ}\text{C}$ . För höga temperaturer närmar sig exergifaktorn 1 dvs exergiinnehållet  $E$  och energiinnehållet  $Q$ , som markerats med en streckad linje, närmar sig varandra. Höga temperaturer kan därför som bekant generera mer arbete i en värmemaskin.

Detta samband kommer vi att använda nedan för att beskriva exergiinnehållet även för kalla utrymmen dvs kyl- och frysrums samt den erforderliga exergin för att upprätthålla den aktuella temperaturen i dessa rum.

Exergibegreppet återspeglar alltså bättre det faktum att energin är som "dyrast" när vi behöver den som mest. Dvs det är fysikaliskt lättare att kyla på vintern och värma på sommaren. Använder vi energibegreppet förefaller det alltså vara lika "lätt" vinter som sommar. Fjärrvärme borde således vara dyrare på vintern än på sommaren. Detta är exempel på *en* självklarhet som inte beskrivs med hjälp av energibegreppet, men väl med exergibegreppet.



Figur H.1. Exergifaktorn för en värmereservoar (svart), en begränsad värmemängd (skuggad) samt exergifaktorn för några olika temperaturer. (Observera att temperaturen anges i Kelvin.)

## H.2 Exergifaktorn för en begränsad värmemängd

Exergiinnehållet för en begränsad värmemängd som t ex ett värme flöde måste beräknas med hänsyn till värmekapacitetens beroende av temperaturen eftersom temperaturen på flödet sjunker då värme avges till omgivningen. Om vi antar att värmekapaciteten är konstant kan följande uttryck för exergifaktorn  $E/Q$  beräknas:

$$\frac{E}{Q} = \left| 1 - \frac{T_0}{T - T_0} \ln \frac{T}{T_0} \right|. \quad (\text{H.2})$$

Låt oss nu rita in denna kurva i fig. H.1, den skuggade linjen, och jämföra skillnaden. Som väntat blir exergifaktorn  $E/Q$  lägre för en begränsad värmemängd, då temperaturen sjunker i takt med att värme tas ur systemet. För låga temperaturer,  $T < T_0$ , och för temperaturer nära omgivningstemperaturen,  $T = T_0$ , blir exergifaktorn  $E/Q$  för en begränsad värmemängd ca hälften av den för en värmereservoar. För höga temperaturen minskar dock den relativa skillnaden. Det är alltså viktigt för exergiinnehållet vilken typ av system eller process som studeras.

Exergifaktorn för fjärrvärme blir sålunda:

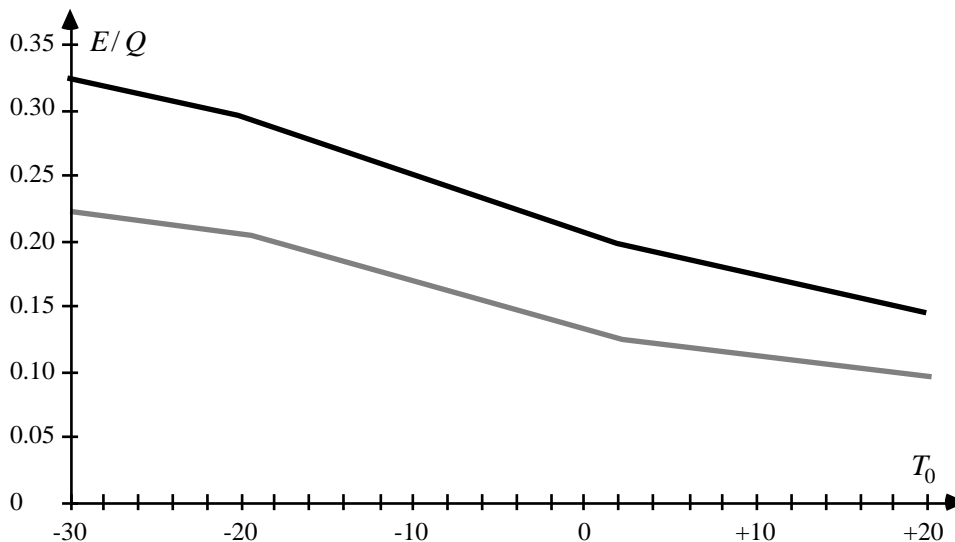
$$\frac{E}{Q} = 1 - \frac{T_0}{T_{\text{fram}} - T_0} \ln \frac{T_{\text{fram}}}{T_0}, \quad (\text{H.3})$$

där  $T_{\text{fram}}$  anger framledningstemperaturen ( $T_{\text{fram}} > T_0$ ) Om vi antar denna till  $85^\circ\text{C}$  då  $T_0 > +2^\circ\text{C}$  och att den sedan ökar linjärt med sjunkade utetemperatur till  $120^\circ\text{C}$  då  $T_0 < -20^\circ\text{C}$  då får vi den nedre skuggade kurvan i fig. H.2. Vi ser att exergifaktorn varierar stegvis mellan ca 10 och 22% då temperaturen sjunker från  $+20$  till  $-30^\circ\text{C}$ .

Eftersom en del av den levererade exergin returneras kan vi beräkna exergifaktorn för utnyttjad fjärrvärme till:

$$\frac{E}{Q} = 1 - \frac{T_0}{T_{\text{fram}} - T_{\text{retur}}} \ln \frac{T_{\text{fram}}}{T_{\text{retur}}}, \quad (\text{H.4})$$

där  $T_{\text{fram}}$  anger framledningstemperaturen, som ovan och  $T_{\text{retur}}$  anger returtemperaturen, vilken vi antar till  $55^\circ\text{C}$ . Vi får då den övre svarta kurvan i fig. H.2. Som väntat blir exergifaktorn högre, eftersom exergin nu tas ut vid en högre genomsnittlig temperatur. Den varierar nu istället stegvis mellan ca 15 och 32% då temperaturen sjunker från  $+20$  till  $-30^\circ\text{C}$ .



Figur H.2. Exergifaktorn för fjärrvärme, den övre svarta kurvan anger exergifaktorn för skillnaden mellan levererad och returnerad fjärrvärme vid  $55^\circ\text{C}$ , den nedre skuggade kurvan anger exergifaktorn för levererad fjärrvärme.

**Exempel:** Vad är exergifaktorn för fjärrvärme då utetemperaturen är  $0^\circ\text{C}$ ? Beräkna också exergifaktorn för utnyttjad fjärrvärme, se ekv. H.4 ovan?

Lösning: Först måste vi beräkna temperaturen på fjärrvärmen  $T_{\text{fram}}$  vid den rådande utetemperatur  $T_0$ . Då  $-20^\circ\text{C} < T_0 < +2^\circ\text{C}$  antar vi följande samband:

$$T_{\text{fram}} = 85 + (120 - 85) \cdot \frac{2 - T_0}{2 - (-20)}$$

vilket ger  $T_{\text{fram}} \approx 88.2^\circ\text{C} \approx 361\text{K}$ . Numeriska värden i ekv. H.3 ger således:

$$\frac{E}{Q} = 1 - \frac{273}{361-273} \ln \frac{361}{273} \approx 1 - \frac{273}{88} \ln (1.3223) \approx 0.13,$$

dvs exergifaktorn för fjärrvärmen blir alltså ca 13%.

För utnyttjad fjärrvärme får vi istället, enligt ekv. H.4, då returtemperaturen antas till  $55^\circ\text{C}$  dvs 328K:

$$\frac{E}{Q} = 1 - \frac{273}{361-328} \ln \frac{361}{328} \approx 1 - \frac{273}{33} \ln (1.1006) \approx 0.21,$$

dvs exergifaktorn för utnyttjad fjärrvärme blir alltså istället ca 21%.

### H.3 Exergibehovet för att upprätthålla en konstant temperatur

Den totala värmemängden som utbyts mellan ett verkligt system och omgivningen kan antas bestå av två delar: värmetransmission  $Q_v$  och värme genom materialtransport  $Q_m$  som ventilation och avloppsvärme dvs

$$Q = Q_v + Q_m \quad (\text{H.5})$$

Den sista termen beror ju på materialutbyte med omgivningen dvs att material av viss temperatur transporteras mellan systemen.

#### H.3.1 Värmetransmission

För att upprätthålla ett system vid en konstant temperatur måste vi kompensera för det spontana värmeutbytet mellan systemets begränsningsyta och omgivningen. Enligt termodynamikens 2:a lag kommer ju värme att gå från den varma över till den kalla sidan, se avsn. H.1 ovan. Det kallas värmetransmission och sker på tre sätt: ledning, strålning och konvektion. För måttliga temperaturdifferenser kan värmetransmissionen  $Q$  antas variera

linjärt med skillnaden mellan temperaturen för systemet  $T$  och omgivningstemperaturen  $T_0$ , enligt följande samband:

$$Q_v = UA |T - T_0| t \quad (\text{H.6})$$

där  $U$  är värmegenomgångskoefficienten för gränssytan  $A$  för systemet och  $t$  anger tiden. Då ( $T < T_0$ ), vilket anger att värme spontant går från omgivningen till systemet, måste alltså värmemängden  $Q$  bortföras för att upprätthålla en konstant temperatur. För ett system, t ex ett hus eller kylrum, där temperaturen upprätthålls genom tillförsel eller bortförsl av värme, kommer alltså uppvärmnings- alternativt kylbehovet och exergiinnehållet att variera med omgivningstemperaturen, enligt avsn. H.1 ovan. Exergin som måste tillföras för att motverka den spontana värmeövergången mellan systemet och omgivningen får vi då, genom att kombinera ekv. H.1 och H.6, till

$$E_v = \frac{UA(T - T_0)^2 t}{T} \quad (\text{H.7})$$

Notera att exergibehovet varierar alltså med kvadraten på temperaturskillnaden, medan energibehovet endast varierar linjärt med temperaturskillnaden, enligt ekv. H.6.

I avsn. H.5 nedan kommer vi att illustrera detta samband ytterligare genom att tillämpa det på temperaturförhållandena i Göteborg under år 1986.

### H.3.2 Ventilation och avloppsvatten

För ett verkligt system tillkommer också värmeförluster till omgivningen p g a ventilation och avloppsvatten. För vissa industrier kan dessa vara betydande. Energiinnehållet i dessa värmemängder fås genom sambandet:

$$Q_m = \left| \int_{T_0}^T m c_p(T') dT' \right| \quad (\text{H.8})$$

där  $m$  är massan,  $c_p(T')$  anger värmekapacitiveteten som funktion av temperaturen, som antas variera mellan  $T$  och  $T_0$ . (Värmekapaciteten  $mc_p$  kan också skrivas  $V\rho c_p$ , där  $V$  anger volymen och  $\rho$  anger densiteten.) Vanligen kan vi anta att värmekapacitivetet är konstant vilket medför att vi kan beräkna integralen i ekv. H.8 och får följande enkla samband:

$$Q_m = m c_p |T - T_0|. \quad (\text{H.9})$$

Eftersom vi nu har begränsade värmemängder som transporteras så måste vi nu kombinera ekv. H.2 med H.9 för att få motsvarande exergiförlust till:

$$E_m = m c_p (T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0}). \quad (\text{H.10})$$

Vid fasövergångar som då vatten fryser måste vi även ta hänsyn till den energi  $Q_{fas}$  som då omvandlas. Genom att fasövergången sker vid konstant temperatur  $T_{fas}$  kan exergin enkelt beräknas utifrån ekv. H.1 enligt:

$$E_{fas} = \left| \frac{T_{fas} - T_0}{T_{fas}} \right| Q_{fas} \quad (\text{H.11})$$

#### H.4 Exergibehovet för att upprätthålla en konstant temperatur utomhus

För bostäder anges ofta uppvärmningsbehovet  $Q$  för ett helt år och faktorn  $(T - T_0)t$  som antalet "graddagar" under året. Eftersom energivärdet är det samma oberoende av omgivningstemperaturen kan vi således relativt enkelt beräkna det årliga energibehovet. Men observera att vi också luras att tro, enligt resonemanget ovan, på en felaktig föreställning om den egentliga "kostnaden". Som vi tidigare konstaterat bör ju värme ha olika värde sommar och vinter. För exergibehovet blir situationen lite mer komplicerad eftersom exergiinnehållet bl a inte är linjärt beroende av utomhustemperaturen, enligt ekv. H.7. Genom en enkel modell kan vi dock beräkna exergifaktorn för den årliga energiomsättningen {Wall 1986}. Låt oss anta att utomhustemperaturen varierar harmoniskt under året samt under dygnet enligt följande samband:

$$T_0(t) = T_{\text{år}} + (T_{\text{år}} - T_{\text{min}}) \cos\left(\frac{2\pi t}{365}\right) + \frac{T_{\text{dag}} - T_{\text{natt}}}{2 \cos(2\pi t)}. \quad (\text{H.12})$$

där  $T$  är inomhustemperaturen (Kelvin),  $T_{\text{år}}$  är den årliga medeltemperaturen utomhus,  $T_{\text{min}}$  är lägsta femdygnsmedeltemperaturen utomhus och  $(T_{\text{dag}} - T_{\text{natt}})/2$  är en uppskattning av den genomsnittliga dygnsamplituden för temperaturen.

Vi kan då beräkna den genomsnittliga exergifaktorn under året till:



$$\frac{E}{Q} = \frac{\left(a^2 + \frac{b^2}{2} + \frac{c^2}{2}\right)d + \frac{b}{\omega} \left[\frac{b}{2}\sin(\omega d) - 4(a-c)\sin\left(\frac{\omega d}{2}\right)\right]}{T \left[ad - \frac{2b}{\omega}\sin\left(\frac{\omega d}{2}\right)\right]} \quad (\text{H.13})$$

där

$E$  = det totala exergibehovet för uppvärmning/kylning under ett år [J/år]

$Q$  = värmebehovet (energi) för ett år [J/år]

$a$  =  $T - T_{\text{år}}$  [K]

$b$  =  $T_{\text{år}} - T_{\text{min}}$  [K],

$c$  =  $(T_{\text{dag}} - T_{\text{natt}})/2$  [K]

$d$  = antal drift dagar per år [dygn/år]

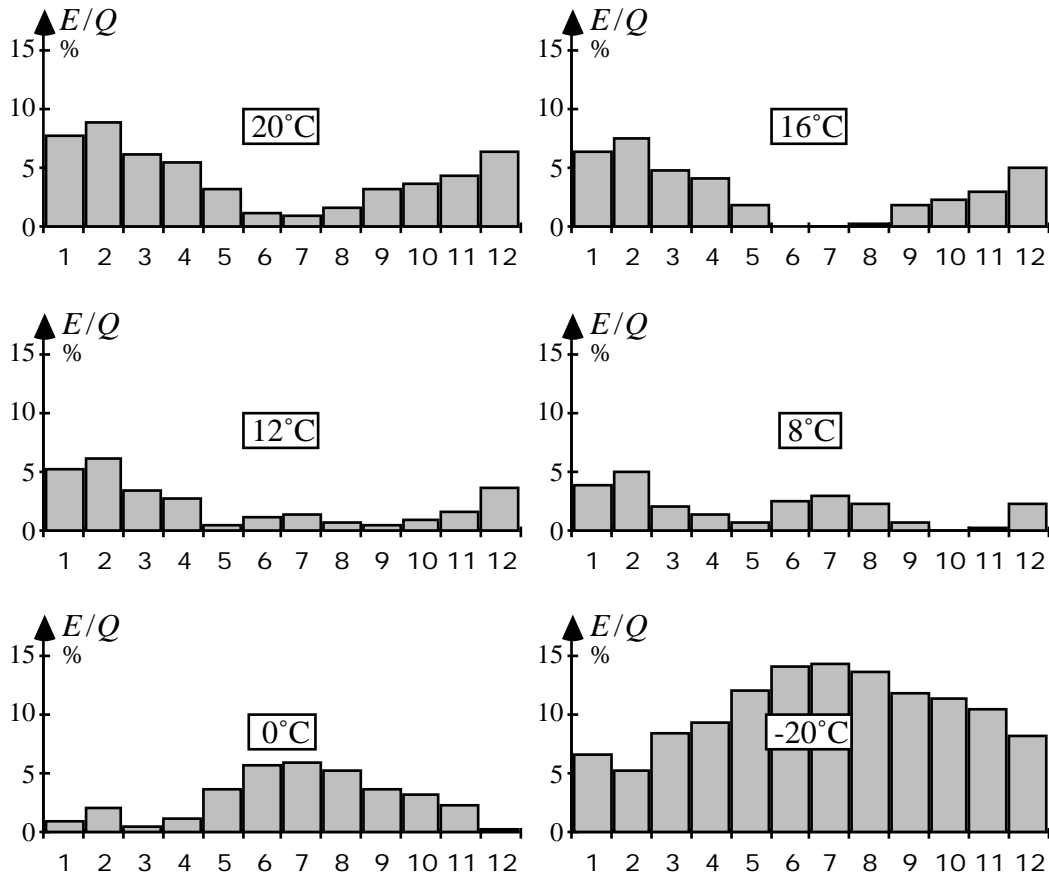
$\omega$  =  $\frac{2\pi}{365}$  per dygn.

Genom att nu, som tidigare, kombinera denna ekvation med ekv. H.6 kan vi alltså beräkna det totala exergibehovet för att upprätthålla ett system vid en konstant temperatur i utomhusomgivningen, t ex för att hålla temperaturen vid 20°C i ett hus. Tidigare beräkningar som gjorts för Göteborg ger exergifaktorn 4% {Wall 1986}.

## H.5 Exergibehovet för att upprätthålla en lokaltemperatur i Göteborg

### H.5.1 Exergin för värmeflöden vid olika temperaturer

Eftersom utomhustemperaturen varierar starkt under året kommer exergiinnehållet för ett värmeflöde också att variera. I fig. H.3 nedan anges exergifaktorn  $E/Q$  för olika temperaturnivåer i Göteborg utifrån månadsmedeltemperaturen.



Figur H.3. Exergifaktorn  $E/Q$  för olika temperaturnivåer i Göteborg under år 1986, månadsmedeltemperaturerna var: jan. -3.1, febr. -6.2, mars 1.7, april 3.9, maj 10.4, juni 15.8, juli 16.5, aug. 14.8, sept. 10.2, okt. 8.9, nov. 6.8 och dec. 1.1°C, årsmedeltemperaturen var: 6.7°C (januari anges som 1, osv).

Som vi ser är naturligtvis exergifaktorn lägre på sommaren för varma temperaturer medan den är högre för låga temperaturer. Vid temperaturen -20°C är exergin relativt hög under hela året.

Om vi antar att energitillförseln  $Q$  är jämn under året, dvs oberoende av utomhustemperaturen, vilket kan anses gälla för kyl- och fryslager som är placerade i tempererade lokaler, då anger ytan under staplarna det relativa exergibehovet, relativt utomhustemperaturen, för att upprätthålla dessa temperaturer under året. Det relativa exergibehovet relativt den omedelbara omgivningen, t ex en tempererad lokal, kommer naturligtvis istället att bestämmas av de aktuella temperaturdifferenserna. För t ex ett kylager med temperaturen +8°C i en omgivning med +16°C blir exergibehovet enligt ekv. H.1:

$$E = \left| \frac{(8+273) - (16+273)}{(8+273)} \right| \cdot Q \approx 0.028Q$$

dvs en ideal kylmaskin för att upprätthålla denna temperaturdifferens skulle ha en kylfaktor (COP) av ca 35<sup>1</sup>. En verklig kylmaskin borde åtminstone kunna erbjuda kylfaktorn 10, dvs ca 30% av den ideala, om den optimerades för denna temperaturdifferens. Om detta skulle appliceras på kylrummen i Slakthuset skulle alltså det sammanlagda energibehovet för uppvärmning och kylning kunna reduceras betydligt, då både kyl- och värmeproduktionen utnyttjas i kylmaskinen/värmepumpen. Idag sker endast en ringa del av värme- och kylproduktionen samordnat.

#### *H.5.2 Exergibehovet för att upprätthålla ett system vid en konstant temperatur*

Låt oss också använda exergibegreppet för att studera hur exergibehovet för att upprätthålla ett system som en lokal eller ett frysrum vid en konstant temperatur under det att utomhustemperaturen varierar, enligt ekv. H.7 ovan. Om vi baserar studien på månadsmedeltemperaturerna för Göteborg får vi följande resultat, se fig. H.4.

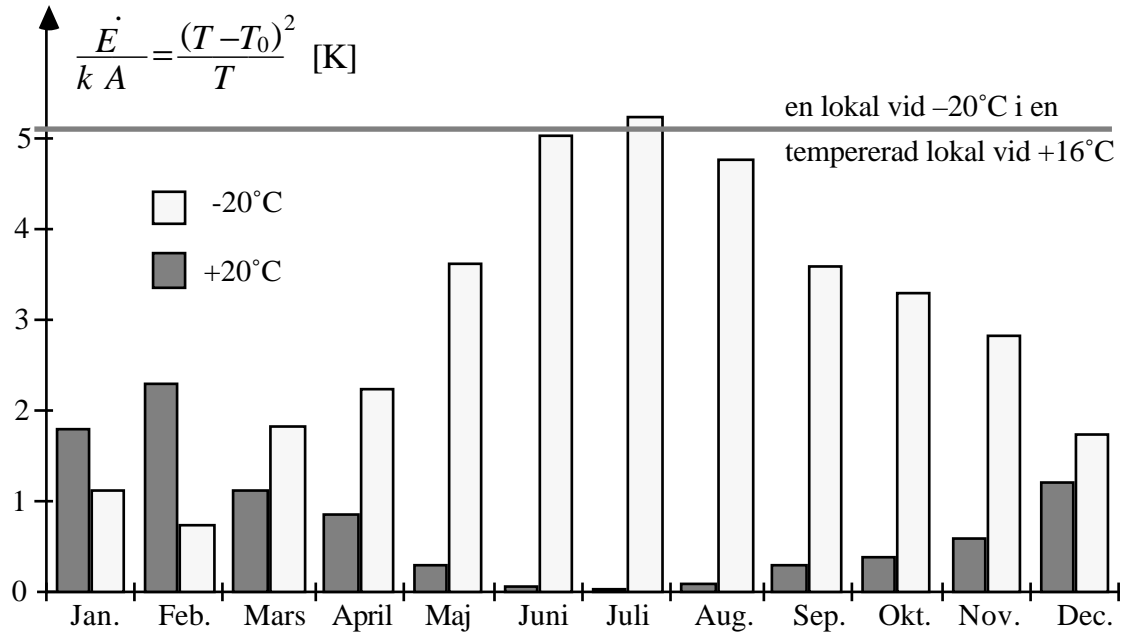
Som vi ser "kostar" det betydligt mer eller ca 4 gånger mer exergi att upprätthålla temperaturen i ett frysrum, vid  $-20^{\circ}\text{C}$  än en lokal vid  $+20^{\circ}\text{C}$ . Detta talar alltså för att vi bör isolera och täta ett kylrum betydligt effektivare än vad vi idag tillämpar för t ex bostäder där isoleringstjockleken idag närmar sig 30 cm för småhus.

Kylbehovet är också naturligtvis betydligt större under sommaren då vi har god tillgång på värme, vilket via kemiska värmepumpar skulle kunna utnyttjas för produktion av kyla.

Av denna enkla studie framgår alltså varför kyla är dyrare på sommaren än på vintern. Förr i tiden tog vi tillvara is och lagrade för användning under sommaren. Det är inte svårt att förstå den verksamheten mot bakgrund av figur 15. Idag utvecklar vi system för att lagra värme från sommar till vinter. Antagligen vore det ännu mer lönsamt att utveckla motsvarande system för lagring av kyla från vinter till sommar.

---

<sup>1</sup> Kylfaktorn =  $Q/E \approx 1/0.0285 \approx 35$ , analogt fås värmefaktorn =  $(Q+E)/E = Q/E+1 \approx 36$  dvs kylfaktorn +1.



Figur H.4. Relativa exergieffekten för att upprätthålla temperaturen i en varm respektive kall lokal beräknat från månadsmedeltemperaturen i Göteborg samt för ett frysrum (-20°C) i en tempererad lokal vid +16°C. Förhållandet mellan det totala exergibehovet för det kalla och varma systemet blir 3.9 samt för frysrum i +16°C och varma systemet blir på samma sätt 6.6.

Som vi ser "betalar" sig alltså en isolering mer än 6 gånger bättre vid isolering av ett frysrum i en tempererad lokal än vid vanlig husisolering.

## REFERENSER

- Adler-Karlsson, G., *Lärobok för 80-talet*, Prisma, Lund (1975).
- Adler-Karlsson, G., *Lärobok för 90-talet*, Prisma, Stockholm (1990).
- Andersson, L., "Problemanalys — åtgärd", *Symposium om energikvalitetsbegrepp*, red. G. Wall, Chalmers tekniska högskola, Göteborg (1981).
- Baehr, H. D., *Energie und Exergie*, VDI-Verlag, Düsseldorf (1965).
- Borgström, G., *Focal Points - A Global Food Strategy*, Macmillan, New York (1973) eller *Brännpunkter*, Trevi 1975.
- Boulding, K., *A Reconstruction of Economics*, Wiley, New York (1950) se även *The Economics of the Coming Spaceship Earth* i *Environmental Quality in a Growing Economy*, red. Henry Jarret, Baltimore, John Hopkins Press, s. 3-14 (1950).
- Brunsson, N., *The Organization of Hypocrisy*, Chichester: John Wiley (1989).
- Brunsson, N., "Det organiserade hyckleriet", *Tvärsnitt*, s. 55-60 (1990).
- Cardfelt, H., "Energi- och exergiflöden vid Arlas mejeri i Göteborg", *Fysisk resursteori*, Chalmers (1987).
- Cardfelt, H., "Effektiviteten vid uppvärmning i Göteborg, rapport för Göteborg Energi AB (1988).
- Carnot, N. L. S. (1824), *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance*, Bachelier, Paris se även Fox, R. (ed.), *Librairie Philosophique J. Vrin*, Paris 1978.
- Chapman, P. F. and Roberts, F. *Metal Resources and Energy*, Butterworths (1983).
- Cottrell, F., *Energy and society. The relation between energy, social changes and economic development*, Mc Graw-Hill, New York (1955).
- Energiplan för Göteborg, Broschyr, Göteborgs stad, Energigruppen (1987).
- Georgescu-Roegen, N., *The Entropy Law and the Economic Process*, Cambridge, Harvard Univ. Press (1971) se även *Southern Economic Journal* 41, Chapel Hill, N.C. (1975).
- Gibbs, J. W. (1873), *A Method of Geometrical Representation of the thermodynamic properties of substances by means of surface*. *Trans. Conn. Acad.* II, s. 382-404 se även *The Collected Works*, Yale University Press, vol. 1 (1928).
- Hagenfors, Leif, "Värmedrivna kylprocesser — en möjlighet att utnyttja fjärrvärme sommartid?", *Fysisk resursteori*, Chalmers (1991).
- Hesselmar, M. och Winberg, A., *Privat kommunikation* (1991 och 1992).
- Hornborg, A., "Imperialismens termodynamik", *Tvärsnitt*, nr. 4, s. 32-41 (1989).
- IFIAS, *Workshop reports, Energy Analysis*, International Federation of Institutes of Advanced Study, report no. 6 se även "Energy Analysis and Economics" Report no. 9 (1975) eller Kristoferson, L. och Nilsson, S., *Ambio* 5, 27 (1976).
- Imai, M., *KAIZEN - The Key to Japan's Competitive Success*, The KAIZEN Institute, Ltd (1986).
- Kashiwagi, T., "Present Status and Future Prospects of Advanced Energy Technology for Solving Global Environmental Problems", *Europe - Japan The Global Environmental Technology Seminar 1990*, JETRO, Stockholm (1990).
- Kåberger, T., *Privat kommunikation* (1992).

- Lindgren, P., Keen, K., Åkerlund, P., Jungen, B., Eriksson, T., *Jorden vi ärvde, Sveriges Utbildningsradio* (1983).
- Lovelock, J. E., *The Ages of Gaia: a Biography of Our Living Earth*, Oxford University Press (1988).
- Lundberg, B., och Abram-Nilsson, K. *Synvänder - om naturen, människan och helheten*, LTs förlag (1988).
- Malaska, P., "Nature-Oriented Technology", Turku School of Economics and Business Administration, Finland (1989).
- Nordström, C. och Nordström, K., *Privat kommunikation* (1987).
- Odum, H. T., *Environment, Power and Society*, Wiley, New York (1971).
- Odum, H. T. och Odum, E. C., *Energy Basis for Man and Nature*, New York, Wiley (1976).
- Prop. 1978/79:115, Regeringens proposition 1978/79:115, Riktlinjer för energipolitiken, Bilaga 1 (1979).
- Rant, Z., *Forschung Ing.-Wesens* **22** (36) (1956).
- Schrödinger, E., *What is life?*, Cambridge University Press (1944) se även *Vad är liv?*, Bonniers (1949).
- SOU 1972:59, Statens offentliga utredningar 1972:59. Att välja framtid (1972).
- SOU 1974:64,65, Statens offentliga utredningar 1974:64,65. (1974).
- SOU 1974:72-76, Statens offentliga utredningar 1974:72-76. *Energiforskning* (1974).
- Szargut, J., Morris, D. R., and Steward, F. R., *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*, Springer (1988)
- Tribus, M., *Quality First*, National Society of Professional Engineers, Washington (1987) och Tribus, M., "Deming's Way", *Mechanical Engineering*, s. 26-30, Januari 1988.
- Tribus, M. och McIrvine, E. C., *Scientific American* **224** (3) s. 179 (1971).
- Värmepumpsanläggningen i Rya, broschyr från Energiverken i Göteborg (1983).
- Wall, G., *Exergi - ett användbart begrepp inom resursräkenskap*, Chalmers tekniska högskola, Göteborg (1977).
- Wall, G., *Exergy - a Useful Concept*, Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg (1986).
- Wall, G., "Exergy Needs to Maintain Real Systems Near Ambient Conditions", "Florence World Energy Research Symposium", 28 Maj-1 Juni, 1990, Florence, Italy, S. S. Stecco, M. J. Moran red., *A Future for Energy*, s. 261-270, Pergamon.
- Wall, G., "Naturliga fysiska resurser", kompendium i alternativa energisystem, Högskolan Eskilstuna/Västerås (1991).
- Wall, G. och Cardfelt, H., "Exergistudie av Slakthusets industriområde i Göteborg", 62 s., Göteborg Energi AB (1988)
- Wilkinson, R.G., *Poverty and progress*, Methuen, London (1973).
- Wirén, E., *Naturresurserna och den regionala planeringen*, rapport 90:7, Forskningsrådsnämnden, Stockholm (1990).