

EXERGI, HELHETSSYN OCH INTELLIGENS- EN TILLÄMPNING PÅ VÄSTERÅS

av

Göran Wall

1992

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sida
Förord	4
NOMENKLATUR	6
SAMMANFATTNING	8
1 INTRODUKTION	18
2 EXERGI	23
2.1 Energi, materia och ordning	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 EXERGI, HELHETSSYN OCH INTELLIGENS	39
3.1 Exergi — ett naturvetenskapligt begrepp	39
3.2 Exergi hos naturresurser	45
3.3 Världshandel och exergiflöden	47
3.4 Skillnad mellan energi- och exergibetraktelser	48
3.5 Exergi och andra resursmått	54
3.6 Flöden, lager och fonder	57
3.7 Effektivitet och effekt	61
3.8 Exergianalys	64
3.9 Exergiekonomi	66
3.10 Helhetssyn och myter om miljön	68
3.11 Intelligens och demokrati	78
3.12 Exergiomsättningen i det svenska samhället	88
3.13 Resurskedjor	97
4 VÄSTERÅS	102
4.1 Historia	102
4.2 Naturliga exergiflöden	103
4.3 Omsättningen av värme och el i Västerås 1989	104
4.3.1 Tillförsel	105
4.3.2 Primär omvandling	107

4.3.3	Sekundära exergibärare	116
4.3.4	Slutanvändning	119
4.3.5	Sammanställning av energisystemet	121
4.4	Skogs- och jordbruk	125
4.5	Bilen som transportmedel	128
4.6	Huset och dess möjligheter	130
5	EPILOG	131
5.1	Exergibegreppet i samhällsplaneringen	131
5.2	Huset — en viktig komponent i ett resurssnålt och miljövänligt samhälle	131
5.3	Ett rationellt resurssystem baserat på en integration av produktion och konsumtion	132
5.4	Hinder mot ett resurssnålt och miljövänligt samhälle	135
5.5	Förslag på en ny skatt — en exergiskatt	139
	Appendix A: Härledning av exergibegreppet	142
	Appendix B: Exergin i material	147
	Appendix C: Effektivitetsbegrepp vid exergiomvandlingar	149
	Appendix D: Exergi och information	150
	Appendix E: Några idealiserade termodynamiska system	152
	Appendix F: Tre driftfall vid block 4 i kraftvärmeverket, Västerås	157
	Appendix G: Naturliga fysiska resurser	160
	Appendix H: Exergi för värme och kyla	164
	Referenser	175

Förord

Denna skrift utgör slutrapporten i forskningsprojektet “Exergiomsättningen i Västerås kommun”, som delvis finansierats genom ett stöd från Statens energiverk, NUTEK, projekt nummer 716-005 samt bidrag från Uppsala universitet, rörlig resurs för högskolelektorers forskning 1990/91 och 1991/92. Ytterligare rapporter i detta projekt är:

Arnmark, L., et al. (1992) *Fosfor i Svartådalen*, Västerås kommun,

Soisalo, K., (1992) *Exergiomsättningen i kraftvärmeverket i Västerås* (diskett med allt beräkningsunderlag för den som vill göra egna kalkyler eller studera detaljer i exergiomsättningen) och

Östlund, M. et al., (1991) *Energiomsättningen i Västerås kommun 1989*.

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 mer av besluten till folket”. Jag som trodde att det var tvärt om — 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. Ett närmare granskande av vår resursomsättning är inte alltid så uppskattat som man kan tro. Skriften representerar min egen mycket kritiska syn på den pågående utvecklingen baserad på egna erfarenheter och insikter, men naturligtvis är jag öppen för andras synpunkter och kommentarer. Utan det offentliga samtalet kan vi aldrig lösa dessa problem.

Mitt mål som högskolelärare är att få mina elever att lära sig att lära och att lära sig att använda sin hjärna innan någon annan gör det. Intresset för exergi- och miljöinriktad högskoleutbildning är mycket starkt bland eleverna, men tyvärr inte lika starkt bland övriga inom högskolan. Den akademiska världen prioriterar ofta traditioner och etikett framför nytänkande och vetenskap — Ofta beroende på okunskap, perspektivlöshet och koteri. Däremot tycker jag mig se ett starkt framväxande naturresurs- och miljöintresse inom framför allt samhällsplaneringen på kommunal nivå, vilket är mycket glädjande. Många kommuner befinner sig idag på ruinens brant och situationen blir stadigt värre, därför är behovet av eftertanke och nytänkande akut. Vi har således en enorm folkbildningsuppgift framför oss — att bota en massiv inkompetens byggd på bristande verklighetsuppfattning, bristande helhetssyn och bristande demokrati (samordnad intelligens). Denna inkompetens är vårt

största hot och det första nödvändiga steget ur detta är att bli medveten, vilket jag hoppas att denna skrift skall förmedla.

Texten vänder sig ibland till personer med grundläggande kunskaper i naturvetenskap, men även andra bör utan större svårigheter kunna ta del av innehållet genom att hoppa över dessa delar.

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

Tre böcker som jag varmt vill rekommendera är *Synvänder – om naturen, människan och helheten* av Bo Lundberg och Kerstin Abram-Nilsson, LTs förlag (1988), vilken ger ett humanistiskt perspektiv på exergibegreppet och en helhetsyn, och *Papalagi — Den vite mannen tal* av söderhavshövdingen Tuiavii från Tiavea översatt av Leif Janzon, bokförlaget Korpen (1988), vilken ger ett perspektiv på vår egen civilisation, samt *Optimum — om miljön och människans möjligheter* av Bo Lundberg och Kåre Olsson, Utbildningsradion (1992), vilken kommer att följas upp med program i både radio och TV under 1993.

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

Jag vill också framföra mitt tack till Rolf Lundström, Energi och Vatten (tidigare Tekniska verken) och Gun Wallenberg, Stadsbyggnadskontoret i Västerås, Mattias Östlund som tagit fram energistatistiken för Västerås kommun, Kia Soisalo som bidragit med uppgifter för skogs- och jordbruk samt kartlagt exergiomsättningen vid kraftvärmeverket i Västerås, Statens energiverk och Uppsala universitet, som bidragit till finansieringen av denna studie. Dessutom vill jag tacka Lars Berggrund, Göteborgs stadsbyggnadskontor, för alla goda synpunkter och initiativet till en liknande studie för Göteborg *Exergi och helhetssyn — en tillämpning på Göteborg* {Wall 1992} och alla andra som bidragit med värdefulla synpunkter och gjort denna skrift möjlig.

Mölndal i augusti 1992

Göran Wall, Solhemsgatan 46, 431 44 Mölndal
Tel. och fax 031-87 75 79

NOMENKLATUR

Beteckning	Storhet [Enhet enligt SI-systemet]
A	Area [m^2]
c	Ljushastigheten i vakuum 2.997925×10^8 m/s
c, C	Specifik värmekapacitet [$\text{J}/\text{kg K}$] eller värmekapacitet [J/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 [J/kg , Wh/kg] och exergi, nyttig energi [J , Wh]
E/Q	Exergifaktor [dimensionslös, %]
f, F	Specifik fri energi (= Helmholtz funktion) [J/kg , Wh/kg] och fri energi [J , Wh], $F = U - TS$.
g, G	Specifik fri entalpi (= Gibbs funktion) [J/kg , Wh/kg] och fri entalpi [J , Wh], $G = H - TS$.
h, H	Specifik entalpi [J/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_{en}	Energieffekt [W]
P_{ex}	Exergieffekt [W]
p	Tryck [Pa]
p_0	Omgivningstryck [Pa , bar] här $101.3 \text{ kPa} = 1.013 \text{ bar}$
q, Q	Specifik värmemängd [J/kg , Wh/kg] och värmemängd [J , Wh]
\bar{R}	Allmänna gaskonstanten 8.314 [$\text{J}/\text{mol K}$], allmänna tillståndslagen för ideala gaser lyder: $pV = n\bar{R}T$, notera att denna även skrivs $pV = mRT$, dvs R anges i $\text{J}/\text{kg K}$ och blir specifik för varje gas.
S	Entropi, anger grad av oordning följande samband gäller (2:a lagen): $dS = Q/T$ [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 $0 \text{ K} = -273.15^\circ\text{C}$)

T_0	Omgivningstemperatur [K] oftast 20°C 293 K
u, U	Specifik inre energi [J/kg, Wh/kg] och inre energi [J, Wh]
v, V	Specifik volym [m^3/kg] och volym [m^3]
W	Arbete (Work) [J, Wh], definitionsmässigt lika med exergi
μ_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
μ_{i0}	Kemisk potential för ämne i i omgivningen [J/mol]
η_{en}	Energiverkningsgrad = $Q_{\text{ut}}/Q_{\text{in}}$ där Q anger den nyttjade energin [dimensionslös, %]
η_{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 = 10^3
M	Mega = 1 000 000 = 10^6
G	Giga = 1 000 000 000 = 10^9
T	Tera = 1 000 000 000 000 = 10^{12}
P	Peta = 1 000 000 000 000 000 = 10^{15}

Enheter

W	Watt
J	Joule, 1 J = 1 Ws (Wattsekund), 1 Wh (Wattimme) = 3 600 Ws = 3 600 J, dvs 1 GWh = 3.6 TJ och 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 kvalitet förbrukas. Denna kvalitet — exergin — 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.

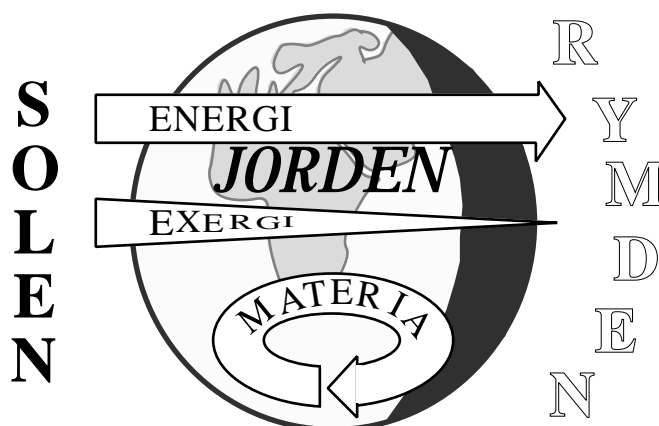
Har vi ingen kontrast eller skillnad då har vi inte heller någon exergi och desto större kontrast desto mer exergi har vi. Kontrasten eller exergin kan uttryckas på många olika sätt; som energi: en kall glasspinne en varm sommardag, som material: en guldklimp i sanden, eller som information: koderna 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, den största kontrasten av allt i vår värld.

Solen — vår “enda” exergikälla

Nästan all exergi, som omsätts 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 omsätts 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 mineralier "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. Ett miljöutsläpp är således harmlöst om dess exergi är noll.

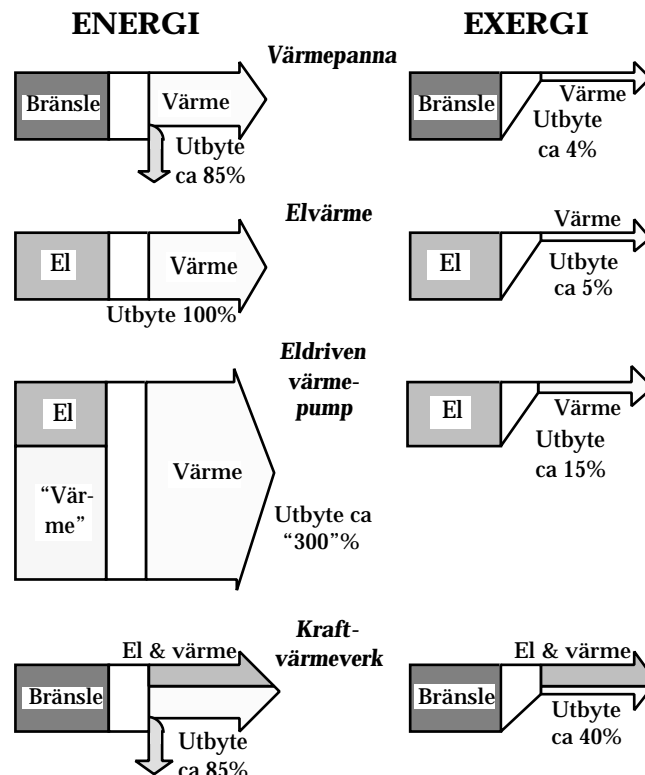
Exergibegreppet presenteras i kap. 2, och en härledning av begreppet ges i app. A. I app. E beräknas exergin för några idealiserade termodynamiska system. Exergi kan kort sägas ange den nyttiga delen av en resurs i dess omgivning, det vill säga nyttan — arbete eller den ordning — som resursen kan uträtta 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 och app. C 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 "Exergitutredning 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 exergikutbytet 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.



Exergikutbytet 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 exergikutbytet är analogt med det ekonomiska utbytet. I ett kraftvärmeverk — både el(kraft)- och

värmeproduktion — är energiutbytet ca 85 procent men exergiuutbytet 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, exergiuutbytet (“värdeutbytet”) däremot kan aldrig överstiga 100 procent — en grundläggande naturlag. En enkrona kan vi växla i tjugo femöringar och på samma sätt kan vi, vid en ideal process, “växla” en energienhet el i tjugo energienheter rumsvärme, men fortfarande har vi en krona eller en exergienhet.

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 verkligheten och då särskilt samhällets resursomsättning. Det moderna industrisamhället framstår som en gigantisk exergislösare. Exergiuutbytet 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 exergin då 1kg faller 1dm. 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 drivkraften 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.

Utifrån 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 tillfredsställa 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 och app. C beskriver jag effektivitetsbegrepp som energiverkningsgrad och exergiverkningsgrad, vilka är användbara vid jämförelse mellan olika system eller processer. Hjälpmiddel vid fördjupade exergistudier är metoder som exergianalys, avsn. 3.8, och exergiekonomi, avsn. 3.9. Vid exergianalys av t ex en bil eller ett biobesök beräknas den totala exergi som åtgår för att tillverka en bil eller se en film på bio. Exergiekonomisk optimering innebär att en process görs så ekonomisk som möjligt samtidigt som förlusterna av exergi och pengar tydligt redovisas.

Att bejaka exergibegreppet, en helhetssyn på miljön och människan som en självständigt tänkande varelse 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 bristande helhetssyn och några av våra vanligaste myter om miljön berörs i avsn. 3.10. Dessa myter är ett avgörande hinder för att vi skall kunna ta miljöproblemen på allvar och gynnar istället en alltmer utbredd inkompetens. 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 en helhetssyn 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. Följande bild kan sammanfatta det ovan sagda.

<p>Tre nödvändiga synvänder</p> <p>Verklighetsuppfattning: Synen på verkligheten Exergi istället för energi — gör att vi ser problemen och möjligheterna</p> <p>Helhetssyn: Synen på miljön (naturen) Se naturen som en vän —en del av oss själva— istället för en fiende! Samarbeta med naturen istället för att motarbeta den —då kan vi utnyttja naturkrafterna istället för att bli offer för dem.</p> <p>Intelligens: Synen på människan Se människor som tänkande varelser — samarbete istället för konkurrens! Medansvar —demokrati— föder kreativitet och livskvalitet.</p>

I avsn 3.12 presenteras exergiomsättningen i det svenska samhället. Utifrån denna beskrivning av resursomsättningen kan man se 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.

För att ytterligare illustrera värdet av exergibegreppet och en helhetssyn behandlas i kap. 4 exergiomsättningen i Västerås.

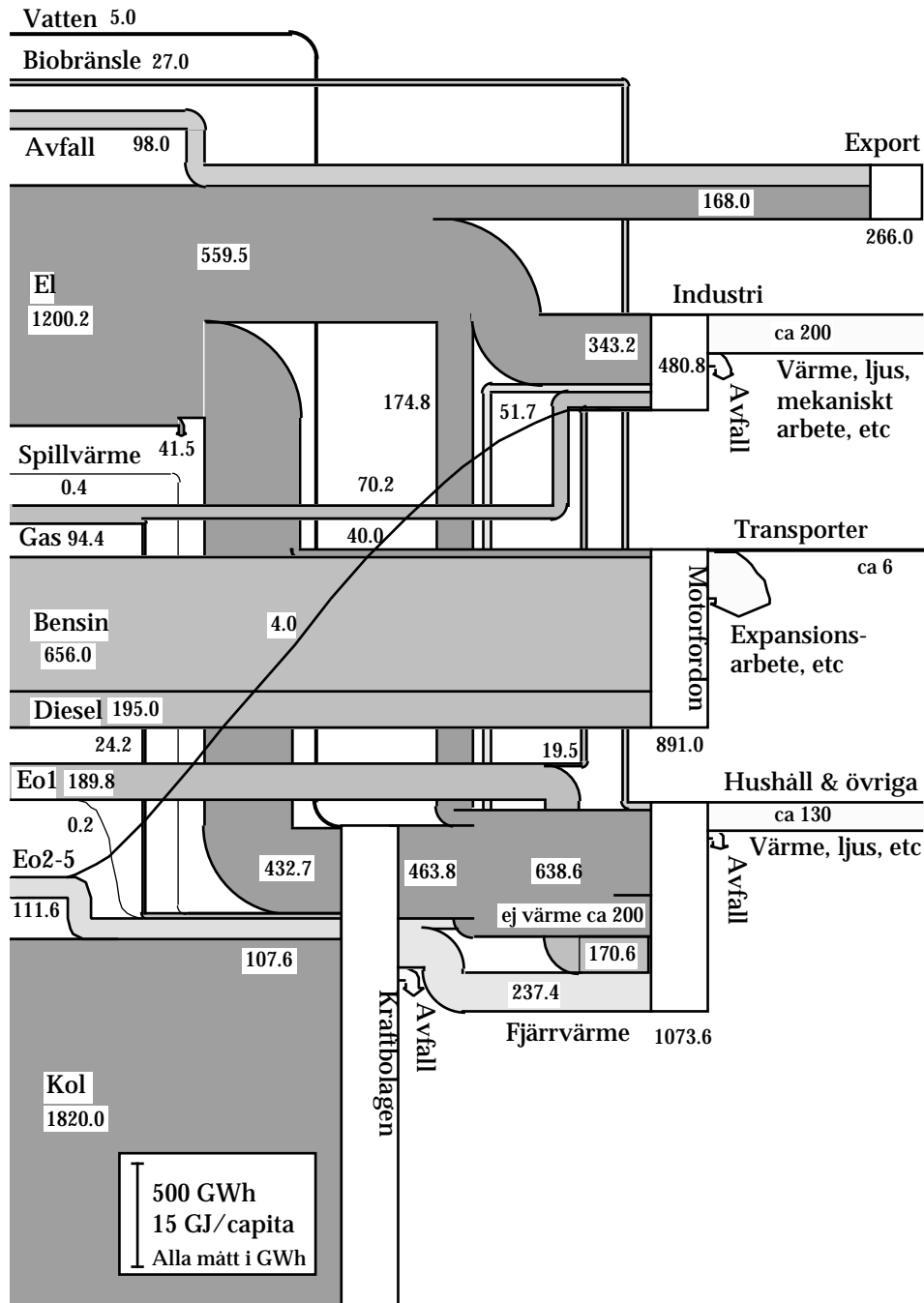
Tillämpning på Västerås

Exergi när Västerås i naturliga flöden som solljus, vind och strömmande vatten, 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 3 300 PJ mot Västerås land- och havsytta, vind 11 PJ över vattenytan, gröda 12 PJ, virke 2 PJ och Svartån och Sagån 0.06 PJ/år.

Det naturliga resursflödet över Västerås framstår således som enormt. Av detta skulle sol och vind kunna göra västeråsarna mer än självförsörjande på värme och el.

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, samt en fjärdedel av exergin ur det strömmande vattnet i Svartån och Sagån. Solexergiinflödet över Västerås tätort, som utgör ca 60 km², är ca 220 PJ per år samtidigt som exergibehovet för uppvärmning, under ett normalår, i Västerås är 0.37 PJ per år. Mindre än 0.2 procent av solexergin över tätorten skulle alltså kunna täcka hela uppvärmningsbehovet. Solexergiinflödet mot ett enskilt hus motsvarar ofta mer än 100 gånger uppvärmningsbehovet.



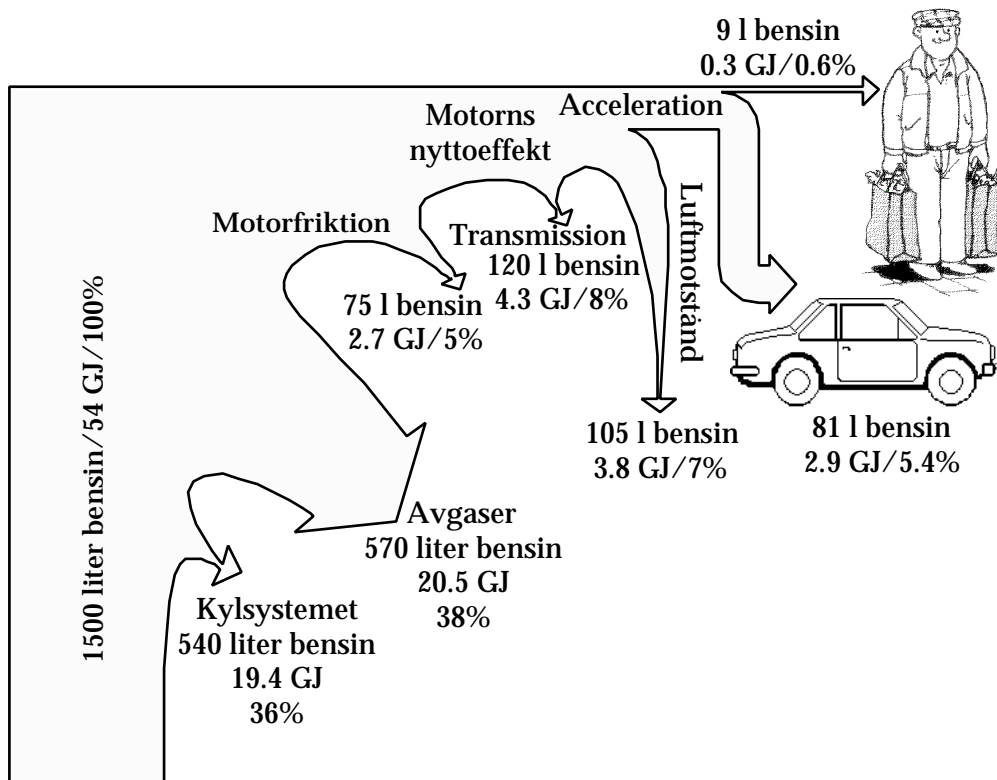
Västerås är en utpräglad industriort som helt domineras av ABBs (Asea Brown Boveri) verksamhet. Nästan hela Västerås värmebehov tillgodoses av

Västerås Kraftvärmeverk (KVV). Kraftvärmeverket omvandlar vanligen kol till hetvatten, som når abonnenterna via fjärrvärmenätet. Oljeeldning förekommer endast vid spetslast eller som reserv. Vid lågt elpris används även el för värmeproduktionen, vilket medför en extremt dålig exergiverkningsgrad. Den genomsnittliga verkningsgraden för driftåret 89/90 blir 90% (energi) respektive 34% (exergi) för kraftvärmeverket. Elbehovet tillgodoses framför allt genom köp från Vattenfall.

Exergiomsättningen i energisystemet, se figuren ovan, visar på stora förluster, vilka inte framgår i energiomsättningen. Exergiuutbytet, dvs förhållandet mellan tillgodogjord och tillförd exergi blir endast 14%, dvs ca 39% förloras i primärledet framför allt i kraftvärmeverket och 47% av tillförd exergi förloras hos användaren. Om vi bortser från exporten blir exergiuutbytet ännu lägre eller ca 9%. Enorma resurser kan alltså sparas genom en effektivare omvandling mellan tillförselsystemet och användaren.

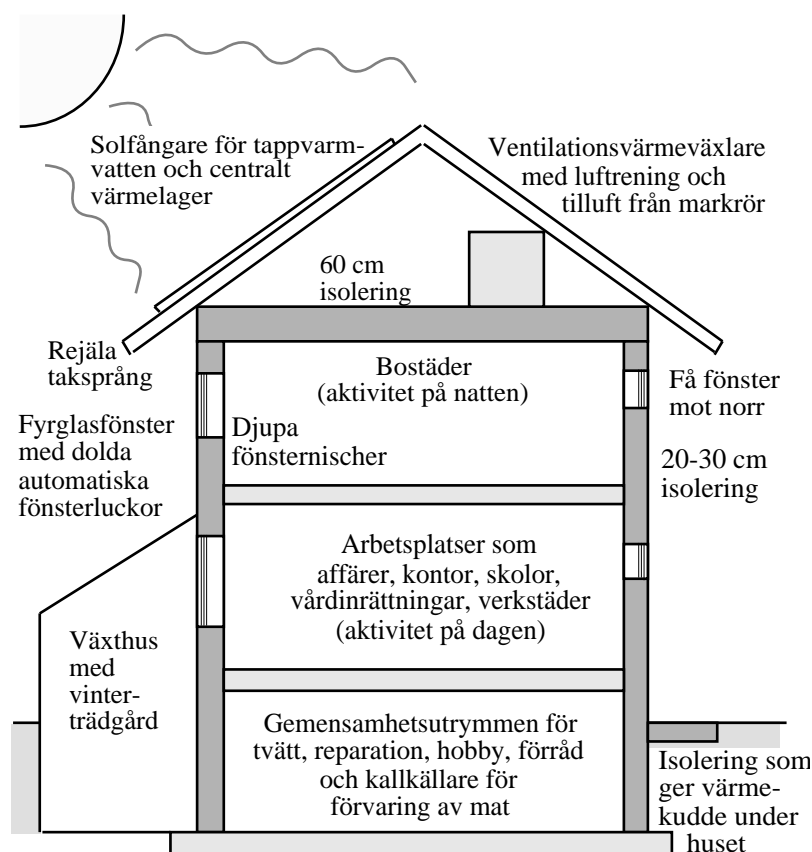
Att ersätta ett fossilt bränsle med ett annat, olja med gas, är inte en miljö- och resursmässig lösning i ett längre perspektiv. På sikt måste samhällets resurser vara förnybara och miljövänliga. Som vi skall se kan en lösning på både uppvärmnings och transportproblemet vara en vettig ombyggnad av det befintliga bostadsbeståndet, se huset nedan. Detta skulle dessutom ge värdefull sysselsättning där människor bor.

Bilen



Bilen svarar för den största exergiförbrukningen inom transportsektorn. Exergitvåbytet för en bil, se figuren ovan, som transportmedel är ca 0.6 procent, dvs för att flytta västeråsaren 1500 mil med bil används 1500 liter bensin när utvåbytet 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. Hårtill kommer byggnation och underhåll av vägar. Det redan låga exergitvåbytet blir alltså ånnu lägre om man också tar hänsyn till “kringkostnaden”. Här erbjuder cykeln och de kollektiva transportmedlen ett vettigt alternativ åven i många andra avseenden — inte minst trafiksåkerheten. Transportbehovet kan också ses som resultatet av en bristande samhållsplanering. Genom ett bättre utnyttjande av våra hus och en större samordning av olika samhållsfunktioner blir många transporter onödiga, se huset nedan.

Huset



Dessutom:

- Jåsning eller kompostering av humanavfall och köksavfall
- Avfallsåtervinning genom separation av papper, glas, metall, plast etc
- Planteringar av nyttoväxter som fruktråd och bårbuskar
- Boendeinflytande, mm

De typiska 50-tals husen 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 miljövånligt samhålle, se figuren ovan.

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.

En möjlighet

Exergibegreppet ger oss en insikt i samhällets resursomsättning — en naturvetenskaplig verklighetsbeskrivning — 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 det enorma slöseriet och de samtidiga enorma möjligheterna till effektivisering.

Exergibegreppet ger oss således ett verktyg för att vrida utvecklingen rätt. Genom att tillägna oss exergibegreppet, en helhetssyn och verklig demokrati, som tar till vara samhällets största resurs — de enskilda människornas förmåga att tänka — skapar vi förutsättningar för att effektivisera resursanvändningen och samtidigt minska miljöeffekterna och sluta kretsloppen, vilket är en förutsättning om vi skall rädda miljön — vårt eget livsrum. Ett första steg i den riktningen vore att kraftigt beskatta resursutarmning och miljöförstöring genom en exergiskatt, vilket jag kort berör i kap. 5.

1. INTRODUKTION

Bristerna i det moderna samhällets resursförvaltning ligger på tre plan — inadekvata resursmätt, vilket skapar en falsk verklighetsuppfattning, avsaknad av helhetsperspektiv och ett alltför begränsat medborgarinflytande, dvs missbruk av mänskliga resurser. För det första saknas ett naturvetenskapligt baserat resursmätt, pengar som mått är alltför godtyckligt 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 uppfattning av verkligheten. Idag talar man t o m om att prissätta miljön — miljöekonomi, vilket helt saknar verklighetsförankring. Ekonomi är ingen naturvetenskap, ekonomi är snarare en religion — ekonomismen — den rike mannens evangelium. Alltings beroende av allt, i synnerhet miljöeffekternas beroende av samhällets resursomsättning — en helhetssyn — saknas också i samhället. För det tredje har vi en alltför centralstyrd och odemokratisk samhällsorganisation — en parlamentarism. Genom att varken efterlysa bättre resursmätt, en helhetssyn eller ifrågasätta sin egen roll är parlamentarismen i huvudsak orsak till dagens situation och att den fortgår. 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 framför allt att styrningen av samhället koncentrerats 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 blev snarast en manifestation av de globala orättvisorna — de fattiga ländernas krav ignoreras. Istället städades Rios gator för att bereda plats åt representanterna för den rika världen, vilket innebar död för tusentals gatubarn. Det organiserade hyckleriet blir bara alltmer påtagligt. {Brunsson 1989, 1990} Vi skulle alltså behöva mer av glasnost och perestrojka än spektakulära internationella konferenser 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 oftast i strid mot etablissemangen. Dessa organisationer och människor, vilka representera en ovärderlig kompetens, måste istället utgöra en naturlig del av 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 samhällsliga system samt delsystem därav. Dessa beskrivs och analyseras med matematiska och naturvetenskapliga metoder.

Särskild uppmärksamhet ägnas **omsättningen av fysiska resurser i samhällsliga 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. Sålunda har i utländsk statistik ofta elenergin multiplicerats med ca 2.5 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 omgivningarna 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 samhällliga 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.

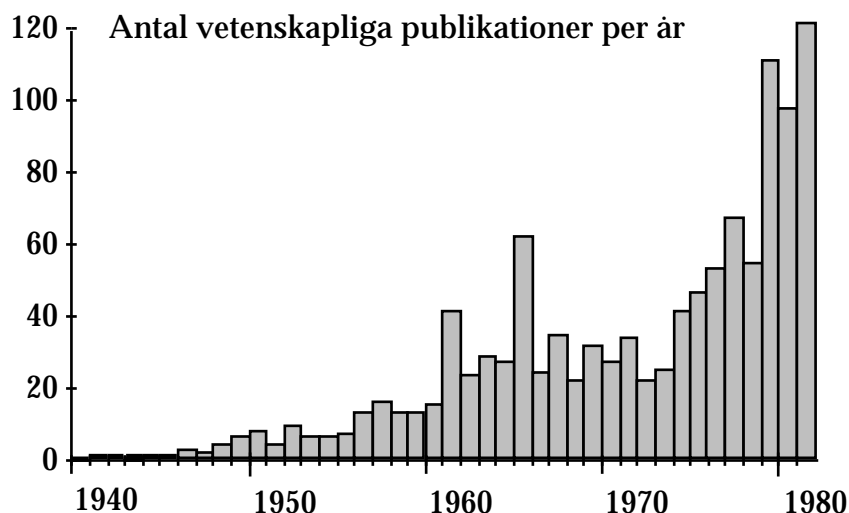
Begreppet exergi har, mig veterligen, endast förekommit en enda gång i den hyllmeter av statliga energitutredningar som publicerats sedan dess. På sidan 121 i Prop. 1978/79:115, *Riktlinjer för energipolitiken, Bilaga 1* förekommer ordet exergi en gång i inledningen till ett avsnitt om olika energislag 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 resursteorins 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.



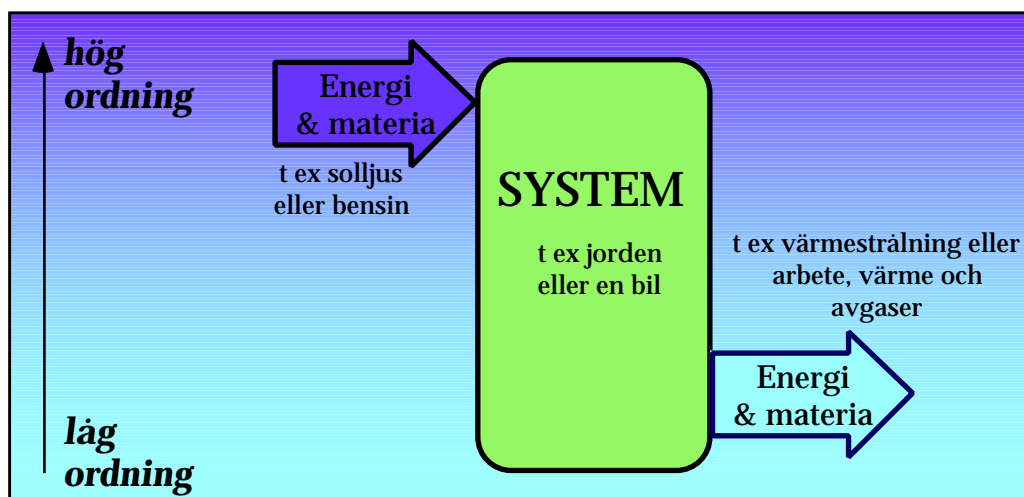
Figur 1.1 Antalet internationella vetenskapliga publikationer på exergiområdet 1940-82.

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 fig. 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 pro-

duceras 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 avsn. 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 termodinamikens 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), Ω = 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 Ω alltså blir sannolikheten för varje tillstånd enligt ekv. 2 lika med 1 dividerat med Ω , dvs $1/\Omega$. Entropin för det totala systemet blir $S = k \ln \Omega$. Detta är det maximala värdet på entropin. Oordningen 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 — omvandlingmetoden. 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 ε , η , ω , 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 praktisch 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 eksnergija.”

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 {1989}, 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^{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 , μ_{i0} betecknar intensiva storheter för omgivningen, dvs oberoende av systemets storlek, tryck, temperatur och kemisk potential[†] 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, avvikelserna från omgivningen, ökar.

[†] 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" som i engelskans equilibrium 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[‡] 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 μ_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 gör 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 bilmotorer uträttar är att trycka undan omgivningen, så att de varma avga-

[‡] Med ett material menar jag en bestämd sammansättning av materia.

serna 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 ekv. 3 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 omgivningensvärme 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 uträtta något arbete. Den sista termen är en summa över produkten mellan kemiska potentialen — den kemiska reaktionskraften — för ämne i i omgivningen μ_{i0} och mängden av varje ämne i N_i i kroppen. Denna term, vilken påminner om den tidigare termen exergi som omgivningensvärme, 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 kvalitetsindex som anges med exergiinnehållet i procent av energiinnehållet, vilket jag också benämner 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 (%)
Extra prima	Lägesenergi ¹	100
	Rörelseenergi ²	100
	Elektrisk energi	100
Prima	Kärnenergi ³	ca 95
	Solljus	93
	Kemisk energi ⁴	omkring 100
	Het ånga	ca 60
	Fjärrvärme	ca 30
Sekunda	Spillvärme vid ca 20°C	ca 5
Värdelös	Värmestrålning från jorden	0

¹t ex högt belägna vattenreservoarer

²t ex vattenfall

³energi i kärnbränsle

⁴t 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. (Därigenom 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 därigenom i princip en tänkbar exergiresurs. Analogt kan ett vakuum utnyttjas för att utvinna arbete; en lufttom behållare i en omgivning av luft vid normalt tryck innehåller därför exergi, jämför den yttre energin — termen p_0V i ekv. 5 ovan.

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 exergiinnehåll; bryts fyndigheten och sprids ut i omgivningen sjunker Exergiinnehållet. 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 ¹	100
Grundämne som handelsvara ²	nära 100
Blandade grundämnen ³	omkring 90
Rik mineralförekomst ⁴	50 - 90
Malm	omkring 50
Fattig mineralförekomst ⁵	20 - 50
Mineral löst i berggrunden och havet	nära 0

¹t ex kol som diamant

²t ex järn, guld eller bly

³t ex stål, legeringar eller plast

⁴t ex myrmalm eller havsnoduler

⁵t ex bauxit

Materialformens kvalitet anges genom ett index som uttrycker det ungefärliga exergiinnehållet dvs mängden "grundämne i ordnad form" i procent av materialmängden. Definitionen av kvalitetsindex är här analog med definitionen av kvalitetsindex —exergifaktorn — 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 idealt endast den del som ges av exergin förädlas till ren form förutsatt att ingen yttre exergiförbrukning sker. Vid beräkning av exergin 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[†]. 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. I naturen ser vi det som en ordning av materia ur omgivningen till biologiskt material med hjälp av exergin från solljuset.

Från tabell 2.2 ser vi att kvalitetsindex varierar från 100 för absolut rena och välordnade material som en blomma eller en 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, som tur är, 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. 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 standardhav vid

[†] 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.

havsyta[‡] 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 exergiinnehållet för ett system varierar då systemet transporteras mellan olika omgivningar. Så kan t ex ett flöde av energi och/eller material förändra sitt exergiinnehåll 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 även kallat informationskapacitet. Denna betydelse på begreppet information får inte förväxlas med det vi i dagligt tal menar med information. Information är ett begrepp som ju 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

[‡] Vid beräkning av gravitationsexergi (lägesenergi och tidvattenenergi) gäller medelvattennivån vid havsytan som en generell standard.

krävs för att beskriva det och desto större blir dess kapacitet att bära information. Exergi och information eller informationskapacitet är därför 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 $k' = k \ln 2$ 1.0×10^{-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. D och app. B.III,

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

Av detta omsätter mänskligheten endast en bråkdel av ca 5×10^{13} bitar. Förhållandet mellan utnyttjad och tillgänglig informationskapacitet blir 10^{-24} . Samma förhållande för energiomsättning blir ca 3×10^{-5} . Det utnyttjade 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 uppförsbacke med hjälp av handbromsen och en sliande koppling. Risken att glida bakåt minskar då man bromsar och gasar samtidigt — rörelsen blir således mer enkelriktad genom en större friktion, dvs extra exergiförbrukning.

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 helt 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 Homo sapiens — den medvetna 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}

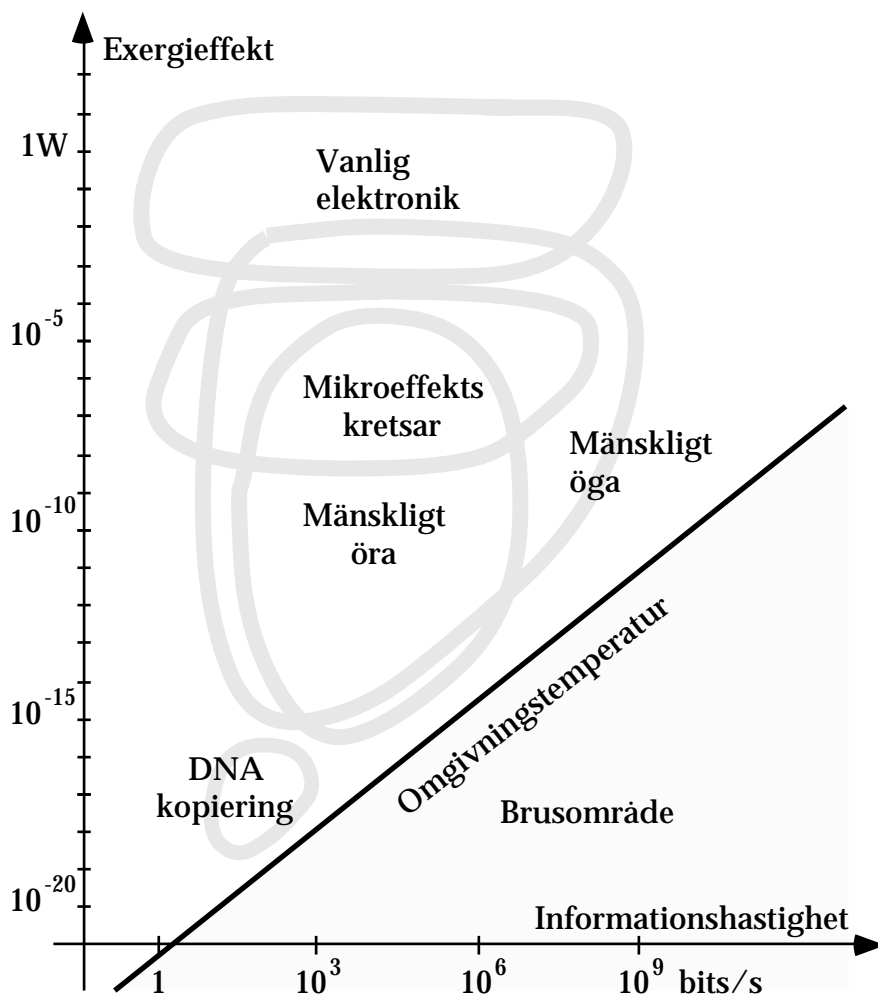
Känsligheten hos näthinnan är sådan att det mänskliga ögat fungerar nära den kvantmekaniska gränsen. Det räcker faktiskt med endast ett fåtal ljuskvanta för att registreras av ögat. Lagring av information i ett datorminne har en karakteristisk temperatur av omkring 10^5 gånger temperaturen för seende. 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	5×10^{-4}	5×10^{19}
Television	2×10^{-5}	2×10^{18}
Datorminne	10^{-12}	10^{11}
Mänskligt tal	10^{-16}	10^7
Mänskligt öra	10^{-17}	10^6
Mänskligt öga	5×10^{-18}	5×10^5
DNA-replikation i en cell	4.6×10^{-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-replikationen 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 som ordning i de genetiska koderna som DNA-molekyler styr tillverkningsprocessen. Denna information överförs från generation till generation. Då biologiskt material t ex trä eller cellulosa används för sina unika materialegenskapers skull 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.

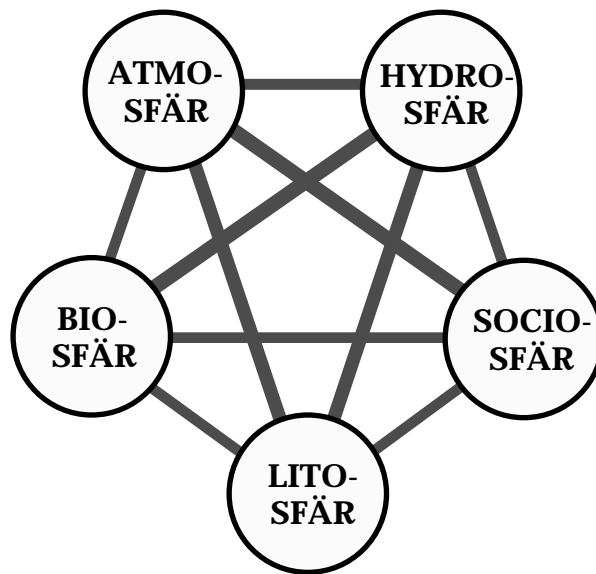
Antag att vi befinner oss på ett party och upptäcker en bekant på avstånd. För att nå fram med ett budskap till vår bekant måste du “synas över mängden”. Antingen genom att ställa dig på tå och vinka med handen — om du är lång — eller genom att höja rösten över partybruset. Detta “kostar” således en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

Vi kan således konstatera att exergibegreppet är ett fundamentalt begrepp och begreppen energi, material och information är olika bärare av exergi.

3. EXERGI, HELHETSSYN OCH INTELLIGENS

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 försöker man bl a 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 fig. 3.1.



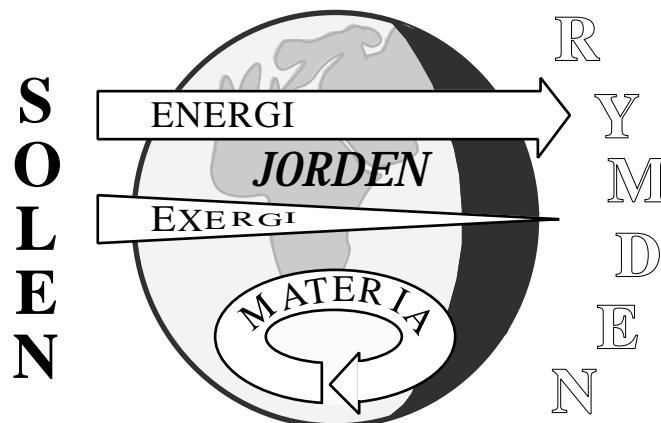
Figur 3.1 Fem sfärer i inbördes växelverkan.

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 tyngdkraften, som bl a bestäms av jordens massa. Hydrosfären består av allt vatten som går i ständiga kretslopp på jorden. Vatten är unikt på jorden då det samtidigt förekommer i både fast-, flytande- och gasform. Vi finner ju både is, vatten och vattenånga vid samma temperatur på jorden. Vatten fungerar som en enorm värmereservoar och utjämnar därigenom lokala temperaturvariationer på jorden samt temperaturvariationerna över dygnet. Litosfären är den fasta berggrunden med alla sina mineral. Genom erosion löses dessa ämnen ut och ingår sedan bl a som viktiga näringssalter i vatten. Biosfären utgörs av allt naturligt liv på jorden

och sociosfären består av den moderna människan med alla hennes skapelser.

Växter och djur ryms alltså inom biosfären men byggnader och maskiner tillhör sociosfären. Den s k primitiva människan eller naturfolken och hennes redskap tillhör biosfären medan alltså den industrialiserade människan hör hemma i sociosfären. 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. Innan växterna fanns således inget syre i atmosfären. Den mänskliga aktiviteten i sociosfären har bl a gett upphov till de naturfrämmande och giftiga ämnen vi numera finner överallt, vilka framförallt skadar biosfären. En fortsatt förbränning av fossil som kol, olja och gas leder till att atmosfären successivt återförs till sin ursprungliga sammansättning, vilket för den nu levande naturen innebär död och förintelse. Att elda upp allt fossil skulle innebära att förhållandena vreds tillbaka till år noll, dvs långt innan livet uppstod på jorden. Jordens livskraft är alltså ett resultat av att dessa lager och kontraster bibehålls och kanske t o m ökar istället för att brytas ner genom att utnyttjas som sk naturresurser. Vanföreställningen att dessa lager är naturresurser är således helt felaktig och ett resultat av den förödande inkompetens som råder på detta område.

I fig. 3.2 illustreras påverkan mellan de olika sfärerna som linjer mellan dem. Kommunikationen dem emellan sker genom att de kontraster som uppstår snabbt utjämnas genom att exergi förbrukas i de ständiga strömmar av energi, materia och information som fortgår inom och mellan dessa sfärer. Drivkraften för hela systemet är exergi som flödar 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.

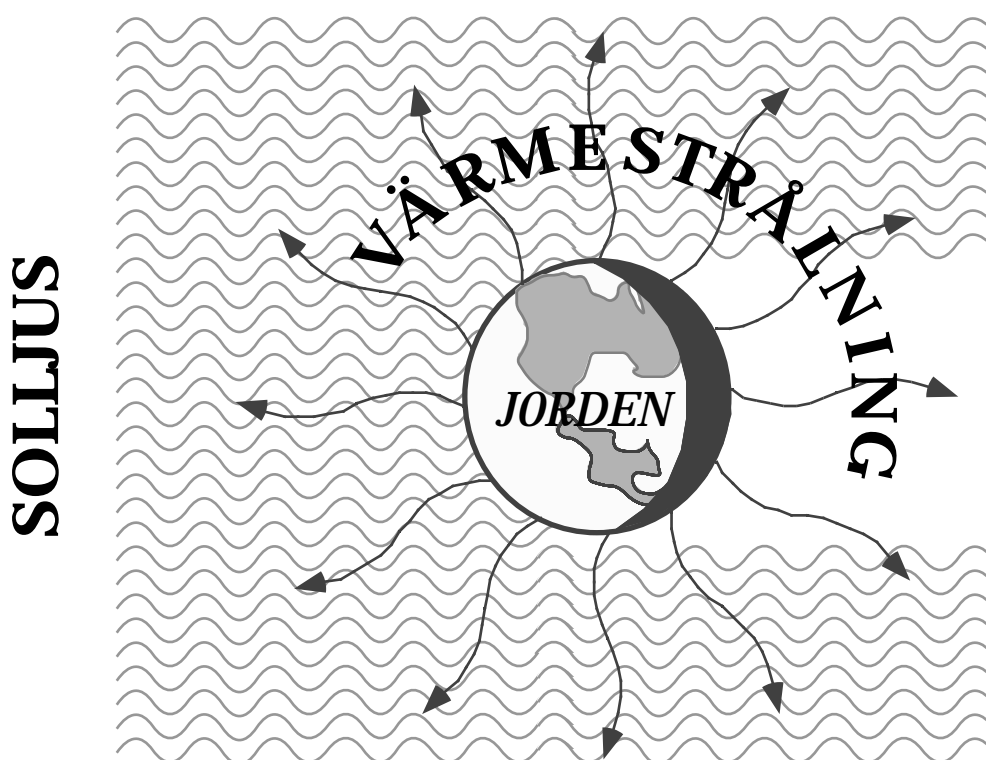
Exergi från kontrasten solen–rymden driver flöden av energi, materia och information genom sfärerna på jordens yta. Vi ser av figuren att det råder en balans mellan in- och utflödet av energi. Medeltemperaturen på jordytan bestäms bland annat av hur mycket energi som strålar in mot jorden. Energi i form 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 inom och mellan sfärerna på jorden, fig. 3.1. Omloppstiderna för dessa material-kretslopp kan variera från bråkdelar av sekunder till årmiljarder. 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 är större än hela mänsklighetens samlade kunskap. Till och med den enklaste bakterie är långt mer avancerad än hela mänsklighetens samlade datorkraft.

Den exergi som når jorden förbrukas så småningom, men på vägen hinner den driva bl a vatten/vindsystemet och livet på jorden. Bara för vattencirkulationen i hydrosfären åtgår ca 7 000 ggr så mycket exergi som vad människan omsätter i sociosfären. Totalt förångas årligen ca 450 000 km³ vatten för att stiga upp, bilda moln och åter falla ner mot jordytan, varav ca 10 procent över land. På detta sätt skapas ett behagligt klimat på jordytan för växter och djur.

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, vilka härigenom återför dött organsikt material till växterna i form av näringsämnen, dvs sluter kretsloppet av materia. Den exergi som inte dessa organismer kan utnyttja bildar istället torv eller sediment som naturen med tiden omvandlar 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 biosfären, som i sin tur är bärare av den ekologiska evolution vilken vi själva är en produkt av.

Jordens energibalans (och exergitillskott) kan också illustreras med hjälp av fig. 3.3 nedan. Exergirikt solljus når jorden. En stor del reflekteras direkt som ultraviolett ljus tack vare ozonskiktet i atmosfären och deltar därför inte i omvandlingar på jordytan. Det är detta ljus som skapar de vackra blåskimrande, men pga luftföroreningarna alltmer gråaktiga, bilderna av jorden vi

vant oss vid sedan människan börjat resa i 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 figuren illustreras detta som en förändring av våglängden mellan det infallande solljuset och den utstrålade värmestrålningen. Den infallande solstrålningen är relativt kortvågig, dvs energirik, och välordnad, dvs intensiv, vilket tillsammans gör den mycket exergirikt, se tab. 2.1. Den utstrålade värmestrålningen är däremot långvågig (energifattig) och oordnad (utspridd) och blir således exergifattig, se tab. 2.1.



Figur 3.3 Kortvågigt solljus in och långvågig värmestrålning ut.

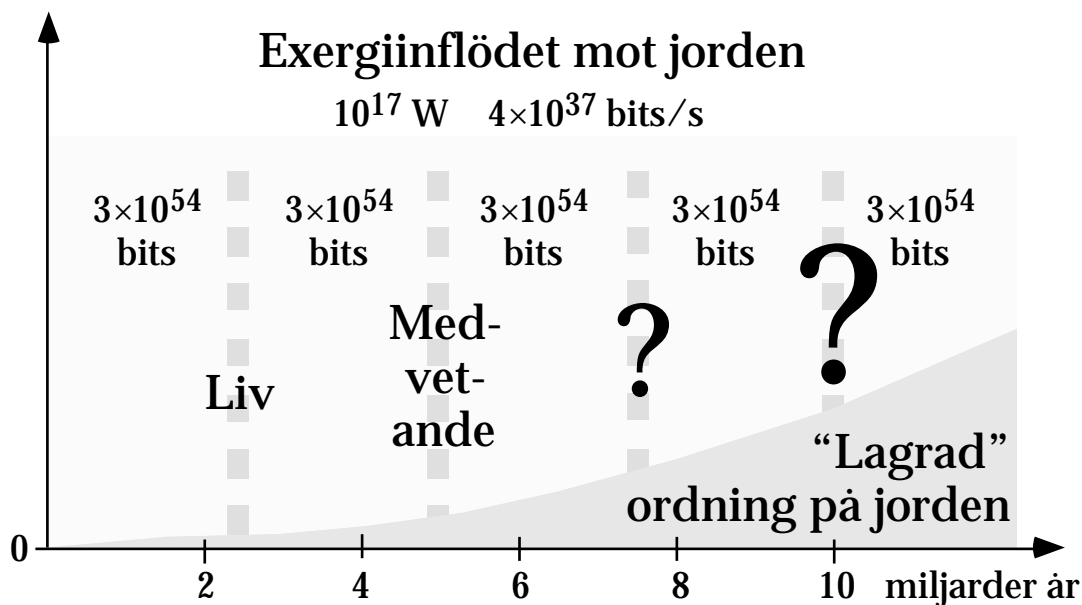
Hela jordklotet kan således betraktas som en väldig maskin som drivs av exergi från solen. Härigenom flödar energi, materia och information inom och mellan system (sfärer) på jordens yta, och liv kan skapas och upprätthållas. Drivkraften är hela tiden skillnaden i kvalitet mellan ingående synligt solljus och utgående osynlig värmestrålning. (Anledningen till att vi ser bäst i solljus är helt enkelt att naturen skapat ett så effektivt öga som möjligt för att bäst utnyttja solljuset och ge färg åt allt vackert som omger oss — optimera informationsutbytet — helt enkelt.)

För att styra en process, säg en ämnesomsättande sk metabolisk process i en levande organism, längs en bestämd riktning kräv förluster — irreversibilitet. En ökad säkerhet i styrningen kan endast uppnås genom en ökad irreversibilitet, vilket fås till priset av en totalt sett ökad utspridning eller oordning av energin — energidissipation, och 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 et al. {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. Inom ekologin används således exergibegreppet allt oftare. {Herendeen 1989}

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. I avsn. 3.10 kommer jag därför att behandla detta närmare.

Figur 3.4 illustrerar hur exergiinflödet mot jorden under årmiljarder 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 3×10^{54} bits eller ca 8×10^{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. I fig. 3.4 illustreras detta som “lagrad” ordning på jorden i form av bl a lagrad exergi i biosfären, vilken tillväxer tack vare den ekologiska evolutionen. Att försöka beskriva vad som uppstår om ytterligare några miljarder år är lika befängt som att amöbor för 2 miljarder år sedan skulle ha förutsett mänsklighetens uppkomst. Perspektiven hissnar, men att det blir livsformer som vida överträffar den mänskliga organismen är dock ställt utom tvivel. Förutsatt förstås att inte människan förstör naturens livskraft. Mänskligheten har således ett stort ansvar för naturens framtid. Den gamla uppfattningen att vårda sitt arv — den brukade jorden — så att våra barn får en bättre start måste återupprättas. Våra barn har redan alltför mycket skit att ta hand om efter oss.

Låt oss också för ett ögonblick spekulera lite kring mänsklighetens informationskapacitet — intelligens. Anta att den mänskliga hjärnan rymmer ca 10^{10} nervceller (neuroner) som vardera är förbundna med ca 100 andra nervceller, då motsvara hjärnan en informationsmängd av ca 10^{12} bits 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. Om vi därför antar att varje människa kan betraktas som en självständigt tänkande varelse då skulle hela mänskligheten idag motsvara ca $5 \times 10^9 \times 10^{12}$ byte = 5×10^{21} byte. Om alla människor dessutom skulle kunna stå i ständig kontakt med varandra samtidigt, vilket ju idag i praktiken är omöjligt, men kanske inte i framtiden, då skulle varje människa ha kontakt med ca 5×10^9 andra människor och den

totala informationsmängden — intelligensen — skulle då motsvara ca 3×10^{31} byte, dvs ca 10^{19} eller 10 miljardermiljarder gånger intelligentare än en ända människa. Kanske är det en sådan global superintelligens som kommer att skapas i framtiden? — Ingen vet, men det kommer säkert att behövas en superintelligens för att röja upp efter människan. Kanske har också den nyligen lanserade Gaia-hypotesen något med detta att göra? {Lovelock 1988} Dessutom kan inte jorden ses som en isolerad företeelse utan som en del av universum, så kanske universums expansion också har ett finger med i spelet.

Betydelsen av hur samhället förvaltar intelligensen kommer jag att behandla ytterligare i avsn. 3.11 om synen på människan som tänkande varelse med förmåga att fatta egna beslut eller inte. Den mänskliga hjärnan kan nämligen paradoxalt nog betraktas som vår mest värdefulla men minst utnyttjade resurs. Den moderna civilisationen karakteriseras snarast av enfald istället för mångfald, vilket jag ser som den främsta orsaken till den växande inkompetensen, resursutarmningen och miljöförstörelsen.

3.2 Exergi hos naturresurser

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

De s k energiressurerna har ett exergiinnehåll 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 smärre oklarheter genom bl a strålningsförluster — 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 kärnkraft-

verk av sk lättvattentyp. I avsn. 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 svårhanterligt och 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. Att eftersträva fullständig exergiuttömning är alltså ett bra sätt att sluta kretsloppen och återföra "resurserna" till naturen, jämför med de nedbrytande mikroorganismerna, avsn. 3.1. I avsn. 5.5 kommer jag därför att presentera ett förslag till beskattning för att bl a stimulera detta.

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 exergiinnehållet, 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. Denna exergi — kontrast — kommer nu istället till skada i naturen, eftersom den ju inte hör hemma där.

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, förutsatt naturligtvis att den höga temperaturen tas tillvara för att t ex driva en turbin.

Den strukturella exergin finns i de former som det levande intar, både makroskopiskt och mikroskopiskt. Vi nyttjar detta t ex då vi använder trä som byggnadsmaterial och bomull som fiber i tyg. Då vi använder biologiskt material som föda tillvaratas både den kemiska exergi som bränsle och den strukturella exergin som byggnadsmaterial för kroppens nya celler. När strukturen i ett biologiskt material har brutits ner finns ändå den mesta exergin kvar och kan tillvaratas som t ex värme vid förbränning eller ännu hellre av mikroorganismer för att producera nya värdefulla substanser. Det finns inget principiellt hinder för att t ex producera insulin och penicillin ur köksavfall med lämpliga mikroorganismer.

En viktig slutsats av diskussionen ovan är således att alla slag av naturresurser kan mätas i exergi, som därigenom uttrycker både möjligheten att utvinna mekaniskt arbete och strukturen eller informationen hos systemet. Vad den mäter är det fysiska arbete som skulle krävas om alla ingående ämnen togs ur den föreskrivna referensomgivningen för att — under fullständig reversibilitet (förlustfri omvandling) — skapa den aktuella naturresursen. Exergin för en metallbit anger alltså hur mycket exergi — arbete — som idealt skulle krävas för att skapa denna metallbit ur den omgivande berggrunden. När samhällsplanerarna väl inser detta kommer säkert naturen att slippa ta emot allt avfall från sociosfären — avfall som alltså lika gärna kan betraktas som naturresurser eller snarare samhällsresurser.

3.3 Världshandel och exergiflöden

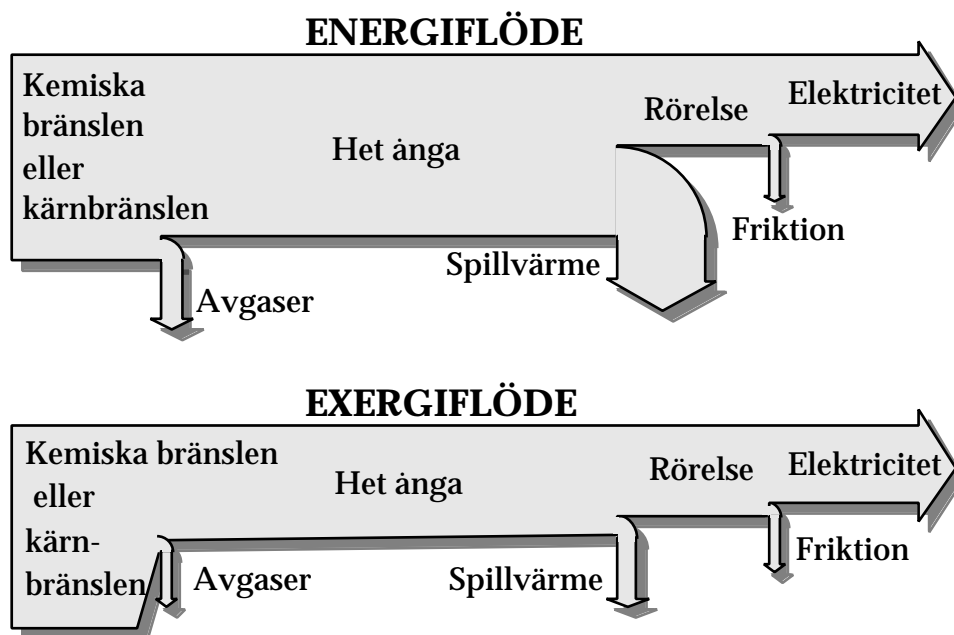
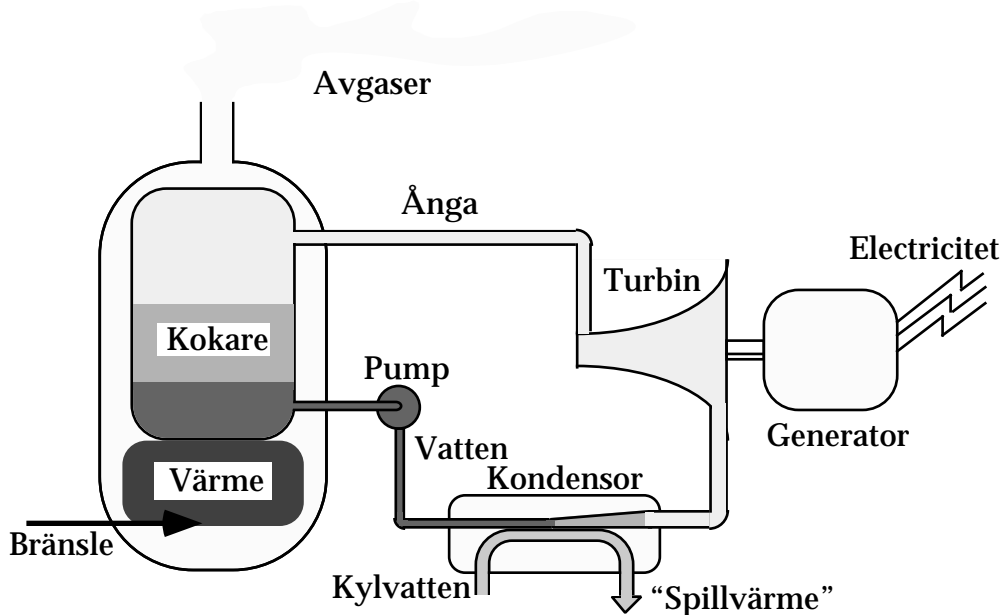
Internationell handel kan ses som ett flöde, mätbart i termer av exergi. Tillämpningen av exergibegreppet på världshandeln bör kasta nytt ljus över internationell handel genom att bidra med ett alternativt perspektiv på de vanligen använda monetära enheterna.

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

För några år sedan förekom i teknisk press långt framskridna planer på att transportera ett isberg från Antarktis till ett område med brist på färskvatten. Idén 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 Mellersta östern är en sällsynthet med högt värde. Projektet har aldrig blivit av pga stora praktiska svårigheter, men det illustrerar exergins betydelse för en varas värde. Kanske är det ekonomiskt att oljetankbåtarna ta med sig färskvatten från Sverige när de återvänder till Mellersta östern. 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 energi- och exergibetraktelser

Exergibegreppet används idag av allt fler forskare och ingenjörer, se fig. 1.1, i första hand inom energiområdet vid effektivisering av energisystem som omsätter många olika energiformer. Vi ser från tab. 2.1 ovan att för het ånga, fjärrvärme och spillvärme blir kvalitetsindex eller exergifaktorn dvs andelen exergi av energiinnehållet allt lägre. Detta är ett faktum som den som arbetar med dessa olika energiformer måste ta hänsyn till.



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

Låt oss därför se närmare på hur ett värmekraftverk fungerar. Figur 3.5 är en schematisk skiss över ett värmekraftverk eller kondenskraftverk där ett kemiskt bränsle som olja eller kol förbränns. Det kan också vara ett kärnkraftverk där man istället "förbränner", egentligen förintar materia, uran. Den härigenom bildade värmen används för att koka vatten under högt tryck i en stor panna, i princip en stor tryckkokare. Den bildade vattenången 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. Vid varje omvandling eller transport sker förluster.

Då vattenången passerat genom turbinen har den överfört exergi till den elektriska generatoren. Efter turbinen kyls ången 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 ut ur pannan representerar. Kylningen är också nödvändig för att optimera kraftöverföringen i turbinen, ty genom att ången kondenseras efter turbinen kan denna arbeta över maximal tryckskillnad. Jämför med arbetet som en förbränningsmotor måste utträta för att trycka ut avgaserna i omgivningen, avsn. 2.2.

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 ca 60 procent och i ett kärnkraftverk ca 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. Detta beräknas vid en exergianalys som jag presenterar i avsn. 3.8. Vart tar då förlusterna i själva kraftverket vägen?

I den nedre delen av fig. 3.5 finns två flödesdiagram, så kallade Sankeydiagram. 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 stora. Detta beror på att både in- och utflödena är energiformer av mycket hög kvalitet. Exergifaktorerna för de aktuella energiformerna är ca 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 har vi ofta en flamtemperatur på över tusen grader (°C). I ett kärnkraftverk har vi, av bl a säkerhetsskäl, en temperatur på bränslestavarna av istället endast några hundra grader

(°C). Värmen överförs sedan genom värmeväxlare 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 en del värme ut till omgivningen och energi och exergi förloras. Värme förs också ut med rökgaserna för att hålla skorstenen i ett olje- och kolkraftverk kondensfri — annars kan den rosta sönder. 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 — krymper. Detta beror på att det skapas oordning — entropi — i stora mängder, dvs exergi förbrukas. Ett annat sätt att beskriva detta är 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, dvs resultatet av dålig teknik eller teknik som kan bli bättre.

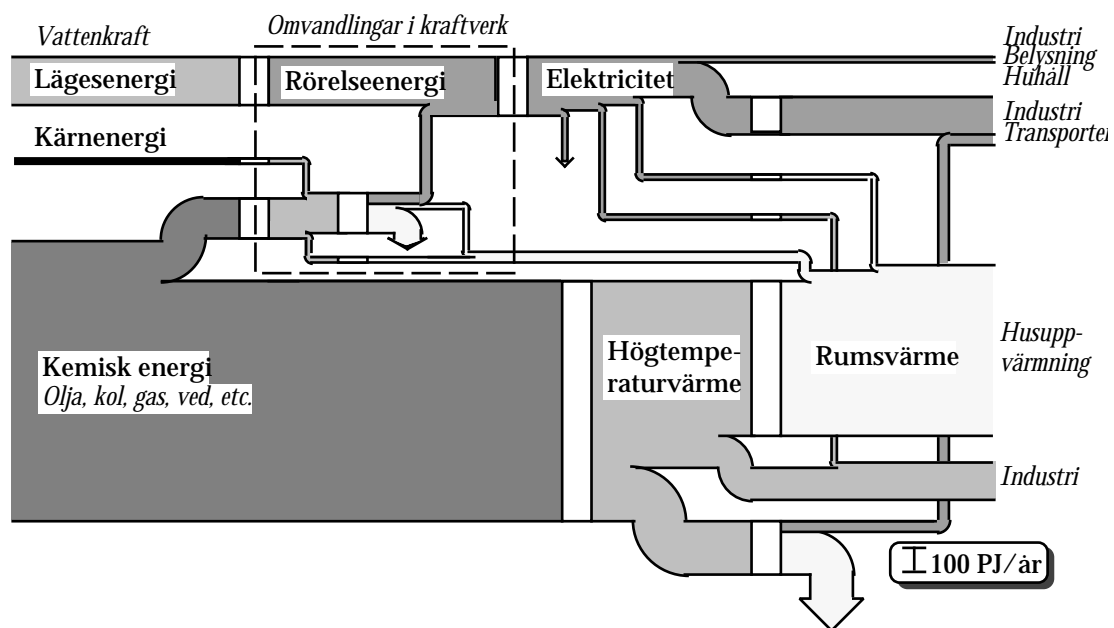
Bredden på flödena av termisk energi och termisk exergi är som vi ser av fig. 3.5 den största skillnaden mellan energi- och exergiflödet. Detta ger också en helt annan bild av var förlusterna uppkommer i processen. I ett exergiflödesdiagram är förlusterna störst i pannan men i ett energiflödesdiagram är förlusterna störst i kondensorn. I kondensorn förloras en stor del av energin genom spillvärme i kylvattnet. Spillvärme är dock värme med en temperatur nära omgivningen och är därför energi av låg kvalitet — liten exergifaktor, se tab. 2.1. I exergidiagrammet framgår detta tydligt. Exergin i spillvärmets är endast några få procent av energin. För att göra det klarare kan vi tänka oss följande. Antag att vi vill ta tillvara all den termiska energin i spillvärmets som elektrisk energi istället. Av spillvärmets skulle vi då teoretiskt maximalt kunna endast omvandla den del av energin som svarar mot exergin, dvs enligt exergiflödet i fig. 3.5. 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 våra naturlagar eller termodynamikens andra lag.

Vid övergången från mekanisk energi till elektrisk energi, som båda har exergiinnehållet 100 procent, sker små förluster genom bl a friktion. Dessa blir i stort sett lika små i båda diagrammen. En del av friktionsförlusterna utgörs dock av mekaniskt arbete i form av 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 blir en nödvändig "inre förlust" i processen som beror av tekniska begränsningar pga undermålig teknik. Forskare arbetar därför mycket på att utveckla bättre teknik t ex keramiska turbiner som medger temperaturer på närmare 1500°C. Praktiska experiment bedrivs redan i bl a Japan.

Låt oss nu betrakta ett större system, energiomsättningen i ett helt samhälle. Inför de omfattande energiutredningarna under mitten av 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. (Nu, snart 20 år senare, undrar jag ofta över den energiutredningsnojjan som etablissemanget drabbades av, vilken har stora likheter med rådande miljöutredningsnojjan. Är det egentliga syftet kanske att utreda — producera utredningar och byråkrater — istället för att försöka förstå och finna orsaker. Detta kräver förstås ett stort mått av självvranssakan, vilket ofta saknas i dagens etablissemang — ett organiserat hyckleri. {Brunsson 1989, 1990}) En del av all energidata har åskådliggjorts i form av flödesdiagram, vilket bl a pryder omslaget på energiforskningsutredningens betänkanden. {SOU 1974: 72-76} 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 flöden står i direkt proportion till energiinnehållet i respektive energiform.



Figur 3.6 Energiflödet genom det svenska samhället år 1971.

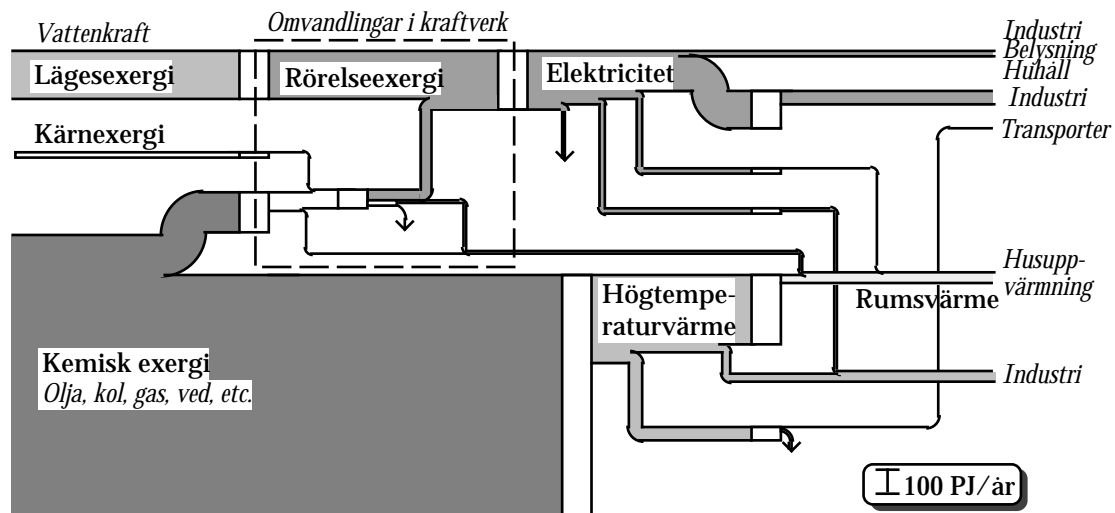
Vattenkraften används för att generera elenergi. Lägesenergin i kraftverksdammen omvandlas till rörelseenergi som via en turbin och en elektrisk generator omvandlas till elektrisk energi. Kärnenergi och kemisk energi används också för att producera elektrisk energi. Denna omvandling sker i kondenskraftverk, som ovan, och i kraftvärmeverk, där även lågtemperaturvärmets tas tillvara 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, transporter och 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 hög- och lågtemperaturvärme 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. I avsn. 4.4 återfinns en mer detaljerad beskrivning av förlusterna för bilen som transportmedel.

Vi ser att de samlade förlusterna i energidiagrammet är obetydliga, fig. 3.6. 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, helt enligt naturlagarna.

Låt oss nu betrakta exergiflödet för samma system, fig. 3.7. Bredden på flödena är nu istället 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, fig. 3.5, att exergin i värme är mycket lägre än energin.



Figur 3.7 Exergiflödet genom det svenska samhället år 1971.

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 minska betydligt genom förbättrad värmeisolering och tillvaratagande av ventilationsvärmnet. För att ytterligare minska exergiförlusterna vid uppvärmning bör man dessutom använda antingen goda exergiomvandlare som värmepumpen eller naturliga exergiflöden som solljus.

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 exergifaktor — 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 åtminstone till en liten del — förbrukas, men förbrukningen bör naturligtvis vara så låg som möjligt.

Genom att använda exergidiagram som fig. 3.7 för att beskriva energisystem får man en tydligare bild av förlusterna och var man bör sätta in ansträngningar för att öka effektiviteten.

3.5 Exergi och andra resursmått

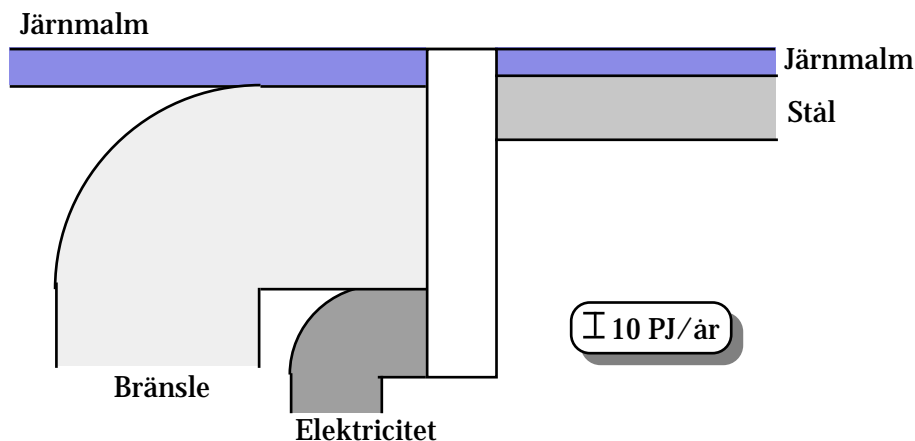
Resurser är de kända och åtkomliga delarna av naturresurserna dvs de ämnen i marken, vattnet och luften som kan utnyttjas. Då en resurs utnyttjas i samhället betecknas den ofta även som en råvara. Med resursmått menar jag de mått man traditionellt använder för att kvantifiera dessa flöden av resurser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

Resurser indelas traditionellt i energiresurser och andra resurser. Energi-resursernas exergi ges av deras energi multiplicerat med exergifaktorn för den aktuella energiformen, se tab. 2.1 ovan. Energi-resurser mäts vanligen i energienheter dvs samma enhet som exergi, och exergifaktorn blir då dimensionslös. 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. Hur detta påverkar exergifaktorn skall jag snart återkomma till.

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. 3.6 och 3.7 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 subventioner, beskattning och diskontot — nedskrivningen av framtida värden — varors ekonomiska värde. Dessutom förekommer både spekulation och kriminalitet på den ekonomiska marknaden. (Etablissemangets tal om den "fria marknaden" är antingen hyckleri eller inkompetens — antagligen både och.) Detta medför att en varas ekonomiska värde kan variera utan att varan ändras i fysisk mening, vilket ibland naturligtvis kan vara önskvärt — frågan är då bara för vem?

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 referensomgivning. Enheten för en sådan kvalitetsfaktor blir då t ex J per kg eller J per m³. I app. C beräknas exergiinnehållet för den svenska omsättningen av järnmalm 1980. I fig. 3.8 nedan återfinns resultatet av denna beräkning.



Figur 3.8 Den svenska järnmalmsomsättningen 1975.

Vi ser här att enheten på alla flöden är PJ per år, dvs samma enhet som för energi- och exergidiagrammen i fig. 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 är ofta godtycklig. Oftast betraktas 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 resursmätt är i detta sammanhang ett lämpligt resursmätt. Detta illustreras ytterligare i diagrammet över den svenska exergiomsättningen i fig. 3.21 nedan.

Exergibegreppet anger endast en varas fysiska värde. De egenskaper som avgör detta är bl a varans koncentration, kemiska sammansättning och mängd. Exergiinnehållet säger alltså ingenting om en varas övriga fysiska eller biologiska egenskaper som elektrisk ledningsförmåga, näringsvärde, giftighet eller dylikt. Varor betraktas endast som bärare av exergi — exergibärare.

Antag således att vi betraktar en speciell egenskap som t ex elektrisk ledningsförmåga hos olika material. Effektivitet i exergiomsättningen — exergiverkningsgraden — då det aktuella materialet används för sitt ändamål kan då vara ett mått på materialets kvalitet. Ett material med dålig elektrisk ledningsförmåga 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 tab. 2.3 såg vi bland annat hur effektiviteten vid informationsöverföring varierar mellan olika system i termer av exergi per överförd informationsenhet. Olika materials exergieffektivitet vid olika

användningsområden kan alltså därför också utgöra ett bra mått på deras fysiska värde.

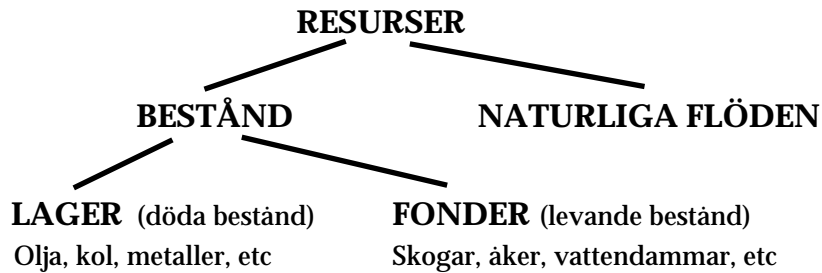
Genom att välja exergi som resursmått renodlas också betydelsen av begrepp som produktion och konsumtion. Ekonomerna talar gärna om oljeproduktion eller produktion av metaller, men sanningen är egentligen att mineralen konsumeras. (Ett exempel på hyckleriet med ords betydelse.) Oljeproduktionen sker endast i naturen av naturen själv och är en del i den ekologiska evolutionen som bl a möjliggjort 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. Betydelsen av begreppen produktion och konsumtion i naturen måste således också ekonomerna förstå och tillämpa. {Kåberger 1991}

Den ekonomiska beskrivningen av verkligheten bör alltså kompletteras med ett alternativt värdebegrepp baserat på fysik som exergi. Detta är särskilt viktigt vid förvaltningen av samhällets resursbas, tillgången på fysiska resurser och livskraftig miljö. Dessa värden kan man endast spekulera med på börsen om man samtidigt är beredd att acceptera resursutarmning och en miljökatastrof. Varje samhällsekonomisk kalkyl bör därför kompletteras med en exergikalkyl, som tydligt anger de fysiska konsekvenserna av ett beslut. Beslut som innebär ökat exergislöseri måste noga övervägas. Historien visar tydligt att varje förändring som ökar exergieffektiviteten på sikt blir lönsam. De företag som alltså satsar på exergieffektiv teknik kommer att konkurrera ut andra företag — förutsatt att vi har en fri marknad — förstås. Det kan därför ibland vara motiverat att ta en merkostnad om det innebär ökad exergieffektivitet — istället för att vänta ut ekonomin eller manipulera marknaden. Exergikalkyler är således ett nödvändigt komplement till ekonomiska kalkyler, i synnerhet om vi skall börja förstå vad som verkligen händer och våga hoppas på att vi kan undvika en miljökatastrof.

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, vilken växterna i biosfären skapar ur det naturliga flödet av solljus, vatten, koldioxid och näringsämnen. Härigenom ger fonden 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 avge ett flöde samtidigt som det töms.



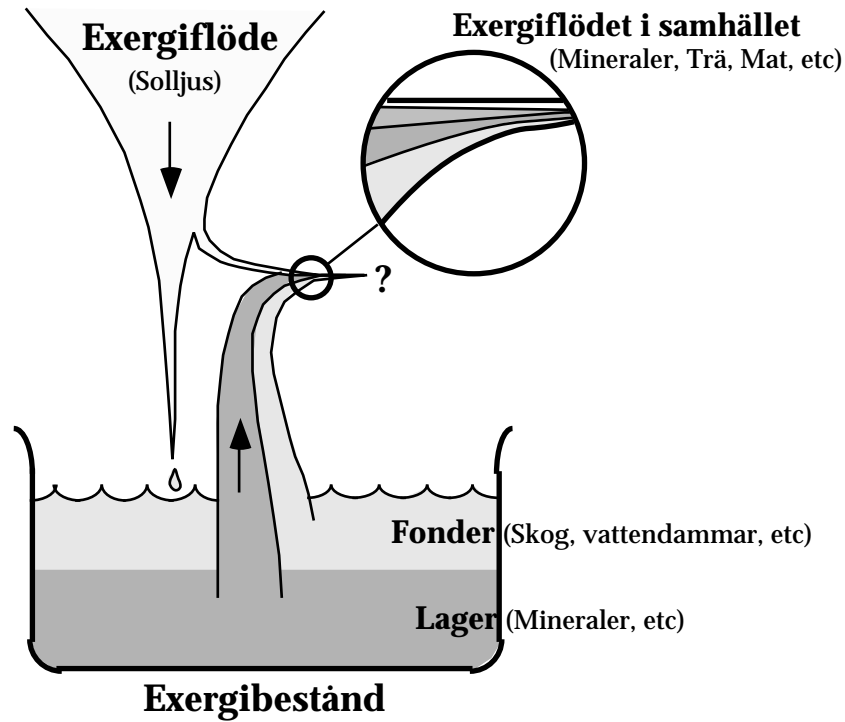
Figur 3.9 En klassificering av resurser.

Således är det viktigt att skilja mellan *naturliga flöden* och *bestånd*, som 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 kan utan att förbrukas omforma naturliga flöden på ett önskvärt sätt. En fond är alltså ett exergiförmedlande 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 — ur kortsiktigt mänskligt perspektiv — men som till skillnad från skogen kräver omfattande bearbetning och extra exergiinsatser. Det globala system som bildas av jordens atmosfär och hydrosfär är en fond som fångar in och för vidare solexergi. Denna fond fördelar också temperaturen jämnare över jordytan. Den fördelar också vattnet, och den har en skyddande och renande förmåga. Därmed ger den förutsättningar för en annan fond, biosfären, att förmedla 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. Fonder är också mycket känsliga för förändringar och kan lätt ödeläggas om de missbrukas. Den mänskliga historien

är fylld av sådana t ex Romarrikets undergång där bl a skövlandet av skog innebar att bördig jord hamnade på Medelhavets botten och stora delar av Nordafrika blev öken. Det fanns många i dåtidens Rom som varnade för en miljökatastrof men de styrande hade viktigare saker att tänka på — då som nu. (Inte utan viss ironi kan man hävda att centralstyrda samhällen, som mänsklig företeelse, i alla fall överlevde tills vidare.)

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 däremot kan ta miljontals år att nybilda, en för människan nästan oändlig tid. För vissa lager som kärnbränsle sker ingen nybildning alls — åtminstone inte under vårt solsystems existens. Lagren av olja och kol tillförs nytt material så långsamt att det saknar praktisk betydelse. Torvmossar tillväxer också långsamt men ändå snabbt nog för att marken skall ha intresse som fond för att tillvarata solexergi — såvida de inte ödeläggs genom utdikning etc. 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 tungmetaller och radioaktiva ämnen frigörs i naturen som miljögifter. Härtill kommer utsläpp av koldioxid, svavel etc som innebär att halten av dessa ämnen ökar dramatiskt i miljön. Detta faktum är den egentliga begränsningen för hur mycket av dessa lager vi vill utnyttja. Lagrens fysiska storlek är således helt irrelevant. Det räcker att betänka effekterna av växthuseffekten och minskningen av ozonskiktet i atmosfären. Frågar är alltså inte hur mycket kol finns det i litosfären utan istället hur stor miljöförstöring vill vi acceptera? (Våra efterlevandes uppfattning kan vi enligt "ekonomismen" bortse från tack vara ekonomernas diskontering — nedskrivning — av framtida generationers värde.)

I fig. 3.10 nedan 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 bråkdel av det naturliga exergiflödet från solen för t ex värme och elektricitet. I samhället minskar så exergin ytterligare. Vissa exergiflöden som flöden av metaller ökar dock sitt exergiinnehåll då de förädlas 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, avsn. 3.12.



Figur 3.10 Exergiflödet från solen och exergibestånden på jorden.

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 vår verksamhet? 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-skapandets klimax — och motsatsen är samförstånd eller kulturskapande, vilket ofta även blommar upp just under krig. Ofta sker detta som en medveten motvikt —kontrast — mot det mänskliga vansinne som krig representerar. Ett globalt kärnvapenkrig skulle dock inte ge utrymme för något förnuft, det skulle vara det mest anti-evolutionistiska mänskligheten kan åstadkomma. Den pågående miljöförstöringen kan tyvärr inte uppfattas som något annat än ett gerillakrig riktat mot naturen, vilket också skapar destruktion och död — vi gasar och förgiftar successivt ihjäl den levande naturen. Då detta inte motsvaras av något livskraftigt skapande, annat än kortvarigt, blir resultatet att ordning på jorden bryts ner. Naturen genomgår således för närvarande en kraftig åderlätning av sin livskraft, antagligen för att lära för framtiden. Denna diskussion ansluter därmed i allt väsentligt med de frågor som behandlats i avsn. 2.5 och 3.1 och

illustrerar den generella och i någon mån filosofiska betydelsen av exergibegreppet.

3.7 Effektivitet och effekt

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 η_{en} , dvs

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

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

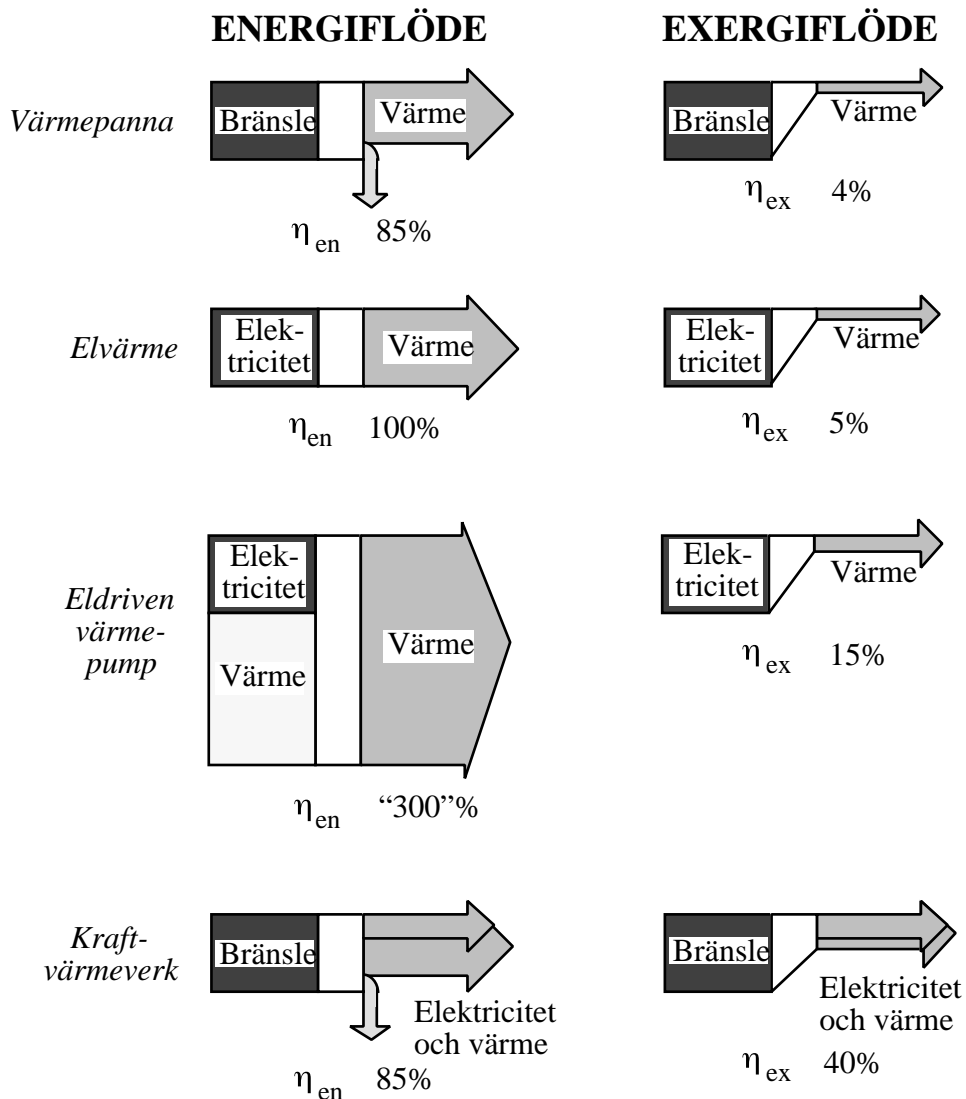
$$\eta_{ex} = \frac{\text{Exergiuutbyte}}{\text{Exergiinsats}} \cdot$$

Vid omvandlingar av energi mellan olika former går i allmänhet en del energi bort genom förluster till omgivningen. Genom att bortse från energibidrag från omgivningen vid energiomvandlingar kan energiverkningsgraden bli större än 1 eller 100 %. Exempel på en 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% — har man inom ingenjörskonsten istället infört begreppen 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 den är mindre än ett — exergi kan ju inte skapas, endast förbrukas — vilket gör det lättare att tolka verkningsgraden.

I fig. 3.11 nedan illustreras skillnaderna i energi- och exergiflöden för fyra omvandlingssystem: värmepanna, elvärme, elektrisk värmepump och ett kraftvärmeverk (mottryckskraft), de olika verkningsgraderna anges också.

Överst ser vi omvandlingen av bränsle till värme i en vanlig oljepanna för husuppvärmning. 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 värmexväxlare värmer rumsluften till 20°C, då det är ca 5°C ute. (5°C är den ungefärliga medeltemperaturen under uppvärmningssäsongen i Sverige.)



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

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, som jag tidigare nämnt, om man bortser från energibidraget från omgivningen, mycket väl vara mer än 100 %. Vi ser att vid en exergibetraktelse blir bilden en annan. Exergiverknings-

graden för elvärme är omkring 5 % och för en värmepump omkring 15 %, alltså fortfarande en rätt dålig effektivitet och teknik.

I fig. 3.5 ovan jämfördes energi- och exergiflödet genom ett kondenskraftverk. Av fig. 3.5 kan vi se att verkningsgraden i både energi- och exergifallet 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 också 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, som vi tidigare sett, 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 som vi ser från fig. 3.5 och 3.11. 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 — i alla fall i dagsläget — 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 alltmör effektivitetsbegrepp som påminner om exergiverkningsgrad. De begrepp man oftast använder är Gibbs eller Helmholtz fria energi som ofta nästan överensstämmer med exergin, se app. A. Tillsammans med uppgifter om de ingående ämnenas standardtillstånd ger detta ofta en god upplysning om effektiviteten för den aktuella processen.

I avsn. 3.5 och app. C diskuteras den svenska järnmalmsoomsättningen 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 också noga ange inflöden och utflöden för en process.

På samma sätt som det är viktigt att skilja mellan energi- och exergiverkningsgrad är det viktigt att skilja mellan energi- och exergieffekt. Vanligen anger vi energiomsättningen per tidsenhet med effekt. En glödlampa med effekten 60 W förbrukar således 60 Wh (Wattimmar) elektricitet under en timme. Vi kan alltså skriva

$$\text{Effekt} = \frac{\text{Energi}}{\text{Tid}}.$$

För att kunna skilja mellan energi och exergi måste vi således införa begreppen energi- och exergieffekt, dvs

$$\text{Energieffekt} = \frac{\text{Energi}}{\text{Tid}}$$

och

$$\text{Exergieffekt} = \frac{\text{Exergi}}{\text{Tid}}.$$

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 därför nödvändigt att ta med all exergi, som åtgår för den aktuella produkten — detta kallas ofta 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, vilken vi tidigare berört. Genom att istället välja exergi som mätstorhet undgår man dessa problem. Dock måste referenstillstånden anges noga — på samma sätt som väderstrecken på en karta. 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 jag beskriver i avsn. 3.12 nedan.

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 Västerås 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 bräddor 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 attraktionskrafterna blir försumbara dvs några atomdiameter. Om man räknar med att trä har en brottgräns på 10^4 N/cm² och att man behöver skilja ytorna $3 \cdot 10^{-9}$ m (10 ggr diametern på en vattenmolekyl) 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.

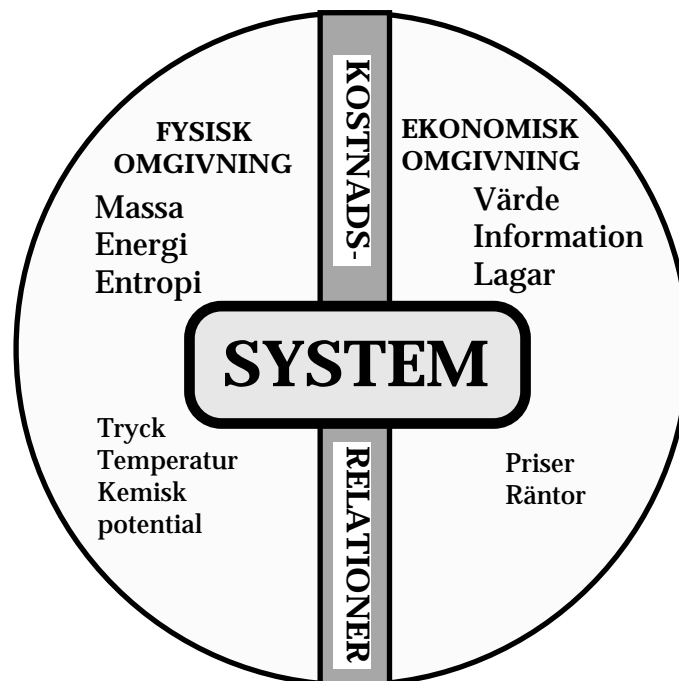
Från dessa talande exempel ser vi alltså varför exergianalysen är ett så viktigt hjälpmedel vid planering eftersom den totala konsekvensen av vårt handlande blir uppenbart. Dessutom ser vi möjligheterna till resurshushållning på ett sätt som annars aldrig blir uppenbart. Våra perspektiv blir ofta alltför 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 av naturen är 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 ofta exergiekonomi och en av dessa metoder kallas också termoekonomi. Myron Tribus och Yehia M. El-Sayed, tidigare vid M.I.T. (Massachusetts 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 traditionella systemanalyser, för att ytterligare effektivisera 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.



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

Den fysiska omgivningen beskrivs genom lagar för massa, energi och entropi som relateras till tryck, temperatur och kemiska potentialer för aktuella ämnen. Den ekonomiska omgivningen beskrivs på motsvarande sätt med lagar för värde, information och juridiska lagar som funktion av priser för aktuella varor och räntor för lån (priset på kapital). De båda omgivningarna binds samman genom kostnadsrelationer som beskriver hur kostnaderna beror av fysiska storheter, t ex kostnaden som funktion av verkningsgraden på en elektrisk motor.

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. — referensomgivningen
- 4 Ange källor för termodynamiska data, eftersom dessa kan variera.
- 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 de monetära 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 verkliga — fysiska — förlusterna i systemet (punkt 7).

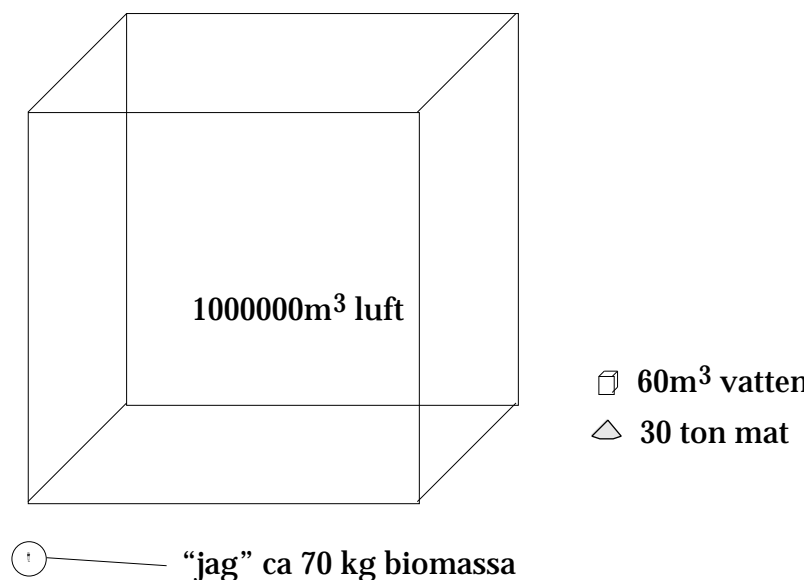
En ingenjör som konstruerar ett system förväntas eftersträva högsta möjliga tekniska effektivitet till lägsta kostnad under rådande tekniska, ekonomiska och juridiska villkor (ibland även med hänsyn till etiska, ekologiska och sociala konsekvenser). Vid detta arbete skall iaktas möjligheter till:

- 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, systematiserar och generaliserar detta arbete. Självt har jag tillämpat metoden på en enkel modell av en värmepump varvid drivkällan (elmotorn) visade sig vara den viktigaste komponenten att förbättra, vilket ingen tidigare insett. {Wall 1986b och 1991a}. (Tyvärr har jag inte lyckats övertyga de svenska tillverkarna om detta, de är mer intresserade av marknadsandelar än kvalitet och effektivitet.) Naturligtvis kan denna metodik tillämpas på alla ekonomiska system som omsätter fysiska resurser som industriella processer i allmänhet, samhällen och handel. De företag som först tillämpar metoden kommer att kunna vara mest konkurrenskraftiga på samma sätt som de som nu tillämpar kvalitets-tänkandet, som jag behandlar i avsn. 3.11 och app. F.

3.10 Helhetssyn och myter om miljön

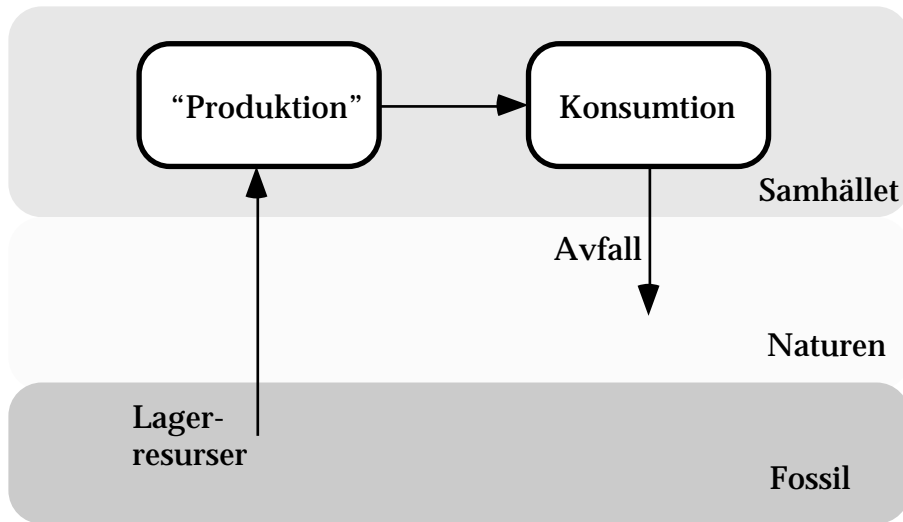
En bra utgångspunkt för att vidga perspektivet på förhållandet mellan människa och miljö är att fundera över —Vad är jag? Låt oss först betrakta den kroppsliga delen av jaget. Varje människa lever i ständig samverkan med den omgivande fysiska miljön, i varje andetag sker ett utbyte mellan ämnen i luften och vår egen kropp. När vi äter mat tas en del av ämnena i maten upp av kroppen och andra avges från kroppen med avföringen, och det vatten som ingår i vår kroppen byts hela tiden mot vatten i vår omgivning. Föreställningen att vi skulle kunna "skydda" oss från skadliga ämnen i vår omgivning är således helt fel eftersom den mänskliga organismen ständigt utbyter ämnen med omgivningen. Sålunda byts många ämnen i vår kropp ut flera gånger under vår livstid. Antag t ex att vi andas ca 20 liter luft per minut, dvs ca 30 m³ luft per dag, och att vi dricker ca 2 liter vatten och äter ca 1 kg mat per dag. Under en livstid av ca 80 år motsvarar detta ca 1000000 m³ luft, dvs en kub med kantlängden 100 meter, ca 60m³ vatten och ca 30 ton mat, se fig. 3.13. Under sin livstid omsätter således en människa en total massa som motsvara ca 15000 gånger sin egen kroppsvikt. Svaret på frågan "Vad är jag?" är således: min kropp är en obestämbar del av naturen.



Figur 3.13 Vad är jag?— som totalt omsätter ca 1000 ton materia under ett liv.

Dessutom utbyter vi som människor — själar — ständigt information med vår omgivning, oftast andra människor — själar. Utan detta ständiga utbyte av information med omgivningen skulle vi snart duka under. En enskild människa kan alltså betraktas som en syntes av materia, energi och information — en kroppslig och själslig sammansmältning — ur omgivningen — en exergiförtätning i den annars exergitunna miljön, dvs en del av den totala materiella och andliga miljön och ingen isolerad varelse. (I princip kan vi betrakta verkligheten som variationer av exergitätheten — ordningen eller kontrasten — i tid och rum. Den naturliga ekologiska evolutionen syftar då till att öka denna täthet över kritiska värden så att t ex liv och medvetande uppstår, se fig. 3.4.) När således miljön skadas är det oss själva vi skadar.

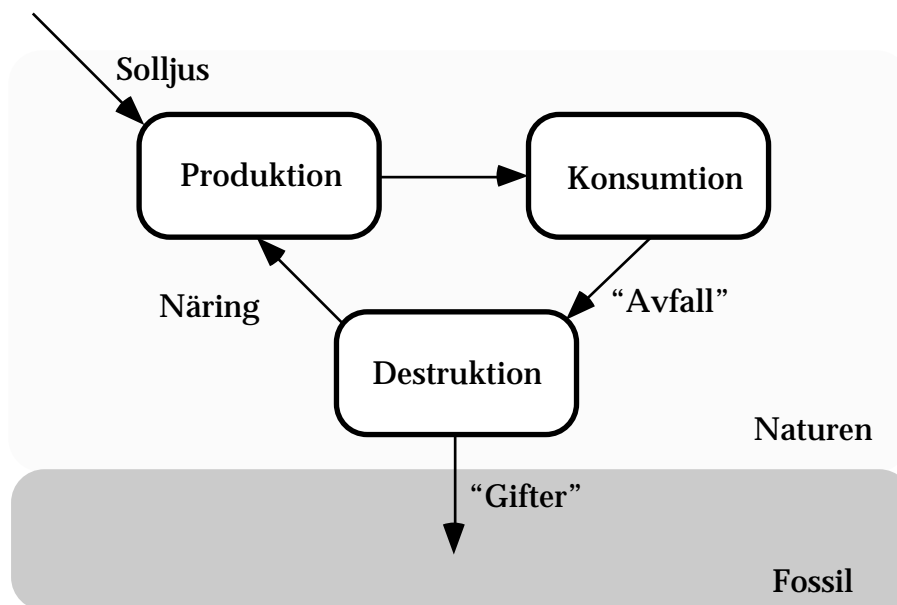
Det moderna mänskliga — sk utvecklade — samhällets utbyte av lagrade resurser med naturen illustreras i fig. 3.14. Lagrade resurser blir avfall i ett enkelriktat flöde. I samhället talar ekonomer ofta om produktion och konsumtion. De tänker sig då en ekonomisk verklighet enligt vilken naturen saknar värde och det är först då en resurs när samhället som den får värde — värde produceras, enligt ekonomin. På motsvarande sätt betraktas avfallet som värdelöst — värde har konsumerats — då en vara saknar efterfrågan i samhället och återförs till naturen. Denna ekonomiska uppfattning kan leda till allvarliga missuppfattningar om en varas verkliga — naturliga — värde, vilket helt skiljer sig från värdet enligt ekonomin. Denna missuppfattning leder bl a till att vissa ibland talar om avfallshanteringen i termer av kvittblivning eller rening när vi i praktiken bara flyttar runt ämnena i miljön. Egenskaperna produktion och konsumtion har en helt annan funktion i den levande naturen, se fig. 3.15.



Figur 3.14 Samhället tar lagrade fysiska resurser ur naturen och återlämnar avfall.

Produktion innebär att växterna producerar biomassa med hjälp av sol-ljus, koldioxid, vatten och näringsämnen i en process som kallas fotosyntes — ljusomvandling. Genom fotosyntesen binds alltså det exergirika solljuset som växtmaterial samtidigt som syrgas produceras. Härigenom skapas förut-sättningar för djurlivet — konsumenterna, att leva av växter och syrgas. I naturen finns dessutom en "tvättinrättning" som innebär att "gifter" som svavel, koldioxid och tungmetaller transporteras bort för att möjliggöra skapandet av ordning på jorden — den ekologiska evolutionen. Observera att i naturen, se fig. 3.15, finns en process, som helt saknas i samhället. Destruera betyder bryta ned, förstöra och oskadliggöra. Denna återföring av näringsäm-nen är således en avgörande länk i det kretslopp av ämnen som karakterise-rar naturen. Utan detta kretslopp av materia skulle snart naturen "äta upp sig själv", vilket sker då t ex isolerade bakteriekulturer utvecklas ohämmat. Först sker en explosiv tillväxt av bakterier så länge näring finns men då denna tar slut dör alla bakterier lika plötsligt som då man jäser vin. Destruenterna eller nedbrytarna utgörs av framför allt bakterier, svampar och maskar som bryter ner organisk substans till kemiskt enklare och därigenom mer tillgängliga ämnen. När ett naturligt ekosystem utvecklas i balans med omgivningen när vi ett sk ekologiskt klimax. Detta klimax karakteriseras av en snabb omsätt-ning av ämnen och en oerhörd artrikedom, dvs ett intensivt och rikt liv. Exempel på sådana ekologiska system är den tropiska regnskogen eller vår egen urskog. Destruenterna är således lika viktiga i ett naturligt ekologiskt system som producenter och konsumenter, dvs växter och djur. Trots detta betraktas destruenterna ofta i moderna odlingsmetoder som värdelösa och ersätts med insatser av konstgödsel, gifter och mekanisk bearbetning, vilket

leder till att de istället ofta utrotas. Det industrialiserade samhällets missbruk av matjord är skrämmande.



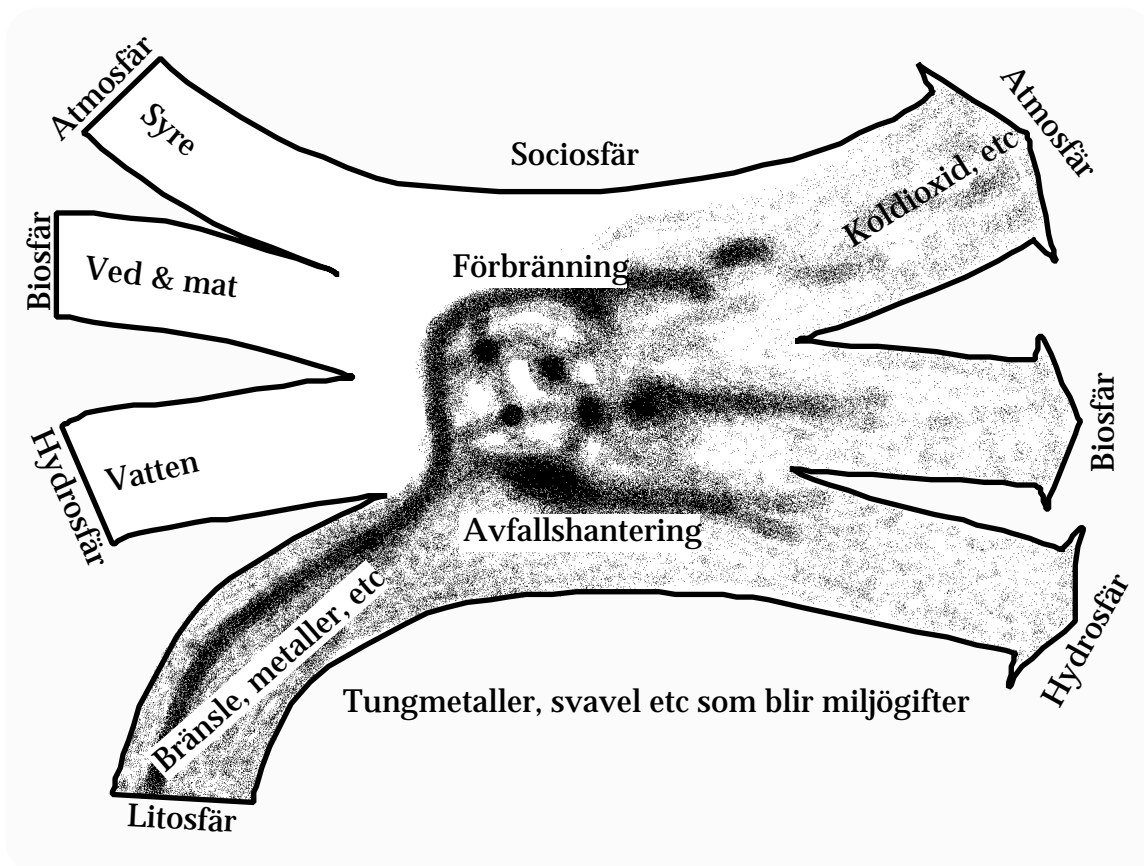
Figur 3.15 Naturens kretslopp drivs av solljus och “tvättar” bort gifter

I samhället saknas en motsvarighet till naturens destruerer, dessutom motarbetar samhället naturen genom att sprida gifter i naturen. I ekonomin talar vi om produktion av olja och metaller, men ur naturens perspektiv är detta liktydigt med förgiftning eftersom det motverkar naturens avgiftning. Produktionen av fossil som kol och olja sker av växterna som binder exergin i solljuset i växtmaterial som “faller ur” kretsloppet i myrar och djuphavs-sediment, vilka under årmiljoner omvandlas av naturen till fossila bränslen. När ekonomen säger att man producerar olja innebär det alltså i verkligheten — naturen — att olja konsumeras. Produktion kan således ha motsatt betydelse i ekonomin och i naturen.

Samhällets förgiftning av naturen återges tydligare i fig. 3.16. Här relateras den samhälleliga aktiviteten till sfärerna som jag tidigare nämnt, se fig. 3.1.

Stora mängder material omsätts genom industrisamhällets förbränning av fossil och brytning av metaller. Denna omsättning av lagrade resurser innebär också att tungmetaller, svavel och andra naturfrämmande ämnen frigörs i omgivningen som miljögifter, i fig. 3.16 illustreras detta som svarta. Vi ser hur dessa ämnen successivt sprids i atmosfär, biosfär och hydrosfär. Genom samhällets ofantliga omsättning av fossil som kol, olja och gas ökar dessutom atmosfärens halt av koldioxid, vilket bl a framkallar den sk växthuseffekten. På några årtionden återförs ämnen som koldioxid, svavel och tungmetaller till miljön som det tagit naturen årmiljoner att gömma undan,

se fig. 3.15. Det moderna samhället vrider således tillbaka utvecklingen och att tala om förbränningen av fossil som ett framsteg är tveksamt. (Detta är således ytterligare ett exempel på den språkförbistring som råder mellan ords betydelse i samhället och naturen.) Framtida generationer kommer antagligen att betrakta vårt handlande som tämligen dåraktigt. Samhällets avfallshandling ser vi som anhopningar av svarta — gifter, dessa anhopningar av miljögifter når så småningom miljön, oavsett om det i samhället kallas rening eller kvittblivning. Att deponera gifter i avfallslager innebär ibland att spridningen i naturen fördröjs. Ett tydligt exempel på vad som pågår är den stadiga ökningen av kadmium i såväl åkerjord, skördad gröda som modersmjölk. {Lindgren, 1992} Frågan är bara när situationen blir så allvarlig att vissa födoämnen måste klassas som otjänliga.



Figur 3.16 Massflödet genom sociosfären som frigör miljögifter.

För att samhället och naturen skall kunna överleva på sikt måste alltså den alltmer tilltagande förgiftningen stoppas. Samhällets tafatta försök att lindra symptomen av denna verksamhet genom att t ex kalka naturen innebär endast att katastrofen fördjupas, på samma sätt som behandlingen av allergier och astma ibland leder till att patienten istället dör. Vi måste inse att miljöskadorna i naturen är symptom på en "sjukdom" som har betydligt

djupare orsaker än t ex lokal brist på kalk. Orsaken är framför allt det moderna samhällets onaturliga omsättning av lagrade resurser, vilket alltså måste brytas. Ett sätt att omedelbart verka för en förändring av detta är genom beskattning. I avsn. 5.5 kommer jag därför att närmare redogöra för ett sådant förslag.

Istället för att koncentrera samhällets åtgärder mot att försöka begränsa miljöeffekterna måste man minska intaget av "gifter" i samhället. Om vi inte släpper in dessa ämnen i samhället kommer de inte heller att nå naturen, men om de släpps in i samhället så når de också förr eller senare naturen. Av fig. 3.16 ser vi att detta är det enda sättet att minska både resursuttömningen och miljöförstörelsen, vilka ju är två sidor av samma sak.

Det finns många skäl till att så lite görs för att verkligen komma åt och hindra en annalkande miljökatastrof. Många mäktiga ekonomiska intressen t ex kraftindustrin och övrig tung industri ser sina revir hotade, militären lever i sin egen värld med sina påhittade fienden, och folk i allmänhet lever i en falska trygghet och "dränks" i propaganda och underhållning. Samhällets handlingsförlamning kan således sammanfattas i ovilja och inkompetens, egenskaper som väl karakteriserar den mänskliga historien i vilken därför skapandet och upprätthållandet av myter är och har varit centralt. Dagens myter återkommer jag till men först en annorlunda bakgrund till dagens situation.

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 den sk Nord-Syd konflikten. Tekniken har i många fall blivit ett medel, för den rike, att förstöra och förtrycka och girigheten förkläds i internationell ekonomi och politik. Världsbanken kan knappast beskyllas för att gynna den fattiga världen. 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, istället investeras stora resurser för att framställa drivmedel av mat för ett alltmer ineffektivt transportsystem, se fig. 4.17 nedan. I Sverige ges t o m statliga bidrag för denna omställning från mat till bränsle. Dessutom är produktionen av drivmedel ur spannmål ineffektiv och kostsam både ur resurs- och miljösynpunkt. Mat är helt enkelt inte lämpligt som drivmedel. Enligt Brundtlandkommissionens rapport 1987 är den fattiges nöd är inte nöd utan skall tolkas som ett försvar för ett växande överflöd i den rika världen. Hjälpen till den fattiga världen får ju på inga villkor även-

tyra vårt eget överflöd. Brundtlandkommissionens slutsats 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 till den rika världen idag överstiger biståndet. Samtidigt diskuterar man i den rika världen om man eventuellt kan tänka sig att efterskänka dessa skulder — situationen är mildt 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. De verkliga konsekvenserna av denna "upptäckt" i termer av miljontals döda indianer, raserade kulturer och fortsatt stöld av guld och naturrikedomar skildras av frivilliga organisationer. {Gunnarsson 1992}

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 sädeslag skulle ge mat åt svältande människor, men istället blev de på nytt offer för den rikes girighet. {Borgström 1973} 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 mänsklighetens 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, miljövard eller militärt försvar.

De nyligen instiftade miljöavgifterna innebär bara att miljöförstöringen kommer att gå hand i hand med den ekonomiska tillväxten på samma sätt som uttömningen av våra naturresurser redan gör. Denna utveckling måste brytas. Naturen kan inte underordnas ekonomiska lagarna — om så sker slutar det med en katastrof. Ekonomin måste istället 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 bara blir allt allvarligare.

Vi måste förstå att ekonomiska värden är något vi själva hittar på och dessa har inget som helst värde för naturen. Hur rik man än kan bli på att

spekulera i fastigheter och värdepapper på börsen så är det 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 framför allt är hon satt att förvalta dem och inte att utarma dem för egen kortsiktig vinnings skull.

Dessutom formligen vräker naturen resurser över oss i form av solljus och vindkraft, men det gör man allt för att nonchalera t ex genom olika slags ekonomiska hinder. Den rådande ekonomin är ju mer ett hinder än ett medel för ett vettig resursutnyttjande.

Det är således av avgörande betydelse för framtiden 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 miljövårdsarbete kan på samma sätt komma att förvärpa miljösituationen om det bara blir floskler, dvs modeord som miljövänlig, grön ekonomi, miljöekonomi och kretslopp. Att inse detta allvar är en smärtsam process i 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 samhällsplanerarnas kompetens än om verkligheten och antagligen har dessa 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 — tecknet på utveckling.

Den rådande samhällssynen på miljön kan karakteriseras i myter, vilka ofta blir hinder för att slippa ta miljöproblemen på allvar. Att genomskåda dessa myter är således viktigt för en mer realistisk bild av den rådande miljösituationen, samhällets ansvar och agerande. 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. {Wall 1990d}

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 — miljöförstörelsen 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 ”miljöpolis” 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 stråt.

Myten om att nedbrytbara utsläpp skulle vara mindre skadliga än icke nedbrytbara saknar grund. Ett nedbrytbart ämne kan ju tas upp och omsättas i den omgivande miljön på ett skadligt sätt. Icke nedbrytbara ämnen däremot kan isoleras och "falla ur" miljön utan att skada den. De viktiga är således inte graden av nedbrytbarhet utan de effekter — på kort och lång sikt — som ämnet förorsakar då det når miljön. Denna effekt kan istället direkt relateras till miljöutsläppets exergi, vilket jag kommer att beröra senare, avsn. 5.5. Ju större exergi ett utsläpp representerar desto större miljöeffekt.

Spektakulära åtgärder som att "rädda" djurarter i sk genbanker saknar 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. Valda sjöar och 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 miljöförstörelsen 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 resurs-hantering 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 Västerås skulle kunna gå i bräschen, 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.

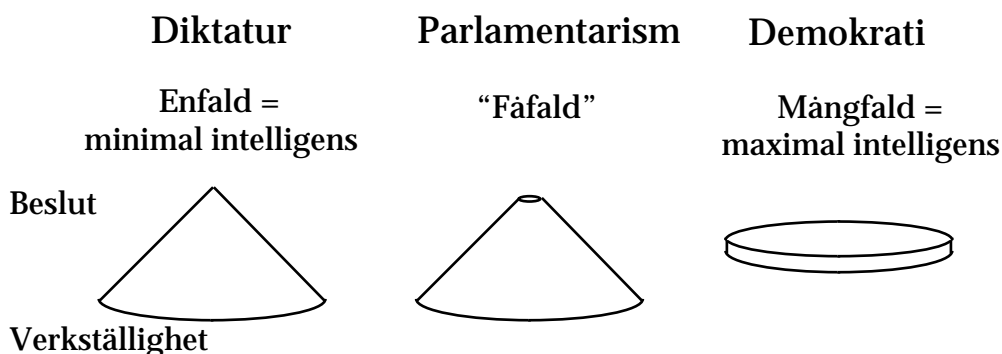
I detta perspektiv framstår också vattenklosetten som vår tids kanske största missgärning. Dess hål uppfattas av många som ett hål ut i intet. Ofta är det enda som avgör vad som hamnar i "holken" om det kan passera kröken. (Jag är t ex helt övertygad om att många skulle spola ner gamla möbler om det gick. Jag rekommenderar ett besök på den lokala avloppsanläggningen för att bekräfta detta!) Vattenklosetten innebär att friskt vatten, ofta grundvatten, blandas med den bästa naturgödsel som finns — vår avföring — för att sedan hamna på en tipp eller i ett vattendrag. Ofta blandas detta med industriavfall och blir helt oanvändbart. Härigenom missbrukas rent vatten och jordbruket förlorar tillgången till denna nödvändiga åter(av)föring — kretslopp — av näring och gödning till marken. Istället måste man därför på konstlad väg försöka ersätta de ämnen som härigenom hamnar på fel ställe i naturen, där de dessutom skapar onödiga miljöproblem och sjukdomar. Konstgödslingen innebär ökad resursutarmning och miljöförstöring då även oönskade ämnen som tungmetaller hamnar på åkern och sedan i maten. Att detta pågår sedan årtionden utan att myndigheter som Naturvårdsverket och Jordbruksdepartementet reagerar är en skandal.

3.11 Intelligens och demokrati

Mänsklighetens största och kanske minst utnyttjade resurs är människornas hjärnor — intelligens. Det är inte bara vår kunskap 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, dvs central planering och styrning. 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 tänkvärt exempel som också illustrerar den kreativitet som karakteriserar människan. 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 — enligt normen. “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.

Låt oss se närmare på tre generaliserade samhällstyper: diktatur, parlamentarism och demokrati (verklig demokrati), se fig. 3.17. En diktatur karakteriseras av envælde, där all makt är koncentrerad till en person — diktatorn, som fattar alla beslut. Om diktatorn ersätts av flera personer — ett parlament — får vi parlamentarism, vilket karakteriserar dagens sk demokratier, vilka ju oftast föregåtts av en monarki, dvs en diktatur. Demokrati betyder ordagrant folkstyre, dvs att all medborgare deltar i samhällets alla beslut. Motsatsen till demokrati är diktatur och parlamentarism är således varken det ena eller det andra utan något däremellan. Anledningen till att man gärna talar om dagens parlamentaristiska samhällen som demokratier är snarare en del i det organiserade hyckleriet. {Brunsson 1989}



Figur 3.17 Diktatur, parlamentarism och demokrati.

Eftersom den samlade intelligensen hos två människor är större än hos en människa är en demokrati mer intelligentare än en parlamentarism som i sin tur är mer intelligentare än en diktatur — mångfald kontra enfald. Vi ser alltså att dagens samhälle med parlamentarism utnyttjar den tillgängliga intelligensen dåligt, vilket bl a skapat både resursbrist och miljöförstöring — symtom på inkompetens och dålig förvaltning. Ökad kompetens kräver ökad intelligens och därmed ökad demokrati och ökat inflytande i samhället. Medvetenheten om detta växer sig allt starkare inom produktionsindustrin, där man talar om ett ökat arbetarinflytande, vilket jag kommer att behandla närmare nedan.

I dagens samhälle har media rollen av hovnarr för att skapa och upprätthålla en skenvärld av påhittade händelser, och annat som helt saknar verklighetsförankring. Kvinnor matas med krav på "skönhet" och moderlighet samtidigt som män underhålls med bl a sport. Underhållningsväldet drabbar oss alla i synnerhet våra barn och deras värderingar. Dagens informationsutbud i massmedia har nåt perversa och groteska proportioner. Begreppet frihet har fått en märklig innebörd. Ytterligare exempel på det organiserade hyckleriet ser vi i den kommersiella uppfostringsapparaten som vuxna människor erbjuder via reklamen saknar t o m förankring i den egna synen på barnuppfostran, se fig. 3.18 nedan. {Lindgren 1992}

Miljömedveten människa	Kommersiell uppfostringsapparat
Hänsyn, förståelse, respekt	Hänsynslös, våldsam, självisk
Ärlig	Smart
Generös, medkänsla	Krävande, självupptagen
Historiemedveten	Historielös
Räntefri ekonomi	Hög ränta
Se framåt	Leva i nuet
Naturintresserad	Dyrkar storstadens puls och MTV
Njuta av frid	"Action" och "håll igång"
Naturen inger trygghet	Naturen skrämmer
Eftertanke och försiktighet	Risker och "Våga — vinn!"
Söka äkta värden, även om vägen är svår	Söka effekter och enkla snabba lösningar
Ge kärlek	Få/ta sex
Vara naturlig	Posera, vara konstlad, manérisk och flärdfull
Skeptisk mot motorism	Dyrkar motorism
Göra själv, reparera	Konsumera, köpa nytt
Se sig själv som en liten del i det hela	Se sig själv som centrum
Undvika tobak, sprit och droger	Använda tobak, sprit och droger
Barnen före karriären	Den egna karriären före barnen

Figur 3.18 "Egna barn och andras ungar", fritt efter Lindgren 1992.

Inom miljöområdet finns ytterligare exempel på den tanklöshet och ibland nästan föraktfullhet som myndigheterna utövar mot enskilda människor. Från fig. 3.17 ser vi att skillnaden mellan diktatur — enfald — och parlamentarism — fåmansvälde — är marginell. Idag har man t o m ibland institutionaliserat inkompetensen t ex inom byggbranschen med förvaltningar som Statens planverk vilket föreskrev byggnadsregler. 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 både för näringsåterföringen och för nedbrytningen av fekalierna) — och i komposten återvanns näringsämnen — både resurssnålt och miljövänligt. Jämför vattenklosetten ovan.

Idag talar man om ekobyar, som om det vore någonting nytt när sanningen är att vi har långt kvar innan vi närmar oss den naturriktiga 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.

Generationers kunnande och kompetens har ersatts av ett akademiskt snobberi utan verklighetsanknytning. Följande citat från en fabrikschef illustrerar den rådande situationen i samhället: "Akademiskt skolade tekniker har en tendens att krångla till det för mycket. Vanliga arbetare ser de enkla, fungerande lösningarna." {Ny Teknik 1991:36} Det är på tiden vi börjar inse konsekvenserna av den rådande samhällsorganisationen och dess utbildningssystem. 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. Utbildningssystemet, som har ett stort ansvar för den pågående utvecklingen, måste reformeras på allvar. Traditionella föreställningar måste ersättas av en realistisk verklighetsuppfattning, en helhetssyn och en respekt för eleven som intelligent varelse. {Pirsig 1974}

Då människor organiseras i kollektiv är således valet av organisationsform avgörande för hur effektivt — intelligent — 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 — parlamentarism, vilket innebär att besluten fattas centralt. Denna centralstyrning gör ibland samhället också 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. Ett naturligt ekologiskt system är alltså analogt med en verklig demokrati, där

alla individer har samma inflytande över systemet, vilket är en förutsättning för den ekologiska evolutionen.

Klättermentaliteten, som kan karakteriseras "slicka uppåt och trampa nedåt", genomsyrar hela vårt samhälle. {Adler-Karlsson 1990} Receptet för framgång som klättrare är att aldrig gå utanför hierarkin, smörja sina överordnade och mjölka sina underordnade. Hierarkin blir därigenom självuppfyllande. Ofta leder klättermentaliteten också till att personer befordras till sin inkompetensnivå, dvs befordras tills dess de blir odugliga. Konsekvensen av detta för hela organisationen blir således en strävan mot en organiserad inkompetens.

Det finns också en stark strävan hos dem som klättrat en bit upp i samhällspyramiden att exponera sin ställning. Klättraren karakteriseras också av ständig brist på själslig tillfredsställelse. Ofta tar sig dessa behov uttryck i form av ökad materiell konsumtion och innebär därigenom en ytterligare belastning på naturen.

Samhällets centralstyrning är dessutom starkt mansdominerat, vilket bl a manifesterats genom häxprocesser och kyrkans kvinnosyn. I modern tid ser vi det som ett institutionaliserat förakt för hemarbetande kvinnor. Mansdominansen innebär sålunda en ytterligare utarmning av intelligensen i ett parlamentariskt samhälle. Manliga gillen och manligt kottteri motarbetar ofta systematiskt en mer jämlik representation. Till och med manlig homosexualitet förefaller ibland innebära ökade möjligheter till framgång som "klättrare" — en tragisk konsekvens av en pervers mansdominans i samhället.

Det finns skäl att fundera över varför just vårt samhälle hamnat i resursutarmning och miljöproblem, och vilken betydelse har valet av samhällsorganisation? 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? {Squires 1986} Icke demokratier som diktatur och parlamentarism skapar många hinder för samhällsutvecklingen genom en påtvingad skiktning av informationsflödet och beslutsprocessen, se fig. 3.17. Inom t ex utbildningsväsendet finns 17 skikt mellan den enskilde studenten och kungen. {Trolle 1990} Istället måste varje individ, som i de ekologiska systemen, ges ett likvärdigt inflytande över beslutsprocessen och därmed utvecklingen. Hur detta kan ske ser vi idag bl a inom den sk japanska företagsfilosofin.

Den 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. {Tribus 1987} I en platt organisation får bl a begreppet demokrati en verklig innebörd.

W. Edwards Deming är den person som mer än någon annan förknippas med detta nytänkande inom näringslivet, han har bl a upprättat följande regler, "Deming's 14 Points", för att öka produktiviteten: {Deming 1982}

1. Create consistency and continuity of purpose.
2. Western management must awaken to the challenge, must learn their responsibilities, and take on leadership for change.
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. Västerlandet måste anta utmaningen, lära sig ta sitt ansvar och skaffa en ledning som arbetar för förändring.
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 produktionsstal.
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 och demokratiska. 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 motsatsen dvs ett missbruk av människor och deras intelligens.

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

WHENEVER THERE IS A PROBLEM
85% OF THE TIME IT WILL BE IN THE SYSTEM
15% OF THE TIME IT WILL BE THE WORKER.

(“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. Denna syn tillämpas nu även med stor framgång inom utbildningen. {Tribus et al. 1992} Utbildningen måste således inriktas mer mot att lära sig att lära.

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 — skapa demokrati.

I Japan har dessa idéer 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 intelligentian. En av de mer framgångsrika japanska skolorna är den sk Kaizen, vilket står för en ständig 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 — en levande organisation — istället för beständighet — en död organisation. Låt oss se närmare på hur den västerländska och japanska organisationsfilosofin skiljer sig åt.

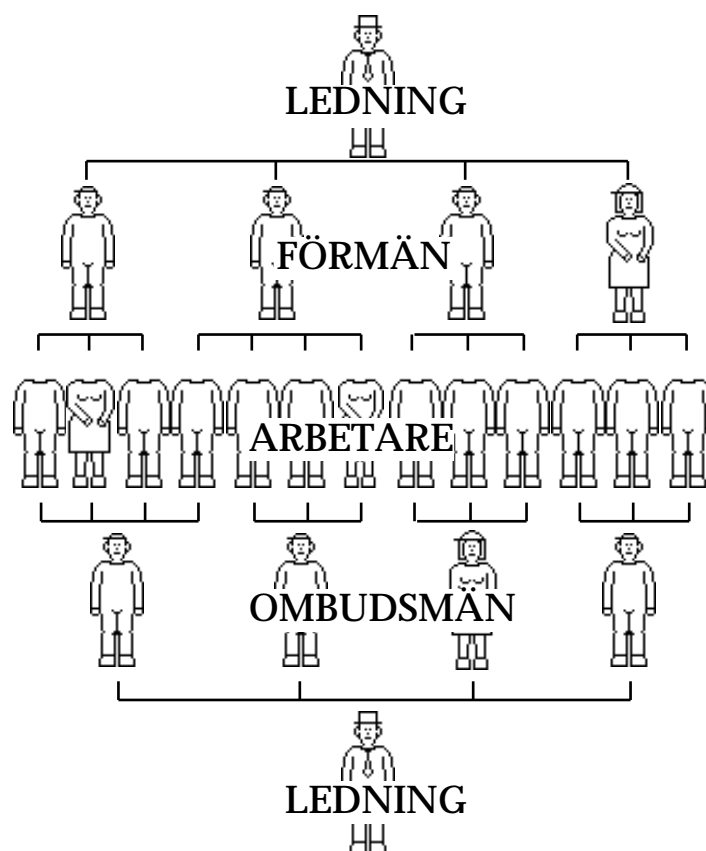
I Västerlandet säger vi ofta att “ensam är stark” men i Österlandet gäller snarare att “ensam är död”. Vårt förhållande till andra människor och inställningen till oss själva visavi kollektivet skiljer sig alltså väsentligt mellan österländsk och västerländsk filosofi, vilket genomsyrar mycket i våra samhällen bl a konst, religion, medicin, natur och teknik.

Den västerländska företagsmodellen kan förenklat beskrivas med fig. 3.19. 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. Organisationen 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. 3.20. Från fig. 3.17 ser vi också att denna organisation maximerar demokratin och intelligensen.

Demings regler ovan talar inte om förbud av fackföreningar eller förtryck, istället talar han om en öppen dialog, ett arbetarinflytande i produktionen och en organisation byggd på kvalitet — maximal intelligens. Organisationer som fackföreningar och företagsledningar har inget självändamål utan skall vara ett medel för att maximera utbytet av ett samarbete. Det råd som många japanska industriledare ger till sina västerländska kolleger är att vistas mer på verkstadsgolvet, dvs att platta till pyramiden. 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 att bli effektiv — mer intelligent.



Figur 3.19 Den västerländska "dubbelpyramiden"



Figur 3.20 Den japanska platta organisationen

För en japansk företagsledare blir härigenom arbetaren företagets viktigaste kapital — här finns företagets samlade kompetens och kreativitet. Detta har många konsekvenser för verksamheten, bl a är de japanska företagen ofta mycket breda i sitt produktsortiment, dvs de utnyttjar sitt kapital bättre. Ofta sker dagligen ett organiserat informationsutbyte inom företaget och arbetaren erbjuds ofta vidare utbildning för att öka företagets kompetens och konkurrenskraft.

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 samhällsplaneringen.

Den rådande resurs- och miljösituationen tillsammans med den globala klyftan mellan rika och fattiga kräver en utvecklingsstrategi som karakteriseras av mångfald inte enfald. Det skulle t ex inte vara något större problem att med hjälp av etermedia och vanliga telefoner avsätta t ex varje söndag förmiddag för demokratiska beslut i de svenska folkhemmen. I framtiden kan varje hem utrustas för att enkelt förmedla folkviljan — utan ombud. Antagligen kommer Japan att gå före även på detta område. I Japan har man nämligen ofta en fungerande demokrati i praktiken — de verkliga besluten fattas ute bland människorna. Det är detta som vi i väst ibland uppfattar som en japansk beslutsvända. Varje beslut i Japan måste nämligen föregås av en kollektiv process som bl a inbegriper medarbetarnas synpunkter och formuleringar av beslutet. I Japan skapar man beslut genom samverkan mellan människor medan man i väst fattar beslut enligt sk demokratisk ordning. I väst har vi istället en demokrati på papperet, institutionaliserad i form av riksdag, nämnder och utskott — parlamentarism. I praktiken blir det få- eller enmansutredningar som inga vanlig människa kan ta del av och som klubbas vidare i hierarkin — allt i "demokratisk" ordning. Detta hyckleri måste ersättas av verklig demokrati om samhället skall ha en rimlig chans att bestå.

Dagens skola handlar mer om beteendeträning än självständigt tänkande. Är man riktigt cynisk så är kanske den graffiti som pryder tråkig stadsmiljö det mest kreativa vi ser idag. Det är åtminstone ett tecken på att ungdomar fortfarande har kvar en vilja att förändra och skapa — en förutsättning för samhällsutvecklingen. Skolan måste bygga på en större hänsyn till den enskilda individen och ge varje elev möjlighet att utveckla sin egen begåvning i en pluralistisk anda. Individuell frihet i samverkan ger samhället dess livskraft, på samma sätt som i naturen.

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. 3.21 nedan.

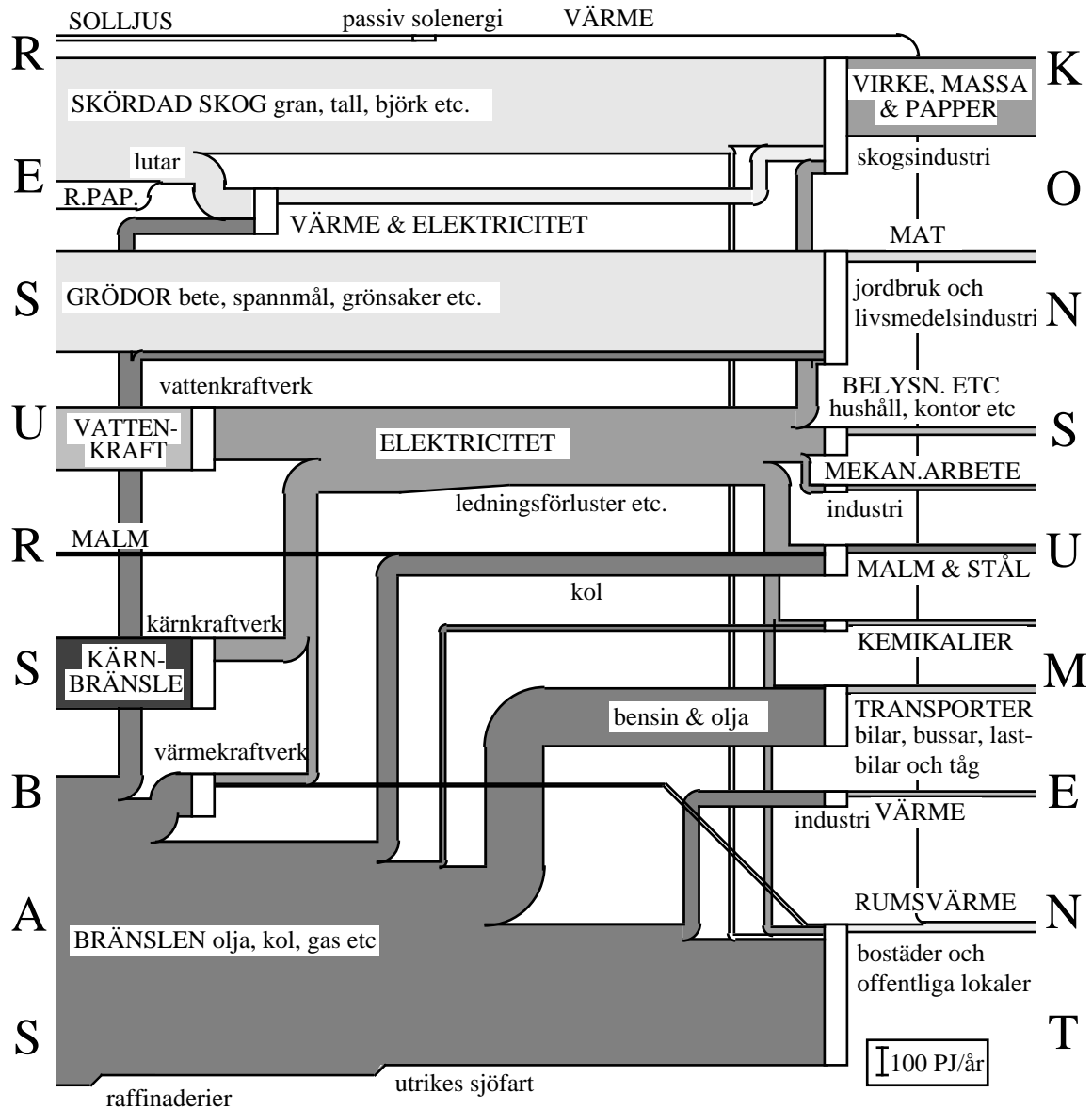
Den nedre delen av diagrammet känner vi igen från exergiflödet i fig. 3.7 ovan. Här återfinns vi "inflödet" av kemisk exergi, kärnexergi och vattenkraft. Till skillnad mot tidigare ser vi nu tydligare var dessa flöden omsätts i samhället.

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. 3.21.

Flödena av energi- och materialresurser går från vänster till höger i diagrammet, från resursbasen till konsument. Bredden på flödena ges av deras exergiinnehåll 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 konsument.



Figur 3.21 Den svenska energi- och materialomsättningen 1980 i exergienheter.
Total resursomsättning 2540 PJ eller 305 GJ/person. Nettoutbyte 500 PJ eller 60 GJ/person.

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/m² och dygn under eldningssäsongen i Västerås. 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

Skogen har stor betydelse för både miljö och människor och i Sverige står den dessutom för den viktigaste exportinkomsten. Våra förfäder har sedan urminnes tider utnyttjat skogen, där de kunnat förse sig med både mat och bränsle. Idag ger den oss varor som virke och papper. Skogen är också viktig som vattenreservoar, rekreationsområde, bullerskydd, föroreningsabsorbator och klimatregulator. Dessutom utgör skogen en mycket viktig del av den levande naturen.

Idag brukas metoder som dikning och kvävegödning för att maximera den kortsiktiga ekonomiska avkastningen. Återplantering av träd är reglerad enligt lag, eftersom det saknar ekonomiskt värde. Enligt skogsvårdslagen är varje skogsägare skyldig att tillgodose återväxten, dvs varaktig virkesproduktion. Tyvärr leder detta till "trädaåkrar" istället för skog, men utan denna lag skulle antagligen även träden snart vara borta.

Skog skördas vanligen genom kalhuggning av upp till 10 ha. Sammanlagt avverkas ca 200 000 ha/år i Sverige. Stora och tunga maskiner används, vilka gör sår i marken och sliter upp rötter och buskvegetation vilka håller samman och skyddar jorden. Oljespillet efter dessa kan vara tiotals kilo per hektar. På ett kalhygge där inga träd skuggar marken från sol och vind varierar dygnstemperaturen mer än normalt — jorderosionen är ett faktum. Markvegetationen är mycket viktig både i skyddande och isolerande syfte. Även vattenprocessen påverkas allvarligt av kalhuggning. I en skog tar träden upp 10-40% av all nederbörd, det vattnet som inte binds i biomassan avdunstar atmosfären och ger därigenom ett mildare klimat under heta sommardagar. Utan träd hamnar all nederbörd på marken, vilket leder till ökad risk för försumpning, markförsurning och jorderosion.

Utdikning av skogsmark leder till att grundvattennivån sänks och kvaliteten i det avrinnande vattnet påverkas negativt då marken rivs upp. Vattnet blir förorenat istället för att silas och renas i den bundna marken, surhet och alkalinitet växlar, kväve-, fosfor- och sulfathalten ökar.

Försurning av skogsmark beror till stor del av luftföroreningar som kommer med nederbörden. Andra orsaker är helträdsutnyttjandet då viktig näring försvinner från marken och kvävegödning som vid feldoseringar har en starkt försurande effekt. Även det svenska skogsbruket med sin ensidiga inriktning på gran- och tallmonokulturer leder till en långsam försurning av marken — sk podsolering. Då matjord planteras med gran förstörs jordmännen för all framtid eftersom all humus urlakas och jorden blir näringsfattig — podsol. Denna process är irreversibel, dvs den matjord våra förfäder skapat går för alltid förlorad. Matjorden är mänsklighetens viktigaste kapital. Det är

en historisk skandal att detta idag sker med statligt stöd. Våra barn kommer att gråta över våra politikernas dårskap.

Den svenska skogsavverkningen 1980 uppskattas till 394 PJ rundtimmer (49.2 Mm³ fub, fast mått utan bark). (Den årliga tillväxten uppskattas till 480 PJ eller 60 Mm³ 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 bräddor. 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. Nästa omvandling i diagrammet visar jordbruket och livsmedelsindustrin.

Jordbruket

Äldre tiders jordbruk byggde på både djur- och växtproduktion. Mjölproduktionen var central i det svenska jordbruket. Djurens foderbehov blev avgörande för hur växtodlingen på gården utformades. Betesmarker och vallodling var förutsättningar för produktionen.

Så länge människan brukat jorden har hon även påverkat den omgivande miljön. Det moderna jordbrukets mål dikterade av kravet på ekonomisk lönsamhet — största avkastning till minsta arbetsinsats — innebär svåra påfrestningar på miljön. Metoder som stordrift, djurfabriker, hög mekanisering, konstgödning, konstbevattning, utdikning, kemisk bekämpning innebär katastrof för miljön och jordbruket. Till exempel ökar hela tiden halten av

kadmium i grödan och om inget drastiskt sker är det bara en tidsfråga innan maten blir direkt oätlig. {Lindgren 1993}

Det mesta av den svenska åkerjorden konstgödslas med kväve, fosfor och kalium. Om mer kväve deponeras än vegetationen kan ta upp, lakas nitrat ut och ammonium nitrifieras och resultatet blir att kväveöverskottet blir starkt försurande. Vid alltför stora gödselgivor blir grödorna mindre stråstyva och lägger sig därför lättare vid skyfall. Även skördeutbytet minskar vid extremt stora givor. En annan bieffekt är övergödningen av vattendragen då även fosfor bidrar till igenväxning och algblooming. Fosfor kan också ha motsatt effekt då det bildas svårösliga järn- och aluminiumfosfater vid låga pH-värden, näringsbrist blir följden och fosfaterna hämmar växtligheten.

När diken läggs igen och häckar, träd och buskar som fungerar som hinder för vinden, tas bort blir följden jorderosion. Tunga maskiner pressar ihop marken, vilket hindrar vatteninfiltrationen och ökar ytavrinningen, viktiga markorganismer som maskar får svårare att överleva.

I jordbruket och livsmedelsindustrin omvandlas skördad gröda 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 Fe_3O_4 (magnetit), se avsn. 3.5 och app. C.

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

Den svenska järnproduktionen var 1980 3.5 Mton. Grovt sett representerar detta alltså en exergi 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 bränsleflödet (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. Exergin 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. 3.22. 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.

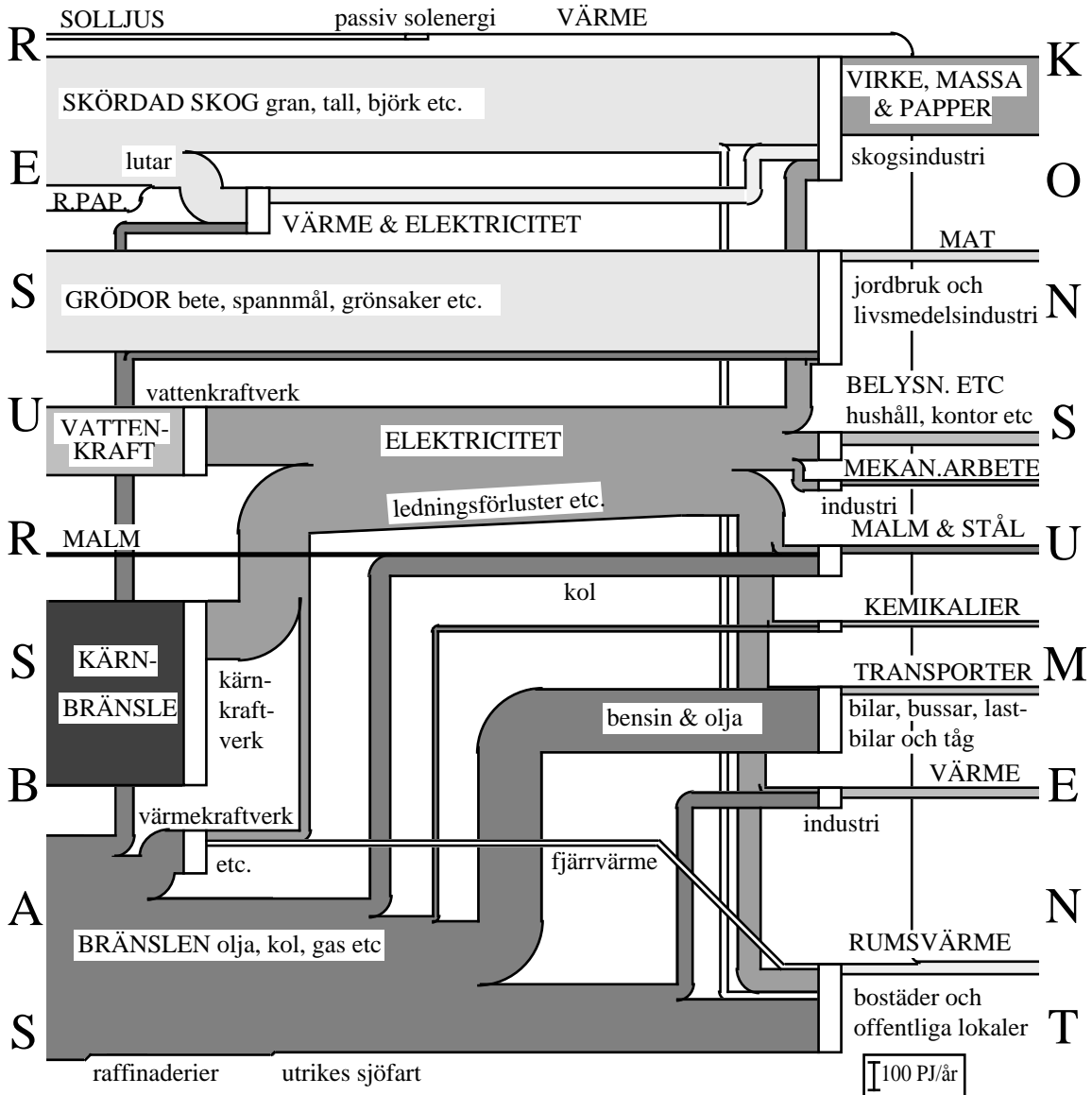
Andra naturliga exergiflöden underhåller också samhället genom en mer indirekt funktion. De renar vatten, luft och jord och lagrar t ex tungmetaller och sulfider. En grov uppskattning av vad den naturliga luft- och vattenreningen kan betyda i termer av exergi per år i Sverige ger som resultat ca 2 PJ/år, vilket är för litet för att åskådliggöras i diagrammet i fig. 3.21 och 3.22. 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 fig. 3.21 och 3.22 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.



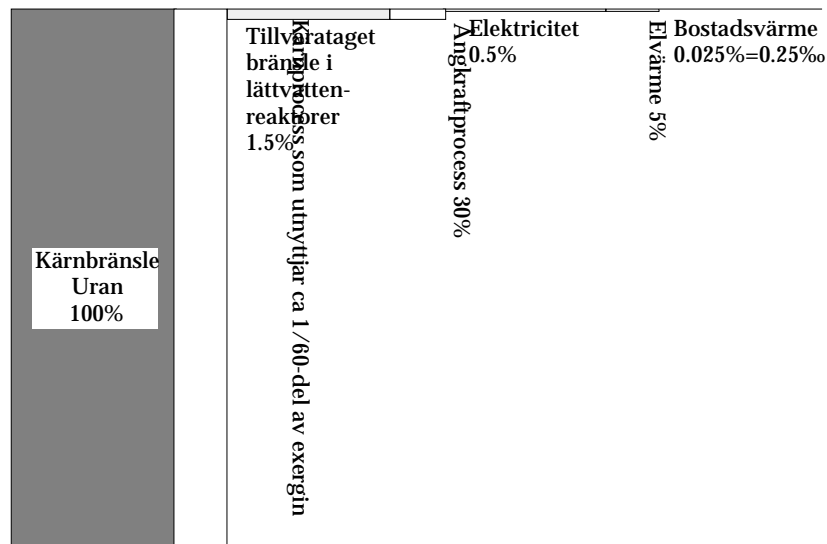
Figur 3.22 Den totala exergiomsättningen i det svenska samhället idag.

Analyser 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 resurs-

fördelning. 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. 3.21 och 3.23.

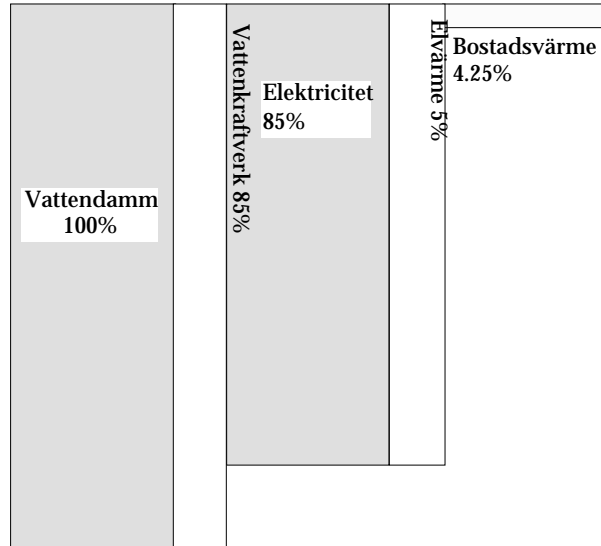


Figur 3.23 Utbytet för kärnkraftsproducerad el i lättvattenreaktorer för elvärme

Vid omvandlingen kärnbränsle – elektricitet tillvaratas ca 30 % av kärnbränslets exerginnehåll. 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. 3.23. Omkring 59/60 av exergin i kärnbränslet återfinns således i kärnavfallet, vilket delvis förklarar svårigheterna att ta hand om detta mycket exergirika avfall.

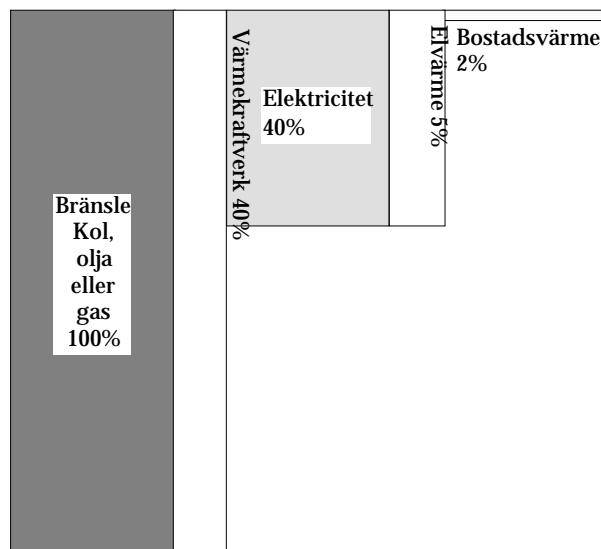
Denna exergiförlust återfinns ej i fig. 3.21 eftersom den skulle dominera hela diagrammet, då den utgör ca 17 000 PJ under år 1980, dvs nära 7 gånger den totala resursomsättningen idag, som presenterades i fig. 3.22, motsvarar kärnbränslet ca 36 000 PJ. Nettoutbytet då kärnbränsle via elvärmare blir

värme i våra hus är alltså bara ca 0.25 %, se fig. 3.23. Även detta är jag övertygad om att våra barn kommer att gråta över i framtiden, när de sitter där med allt kärnavfall som måste bevakas i årtusenden. Jag saknar ord för att beskriva den mänskliga tragedi vi iscensatt och t o m försvarar. Det är bara personer som August Strindberg som kan rätt beskriva mänsklig dårskap “Det är synd om människorna ...” ur *Ett drömspel* från 1902.



Figur 3.24 Utbyte för elvärme ur vattenkraftsproducerad el

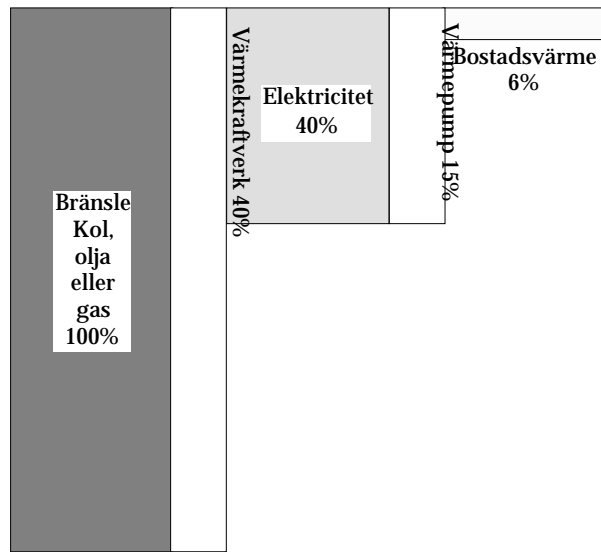
Då vattenkraft omvandlas till elvärme blir utbytet istället ca 4.25%, se fig. 3.24 ovan.



Figur 3.25 Utbytet för elvärme ur bränsleproducerad el

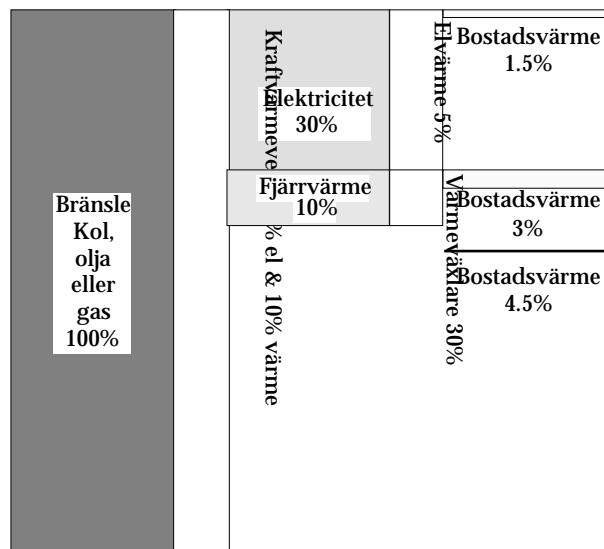
Då bränsle (kol, olja eller gas) omvandlas till el och värme blir utbytet ca 2.0 %, se fig. 3.25 ovan. En bra kakelugn, som visserligen bara kan omvandla

ved till värme, har ungefär 1 % exergiverkningsgrad. Den använder också ved, som är en förnybar resurs.



Figur 3.26 Utbytet för värme ur en elvärmepump och bränsleproducerad el

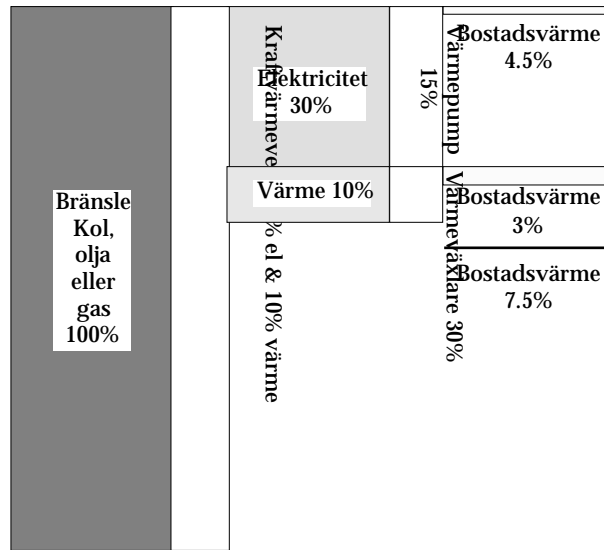
Då vi ersätter den direktverkande elradiatorn med en elvärmepump förbättras utbytet p g a exergiuutbytet i värmepumpen som är 15%, se fig. 3.26 ovan, till ca 6%.



Figur 3.27 Utbytet för bränsleproducerad el i kraftvärmeverk för elvärme och fjärrvärme

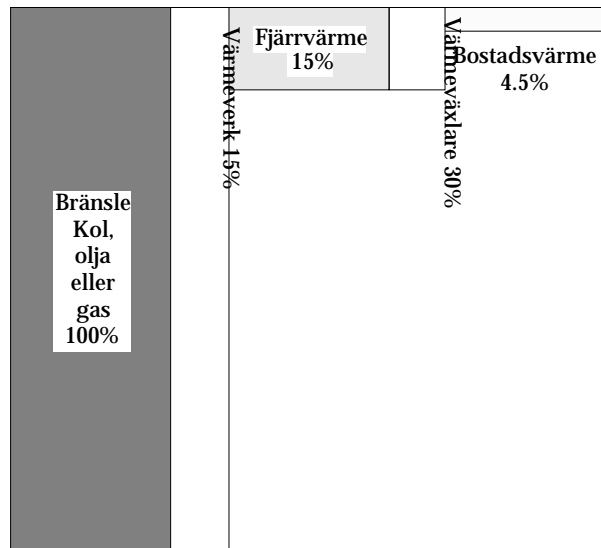
Om vi ersätter värmekraftverket med ett kraftvärmeverk, dvs samtidig produktion av el och fjärrvärme förbättras utbytet en del. Låt oss för enkelhets skull anta exergiuutbytet 30% el och 10% fjärrvärme, vilket motsvarar ett energiuutbyte av ca 89%. I fig. 3.27 och 3.28 ser vi kraftvärme i kombination 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 3.28 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. 3.29.



Figur 3.29 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. 3.21 och 3.22 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

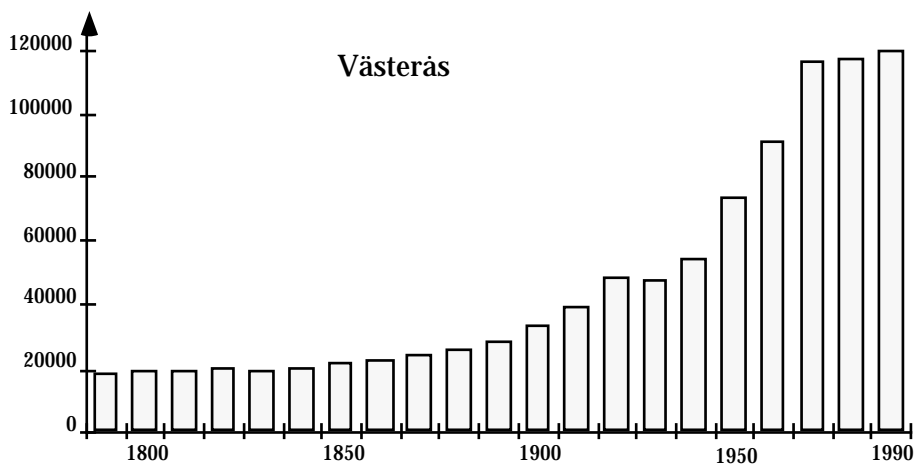
genom energihushållning som bättre isolering. I alternativet mellan värmekraftverk, kraftvärmeverk och värmeverk är kraftvärmeverk det klart mest effektiva. I princip kan ett kraftvärmeverk uppfattas som ett värmekraftverk plus en fiktiv värmepump med exergiverkningsgraden 100%, vilket är praktiskt omöjligt att förverkliga. Vi ersätter ju en fjärdedel av elproduktionen i värmekraftverket, fig. 3.26, med lika stor produktion av fjärrvärme istället, fig. 3.27 och 3.28. 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 VÄSTERÅS

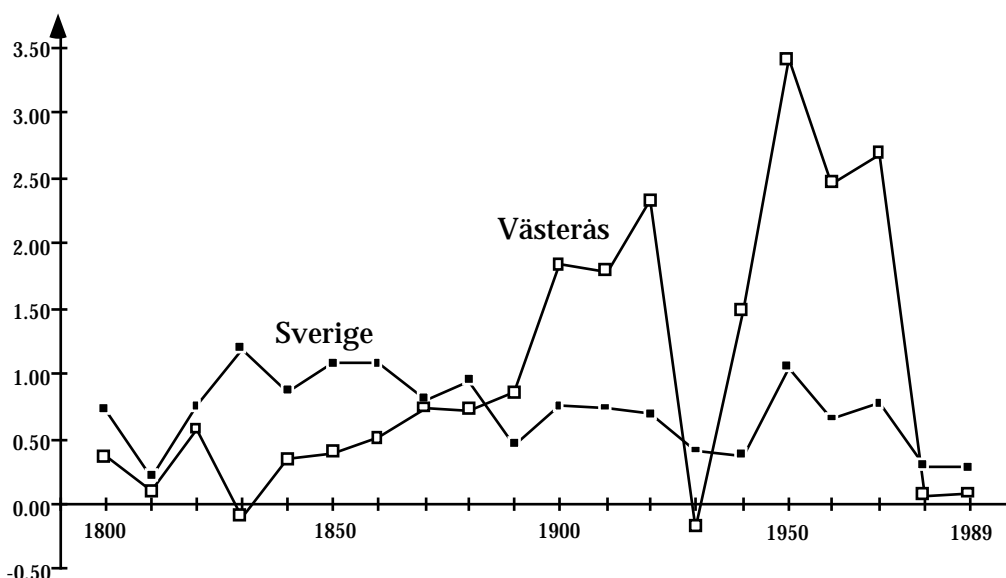
4.1 Historia

Västerås, Västra Aros (aros=åmynning), stifts- och residensstad i Västmanlands län, ligger vackert belägen där Svartån rinner ut i Mälaren. För 2000 år sedan låg den nuvarande stadskärnan ca 10 m under vatten. Den tidiga staden låg i Badelunda, nord ost om nuvarande centrum, där vägen norrut mot Bergslagen korsade vägen mot Stockholm. Badelunda blev således tidigt centrum för handel och kultur. Västra Aros omnämns redan år 1120 som biskopssäte och domkyrkans äldsta delar är från 1240-talet. Med bergsbrukets utveckling på 1300-talet, ökade Västerås betydelse som utskeppningshamn. Reformationsriksdagen 1527 i Västerås gjorde bl a Gustav Vasa till kyrkans överhuvud och vid Västerås riksdag 1544 tillföll kronan Vasasläkten, vilket blev inledningen till Sverige som diktatur och krigarstat i Europa. 1587 då staden härjades av brand hade den bara 1000 invånare. 1620 gavs staden nya privilegier, 1623 plats för Sveriges första gymnasium och handeln med järn och koppar blomstrade. En ny brand härjade 1714 och först i slutet på 1800-talet blev staden åter betydande med järnvägen och industrier som ASEA och Nordiska metall AB numera ABB och Outokumpu copper.



Figur 4.1 Befolkning i Västerås från 1790 till 1990.

Befolkningen i Västerås är starkt förknippad med Aseas utveckling, se fig. 4.1. Den ökade snabbt efter Aseas etablering men har sedan 70-talet stagnerat. Om man jämför Sveriges och Västerås årliga befolkningsökning så syns även där Aseas betydande roll som fig. 4.2 nedan visar.



Figur 4.2 Befolkning i Västerås från 1790 till 1990.

Befolkningsminskningen under depressionen på 30-talet kan alltså tillskrivas staden som industriort. Den mycket konjunkturkänsliga industrin sysselsätter idag ca 37% av befolkningen, vilket är betydligt högre än riksgenomsnittet. Så länge ABB är framgångsrikt så länge ser framtiden ljus ut för Västerås — ett framtida högteknologiskt centrum — eller? Om ABB flyttar kan det lika gärna bli en "spökstad". Samtidigt som man planerar för ytterligare 20 000 invånare bör man alltså även upprätta en beredskapsplan för en lika stor minskning.

4.2 Naturliga exergiinflöden

Exergiomsättningen i Västerås utgör en del i den nationella omsättning, se avsn. 3.12. Skillnaden mellan medelvästeråsaren och medelsvensken är marginell. En stor del av de resurser som omsätts i Västerås 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 västeråsaren. Låt oss nu beräkna de naturliga fysiska resurserna i Västerås, se app. G.

Västerås landareal uppgår till 855 km² och härtill kommer sjöytan 110 km². Landarealen fördelar sig mellan: tätort 7%, åkermark 35%, betesmark 4%, skog 48%, onyttig skog 2% och övrig mark 5%. Inflödet av solljus motsvarar ca 1 000 kWh/m² och är dvs 3.6 PJ/km² år, vilket ger ca 3 100 PJ/år över landarealen och 400 PJ/år över vattenytan dvs totalt 3 500 PJ energi.

Enligt tab. 2.1 ovan är exergifaktorn för solljus 0.93 vilket medför att $3\,500 \times 0.93 = 3\,300$ PJ solexergi når Västerås varje år. Tillgången på vindexergi kan uppskattas till ca 0.1 TJ/km² år, vilket ger en total vindexergi över vattenytan på ca 11 TJ per år. Avkastningen från jordbruksmarken (åker- och betesmark) kan uppskattas till ca 1% av solexergiinflödet vilket ger en total exergi i grödan av ca 12 PJ per år. Produktionen av biomassa i skogsmarken är ca 0.1% av solexergiinflödet vilket ger nära 2 PJ från skogsmarken i Västerås. Idag motsvarar kommunens skogsbestånd ca 40 PJ och avverkning ca 0.8 PJ/år. Svartån och Sagån rinner också genom kommunen vilket medför en total möjlig vattenkraftsutvinning av ca 16 GWh/år eller ca 0.06 PJ/år.

Exergi når alltså Västerås i naturliga flöden som solljus, vind och strömmande vatten, 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 3 300 PJ (920 TWh) mot Västerås land- och havsytan, vind 0.011 PJ (0.003 TWh) över vattenytan, gröda 12 PJ (3.3 TWh), virke 2 PJ (0.6 TWh) och Svartån och Sagån 0.06 PJ/år (0.016 TWh/år). Det naturliga resursflödet över Västerås framstår således som enormt. Av detta skulle en bråkdel av solexergiinflödet kunna göra västeråsarna mer än självförsörjande på värme och el. De förnybara resurserna kan vi tillåta oss att slösa med, men de ej förnybara måste utnyttjas maximalt då de också innebär svåra miljöproblem.

Idag tillvaratas endast avkastningen från åker och skog, dvs en bråkdel av exergiinflödet, samt en fjärdedel av exergin ur det strömmande vattnet i Svartån och Sagån. Solexergiinflödet över Västerås tätort, ca 60 km², är ca 220 PJ per år samtidigt som exergibehovet för uppvärmning, under ett normalår, i Västerås är 0.37 PJ per år[†]. Mindre än 0.2 procent av solexergin över tätorten skulle alltså kunna täcka hela uppvärmningsbehovet. Solexergiinflödet mot ett enskilt hus motsvarar ofta över 100 gånger uppvärmningsbehovet.

4.3 Omsättningen av värme och el i Västerås 1989

Nästan hela Västerås värmebehov tillgodoses av Västerås Kraftvärmeverk (KVV). Kraftvärmeverket omvandlar kol i block 1, 2 och 4 till hetvatten, som når abonnenterna via fjärrvärmenätet. Oljeeldning förekommer endast

[†] Energibehovet är ca 2 050 GWh/år, se tab. 4.1, vilket med exergifaktorn 0.05 ger exergin 0.369 PJ/år.

vid spetslast eller som reserv. Vid lågt elpris används även el för värmeproduktionen, vilket medför en extremt dålig exergiverkningsgrad.

Kraftvärmeverket i Västerås producerar ingen egen elektricitet om omvandlingen kan göras ekonomiskt fördelaktigare på annat håll, dessutom kan elektriciteten ibland vara så billig att KVV omvandlar el till värme i elpannor (tillsammans 70 MW). Eldistributionen i Västerås kommun sker till stor del via elverken vid Tekniska Verken, som levererar ca 700 GWh (2520 TJ) el till Västerås tätort och en del av landsbygden. Vattenfall levererar ca 100 GWh (360 TJ) el per år till orterna Barkarö, Tillberga, Ullvi och Hökåsen samt landsbygden runt dessa orter. Industrierna ABB och Outokumpu copper har egna kraftleverantörer som levererar ca 275 GWh (990 TJ) per år. {Östlund 1991}

4.3.1 Tillförsel

I Västerås kommun förekommer enstaka termiska solfångare i privata hushåll, vilka tillsammans med den passiva solenergin ger ett bidrag under uppvärmningssäsongen.

Västeråsarna omsatte ca 13.5×10^6 m³ vatten (kranvatten) och avloppsvattnet uppgick till 18.25×10^6 m³ eller ca 50 000 m³ per dygn. Skillnaden beror dels på företag och hushåll med egna vattentäcker dels på inläckage i avloppsrören från omgivande marker. För vattenförsörjningen och avloppsreningen i centralorten och flera tätorter ansvarar det kommunala Vattenverket vid Tekniska Verken. Vattenförsörjningen sker från Mälaren som infiltreras i Badelundaåsen på två ställen. Vattenledningsnätets längd är drygt 510 km och avloppsledningsnätets drygt 670 km.

Med biobränsle (biomassa) avses organiskt material som härrör från växternas fotosyntes som torv, ved, pellets och flis. Biobränslen är en förnybar exergiråvara. Omvandling av biomassa kan ske genom förbränning eller genom att utvinna gas via pyrolys, jäsning eller katalytisk reduktion. Förbränning av biobränslen medför väsentligt mindre miljöproblem än de fossila bränslena, särskild svaveldioxidutsläppen är låga. Eldning med biobränslen ger dessutom ingen nettotillförsel av koldioxid i atmosfären, om motsvarande mängd biomassa återplanteras. Emissionen av polyaromatiska kolväten och vissa metaller kan dock vara större än vid förbränning av olja, vilket innebär att biobränslen mycket väl kan innebära stora miljöproblem.

I Västerås kommun finns inget verk för biobränslen. Kommunen saknar också lönsamma torvtäckter. Ett mindre område i norra delen av kommunen har dock fått tillstånd till en kombinerad matjords- och torvtäck. Biobränslen utnyttjas inom kommunen av enskilda ägare av fastbränslepannor. Biobräns-

len som finns i kommunen och som skulle kunna användas är t ex skog, halm, jordbruksavfall och vass.

Varje svensk producerar årligen ca 325 kg sopor dvs totalt ca 2.6×10^6 ton. Det stora innehållet av papper och plast medför att avfallet har ett relativt högt exergivärde, 10-12 MJ/kg. Avfallet kan förbrännas efter sortering eller också kan man utvinna gas ur det, men bäst är naturligtvis materialåtervinning. Landets avfallsvärmeverk levererade år 1987 hetvatten med en sammanlagd energin av 3.4 TWh (12 PJ) främst till de kommunala fjärrvärmenäten. Utöver hushållens avfall tillkommer avfall från vissa industrier och småföretag. Vid förbränningen frigörs miljöfarliga ämnen som bly, kadmium och olika organiska föreningar till luften, vilket gör sopförbränning till den kanske värsta miljöförstöraren.

Västerås exporterar ca 46 725 ton avfall vilket motsvarar ca 98 GWh (350 PJ) under 1989. Västerås har ingen sopförbränningsanläggning, däremot utvinns lite gas vid Gryta soptipp, ca 17.2 GWh (62 PJ).

Olja, kol och gas är fossila bränslen, dvs lagrade resurser. Råoljan består i huvudsak av olika kolväten som vid förbränning omvandlas till bl a koldioxid och vattenånga och värme. Dessutom innehåller olja oönskade ämnen, främst svavel och tungmetallerna vanadin och nickel.

Västerås kommun importerar alla oljeprodukter, vilka behandlas utförligare nedan.

Kol består av stenkol och brunkol. Stenkol bildades ur de skogar som fanns under karbontiden för ca 400 milj. år sedan och brunkol under tertiärtiden för ca 70 milj. år sedan. Jordens koltillgångar är ändliga. Världens kolreserver är dock mångdubbelt större än reserverna av olja. Kol är ett mineral och dess beståndsdelar är rent kol, kolväten, askbildande mineral, svavel och vatten. Dessutom innehåller stenkol metaller, främst järn men även zink, koppar, nickel, vanadin, arsenik, bly och kvicksilver. Samtliga dessa frigörs vid förbränning. Koleldning ger också utsläpp av koldioxid och kväveoxider. Ytterligare en besvärande följd av kolförbränning är askan som utgör ca 10-15% av råvaran.

En stor del av Västerås kommuns exergiförsörjning utgörs av kol. Kraftvärmeverket köpte 245407 ton kol, vilket motsvarar exergin ca 1900 GWh (6800 GJ), mellan juni 88 - juli 89.

Gas är ett fossilt bränsle som består av olika kolväten, till största delen metan, och det förekommer ofta tillsammans med olja i sedimentär berggrund. Gasreserverna beräknas vara ungefär lika stora som oljereserverna. Gas är i Sverige ett relativt nytt bränsle. Transporten av gasen sker i allmänhet i rör. Utsläppen av luftföroreningar vid förbränning av gas är i allmänhet små i jämförelse med övriga fossila bränslen. Det är i första hand

utsläppen av koldioxid och kväve som är av betydelse ur miljösynpunkt. Därutöver sker utsläpp under transporten (läckage) och vid utvinningen, vilket är allvarligt då metan är en av de värsta växthusgaserna.

Västerås kommun är inte ansluten till stamnätet för gas, men eventuellt kommer kraftvärmeverket att anslutas. Kommunens gasolanvändning motsvarar ca 20 GWh (72 TJ), och därutöver omsatte Outokumpu copper 2279 ton eller ca 50 GWh (180 TJ) under 1989. Vid soptippen i Gryta utvanns, som jag tidigare nämnt, metangas och vid avloppsreningsverket rötas 7-8 GWh (25-30 TJ) metangas, vilket används till avloppsreningsverkets egen uppvärmning.

Uran är också en lagrad resurs och de kända urantillgångarna tar slut före år 2010, och de möjliga reserverna tar slut till år 2020. {WEC 1986} Förädlad uran används som bränsle i kärnkraftreaktorer. Vid normal drift släpps radioaktiva ämnen ut till luft och vatten trots okända långsiktiga miljöeffekter. Vid ett reaktorhaveri, som i Tjernobyl, kan det bli stora utsläpp av radioaktiva ämnen, vilka påverkar liv och livsbetingelser över stora avstånd, både i tid och rum. Ett problem, som uppstår vid varje reaktor, är det radioaktiva avfall som alstras vid driften och en helt säker slutförvaring är av naturliga skäl för alltid olöst.

Västerås kommun har inget kärnkraftverk, men en bränslefabrik (ABB). Stora kvantiteter uran, årligen mellan 300 och 330 ton förädlas till urandioxid. Anläggningen har tillstånd att producera 400 ton urandioxid och återvinna 15 ton uranhaltigt material. Till kommunens spillvattennät får årligen avledas högst 15 kg uran och till luft högst 3 kg. {Västerås kommun 1990} Under 1988 förädlades 303 ton uran, motsvarande ca 330 TWh eller 1200 PJ (exergi) som bränsle i lättvattenreaktorer. Sveriges totala energianvändning under samma år var omkring 450 TWh. Det bör dock noteras att den potentiella exergin är ca 20 000 TWh, dvs ca 40 gånger Sveriges totala energiomsättning, eftersom lättvattenreaktorer endast förmår utnyttja ca 1.5% av den tillgängliga exergin i uranet, se avsn. 3.13.

4.3.2 Primär omvandling

I Västerås finns kraftvärmeverk, hetvattencentraler, värmepumpar och vattenturbiner.

Kraftvärmeverk

Västerås stads kraftvärmeverk (KVV) är den största enskilda energiomvandlaren i kommunen, belägen vid djuphamnen. Huvudbränslet är kol som lossas direkt från båtarna. Anläggningen består av fyra block, block 1 och

2, togs i drift 1963. Genom ett samarbete med flera kraftföretag togs block 3 och 4 i drift 1969 och 1973. De olika företagen bildade konsortiet AB Aroskraft. Västerås Stads Kraftvärmeverk AB är ett helägt kommunalt aktiebolag som äger block 1 och 2. Dieselkraftvärmeverket i Skultuna samt värmedelen i block 3 och 4 ägs av Aroskraft AB, som till 17.5% ägs av Västerås kommun, vilka också äger eldelen i block 3 och 4.

Kraftvärmeverkets totala kapacitet är ca 550 MW el och ca 900 MW energi eller 180 MW exergi som fjärrvärme, i fig. 3.11 illustreras energi- och exergiflödet för ett kraftvärmeverk. Block 1, 2 och 4 kan eldas med såväl kol som olja, medan block 3 eldas enbart med olja, se tab. 4.1. {Östlund 1991} Kraftvärmeverket rymmer också en, icke trycksatt, ackumulatör för varmvatten, vilken har en volym på 25000 m³. Vid fulladdning är vattentemperaturen 98°C i tanken och laddas ur till ca 55-60°C, vilket motsvarar energin ca 1.17 MWh (4.21 GJ) och exergin 0.25 MWh (0.9 GJ) vid omgivningstemperaturen 0°C. Ackumulatören kan under vår och höst användas för dygnsreglering av mottrycksöverskott. Under vinterhalvåret används den som värmereserv och för utjämning av tillfälliga belastningsvariationer. Tillgänglig laddningskapacitet hos ackumulatören kan under kortare tid utnyttjas vid toppkraftkörning av mottryckskraft. Vidare finns inom anläggningen en oljeeldad hetvattencentral (HVK) på 75 MW (energi) inkopplad på fjärrvärmenätet. En ångpanna inom anläggningen förser också ett par industrier med processånga.

Tabell 4.1. Energidata för kraftvärmeverket i Västerås [MW].

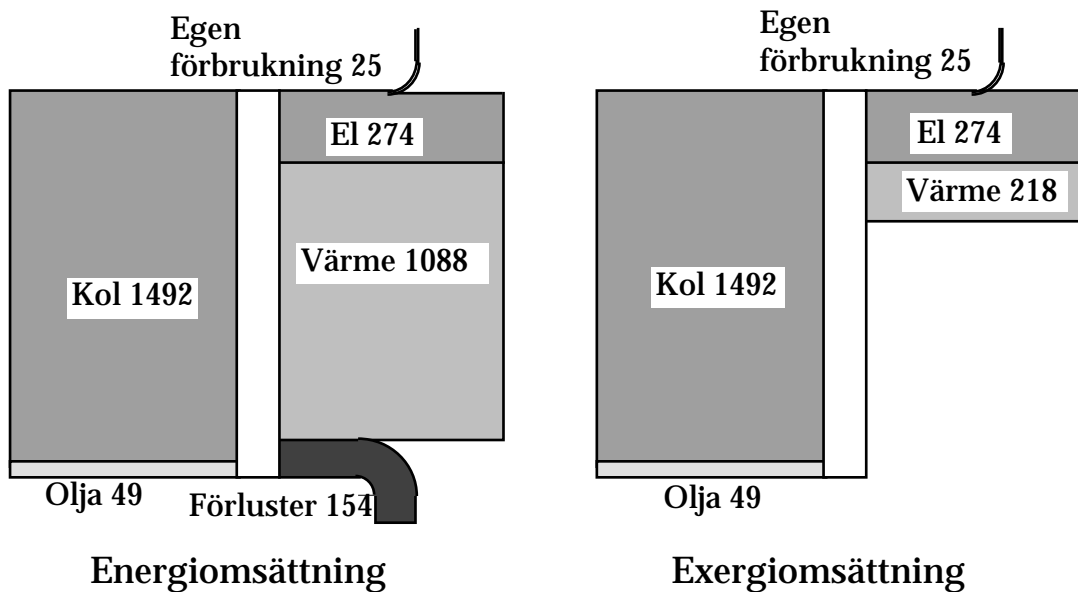
Block			1	2	3	4
Huvudbränsle			kol	kol	olja	kol
i mottrycksdrift med olja	till	värme	100	100	365	365
	till	el	40	40	220	220
i mottrycksdrift med kol	till	värme	92	92	-	250
	till	el	37	37	-	140
Effekt i kondensdrift	med	olja	40	40	254	234
	med	kol	37	37	-	165
enbart värmeomvandling	med	olja	100	100	360	380
	med	kol	100	100	-	350

Tabell 4.2. Exergidata för kraftvärmeverket i Västerås [MW].

Block			1	2	3	4
Huvudbränsle			kol	kol	olja	kol
i mottrycksdrift med olja	till	värme	20	20	73	73
	till	el	40	40	220	220
i mottrycksdrift med kol	till	värme	18	18	-	50
	till	el	37	37	-	140
Effekt i kondensdrift	med	olja	40	40	254	234
	med	kol	37	37	-	165
enbart värmeomvandling	med	olja	20	20	72	76
	med	kol	20	20	-	70

Exergidata för kraftvärmeverket, se tab. 4.2, ger som vi ser en helt annan bild av produktionens effektivitet.

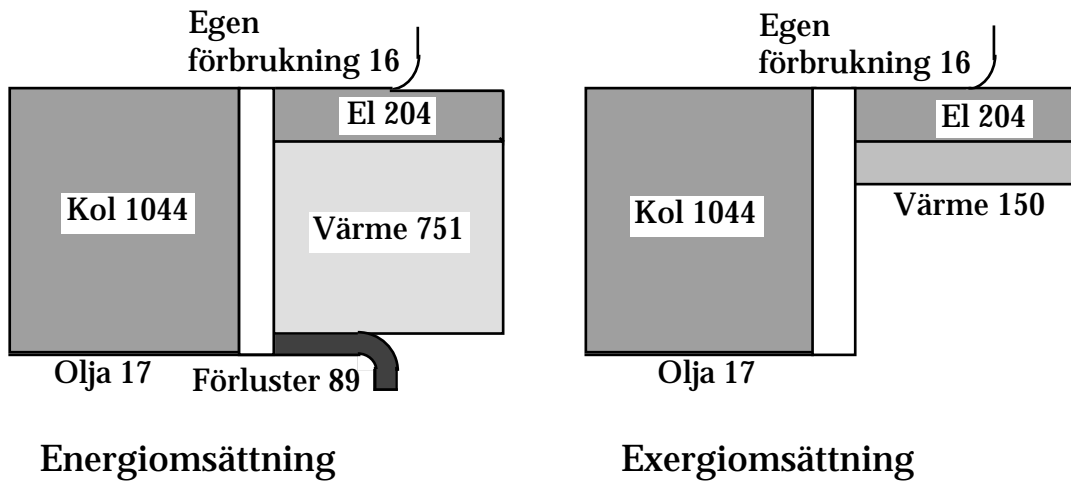
Om man summerar de olika inkommande energislagen och de mängder som förvandlas till el och värme ser driftärets energi- och exergiflöden för de fyra kraftvärmeblocken ut som nedan, fig. 4.3. {Soisalo 1992} Exergifaktorn för el är 1, för kol och olja har den antagits till 1 och för värme 0.2 när inkommande fjärrvärme är 55°C, utgående fjärrvärme är 95°C och omgivningstemperaturen är 0°C, se app. H.2. Den sammanlagda verkningsgraden för driftåret 89/90 blir 90% (energi) respektive 34% (exergi).



Figur 4.3 Energi- och exergisättningen i block 1-4 i kraftvärmeverket 1989/90.

Block 4 är ett flexibelt kraftvärmeverk, som snabbt kan ställas om efter olika el- och värmebehov. Anläggningen har fem olika driftfall; ren värmedrift, ren kondensdrift, kombinerad värme- och kallkondensdrift, kombinerad värme- och direktvärmedrift samt direktvärmedrift. Kol är det dominerande bränslet i block 4. Från tab. 4.1 och 4.2 ser vi att vid kondensdrift kan 180 MW el produceras vid koleldning och 250 MW el vid oljeeldning. Vid kombinerad drift kan energimässigt 140/250 MW (el/värme) produceras vid koleldning och 220/365 vid oljeeldning, exergimässigt blir det istället 140/50 respektive 220/73 MW. Ångan från pannan kan även kopplas förbi turbinprocessen så att enbart värme levereras, 380/76 MW (energi-/exergieffekt) med oljeeldning och 350/70 MW vid koleldning. Block 4 är det största blocket i KVV, driftåret 89/90 var elproduktion 220 GWh (790 TJ), ca 73% av KVV:s elproduktion, värmeproduktionen var 751 GWh (2700 TJ) energi, ca 48% av den totala värmeproduktion. Ett schematiskt energi- och exergiflöde för block

4 driftåret 89/90 återfinns i fig. 4.4 nedan. Med samma exergifaktorer som ovan fås den totala energiverkningsgraden 92% och exergiverkningsgraden 35% för driftåret 89/90.

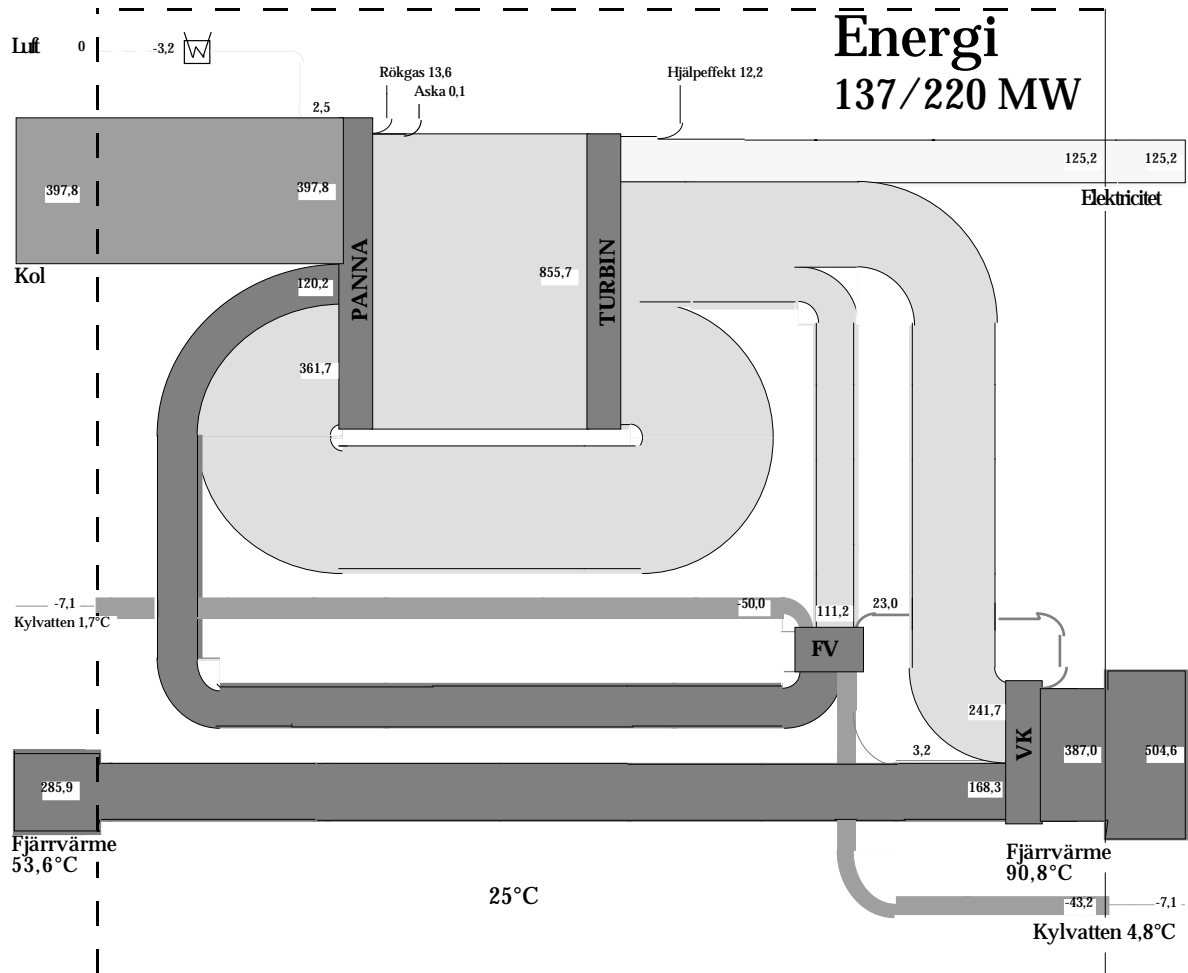


Figur 4.4 Energi- och exergiomsättningen i block 4 i kraftvärmeverket 1989/90.

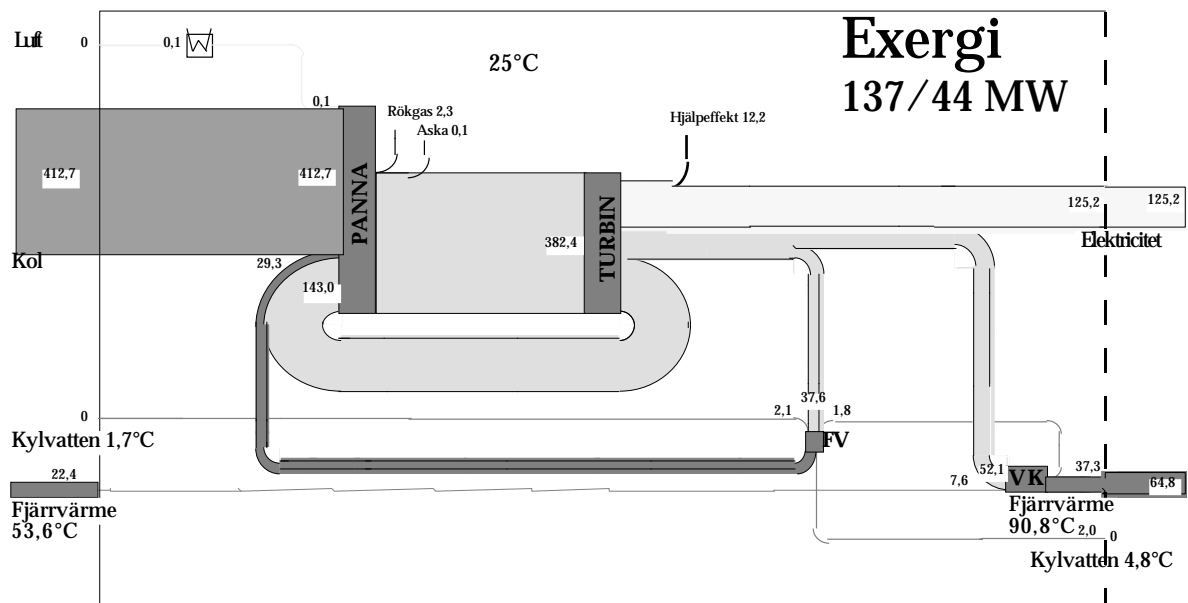
I kvarteret Sigurd vid järnvägsstationen finns ett litet kraftvärmeverk på 3 MW el och 8 MW värme (energieffekt) för olja, Eo5. Verket är kopplat till fjärrvärmenätet och ABB köper elen.

Skultuna har ett eget fjärrvärmenät och en hetvattencentral som får sin försörjning från Skultuna kraftvärmeverk (DKVS). Kraftvärmeverket är byggt för dieseldrift, men drivs i dag med olja, Eo5. Energieffekterna är 12 MW el och 12 MW värme.

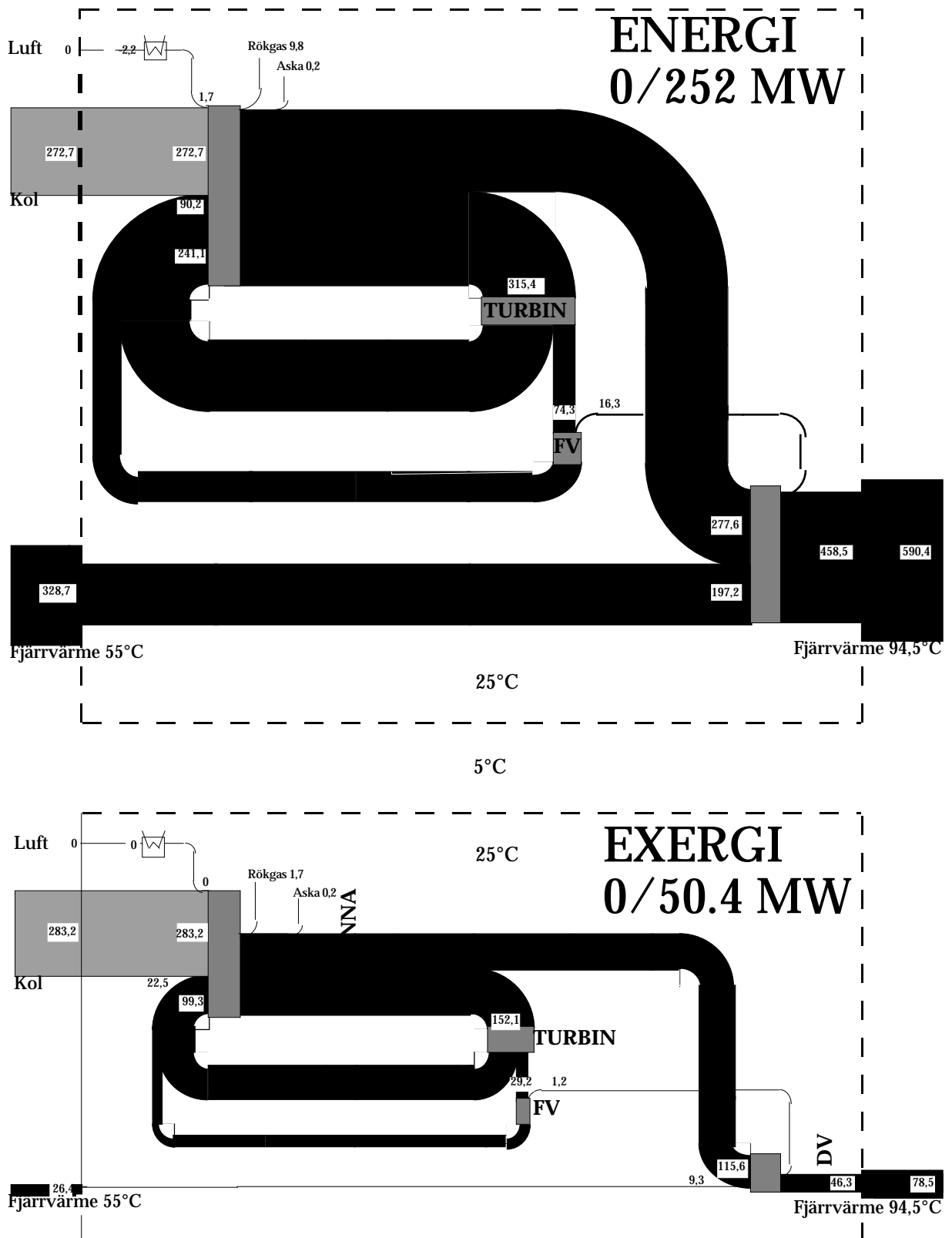
För att ytterligare visa betydelsen av exergibegreppet presenteras nedan energi- och exergiomsättningar för tre olika driftfall från årsskiftet 83/84 med kol som bränsle. {Mobara 1991} Drifttillstånden är två mottrycksfall, fig. 4.5 fullast 172/280/56 MW (el/värme energi/värme exergi), fig. 4.6 137/220/44 MW och ett med enbart värme fig. 4.7 0/252/50.4 MW. Enligt uppgift var den termiska (energi)verkningsgraden 0.93, 0.92 respektive 0.95. Referenstemperatur i beräkningarna är 5°C ute och 25°C inne. Alla siffror i fig. 4.5 - 4.7 är MW om inte annat anges. Energiverkningsgraden för värmeväxlarna har för enkelhets skull satts till 1, och vissa värden har uppskattats från energibalanser pga felaktiga data. Temperaturen för fjärrvärmen antas till 55°C respektive 94.5°C. Alla beräkningar finns tillgängliga på disketten och i app. F redovisas driftfallen ytterligare.



5°C



Figur 4.6 Energi- och exergiomsättningen i block 4 vid 137/220 MW (energi).



Figur 4.7 Energi- och exergisättningen i block 4 vid 0/252 MW (energi).

Som vi ser är skillnaden mellan energi- och exergiomsättningen betydande i all tre fallen. Framförallt framstår den rena värmeproduktionen som mycket ineffektiv, se fig. 4.7. Den streckade rutan anger gränsen för omgivningstemperaturen 25 eller 5°C, vilken påverkar både energin och exergin. Ju kallare omgivning desto högre värden, eftersom kontrasten ökar. Luften till pannan som tas utifrån har varken energi eller exergi. När luften passerar systemgränsen för omgivningstemperaturen 25 eller 5°C blir energivärdet negativt eftersom temperaturen på luften är lägre än referenstemperaturen i systemet, exergin är däremot aldrig negativ. Luften passerar en värmeväxlare innan den leds till pannan och temperaturen blir högre än referenstemperaturen och luften får ett positivt energivärde.

Hetvattentraler

En oljeeldad hetvattentral (HVK) med energieffekten är 75 MW, är direkt ansluten till Västerås stads kraftvärmeverk och fjärrvärmenätet. Då anläggningen nästan uteslutande används för bostadsvärme blir den totala exergieffektiviteten endast ca 4.5%, se fig. 3.11 och 3.29.

Vid östra hamnen i kvarteret Gasugnen ligger hetvattentralen (HVG), där finns två elpannor på vardera 35 MW samt två oljepannor på vardera 140 MW energieffekt. Centralen är kopplad till fjärrvärmenätet och el inköps från någon av KVV:s distributörer.

I kvarteret Apteraren finns en hetvattentral (APT), ursprungligen byggd för att försörja bostadsområdet Malmaberg. De äldsta delarna av centralen togs i drift 1956 och har byggts ut i olika etapper. Centralen ligger nu i malpåse, men kan tas i drift och kopplas in på fjärrvärmenätet vid ett krisläge.

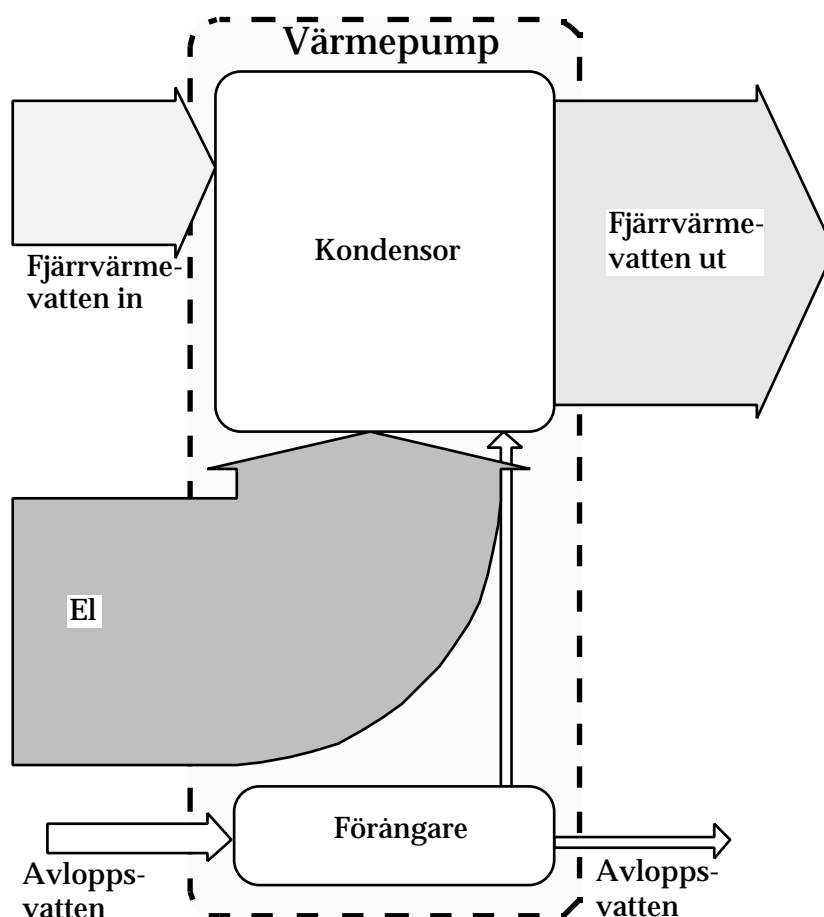
I tätorten Skultuna finns en hetvattentral (HVS) för el och olja (Eo5). De tre elpannorna på tillsammans 30 MW får el huvudsakligen från kraftvärmeverket i Västerås. Tillberga tätort har en hetvattentral om 1 MW (el) till vilket en del av ortens bebyggelse är ansluten.

På Gryta avfallsstation utvinns metangas vid sophantering. Gasen bränns i en gaspanna vid soptippen och värmen levereras till fjärrvärmenätet. Den utvunna energin uppskattas till ca 20 GWh (72 TJ) per år.

Värmepump, VP

I kvarteret Gasugnen finns tätortens avloppsreningsverk där en värmepump är installerad, energieffekt 12 MW värme, se fig. 3.11. Verket tar även hand om utvunnen metangas ur rötningsprocessen som eldas i en panna för intern uppvärmning och för leverans till fjärrvärmenätet. Värmepumpen utvinnet värme ur avloppsvattnet och med hjälp av elektricitet "pumpas" värmets till en högre temperaturnivå, vilken utnyttjas i fjärrvärmenätet.

Cirka 50 000 m³ vatten passerar dagligen avloppsreningsverket och temperaturen varierar mellan 7 och 20°C. Den utvunna energin är ca 51 GWh per år varav ca 15 är tillförd el. I fig. 4.8 nedan återfinns en schematisk skiss av anläggningen, vilken innebär en betydande besparing jämfört med att istället använda el i elradiatorer för uppvärmning, vilket då skulle kräva ca 50 GWh el istället för de ca 15 GWh som nu åtgår i värmepumpen och övrig pumpkraft. Värmepumpen är således ett bra exempel på en exergieffektiv teknik.



Figur 4.8 Schematisk skiss över värmepumpen i avloppsreningsverket.

Vattenkraft

Vattenkraftens utvinningsförmåga ett visst år bestäms av nederbörden. I extremfallet skulle dagens vattenkraftssystem i Sverige kunna omvandla upp till 75 TWh. Vattenkraften svarar idag normalt för ca 50% av elförsörjningen. Totalt finns i Sverige ca 1000 vattenkraftverk över 1 MW.

Ur Svartån och Sagån utvinns, som vi tidigare sett, ca 4 GWh (14 TJ) per år av maximalt tillgängligt ca 16 (60). I Svartån utnyttjas endast fallsträckorna i Skultuna och Haraker, som inte ägs av Västerås kommun och utnyttjas enbart för en såg. De ekonomiska förutsättningarna för att bygga ut vattenkraften i Svartån har på senare tid blivit betydligt mer gynnsamma, pga att

man har konstruerat nya typer av miniaggregat som är mera lämpade för en utbyggnad av småskaliga vattenkraftverk. Vid Turbinbron, Västerås kvarn, Forsby, Svanå nedre och Svanå övre gäller att man till en investeringskostnad motsvarande drygt 3 kr per år och kWh skulle kunna utvinna energimängder i storleksordningen 0.7-1.0 GWh, vilket skulle ge ca 4 GWh per år. I Skultuna kommer man att höja energiutvinningen från 3 GWh till 5 GWh, vilket ger totalt ca 9-10 GWh ur Svartån. {Lundström 1985}

4.3.3 Sekundära exergibärare

Elektricitet

Tekniska verken svarar för ca 70% av elleveranserna och ca 80% av elanvändningen sker av ca 17% av abonnenter med en förbrukning över 8000 kWh/år, se tab. 4.3 och 4.4. Vattenfall distribuerar el till landsbygden. Outokumpu copper, Gränges Skultuna och ABB får sina elleveranser på 130 kV ledningar. ABB-koncernens 23 bolag utgör en betydande del av Västerås kommuns elbalans, varav ca 60% åtgår i produktionen och resten går till fastigheter. Outokumpu copper förbrukar el, se fig. 4.9, och gasol, och fjärrvärme i bl a smältverk och ugnar för kopparförädling.

Tabell 4.3. Elanvändning i Västerås kommun

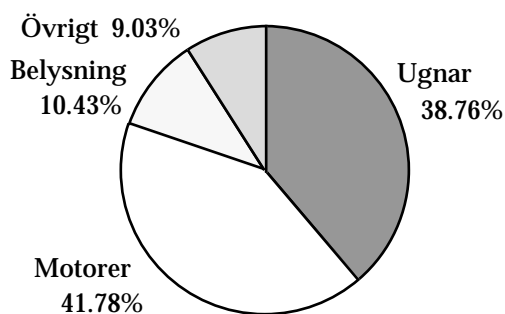
Användare	GWh	Abonnenter
Kraftindustrin	433	
Tekniska verkets abonnenter	692	58432
Vattenfalls abonnenter	72	5558
ABB	157	
Outokumpu copper	67	
Gränges Skultuna	33	
Export	168	
Förluster	42	
Totalt	1664	63990

Tabell 4.4. Antagna medelvärden för hushållens elanvändning, kWh/år. {Energifakta 1989}

	Villor/Radhus	Lägenheter
Belysning	1000	500
Kyl/frys/spis	2000	1000
Tvätt	1000	500
Medelanvändning	5591	2033

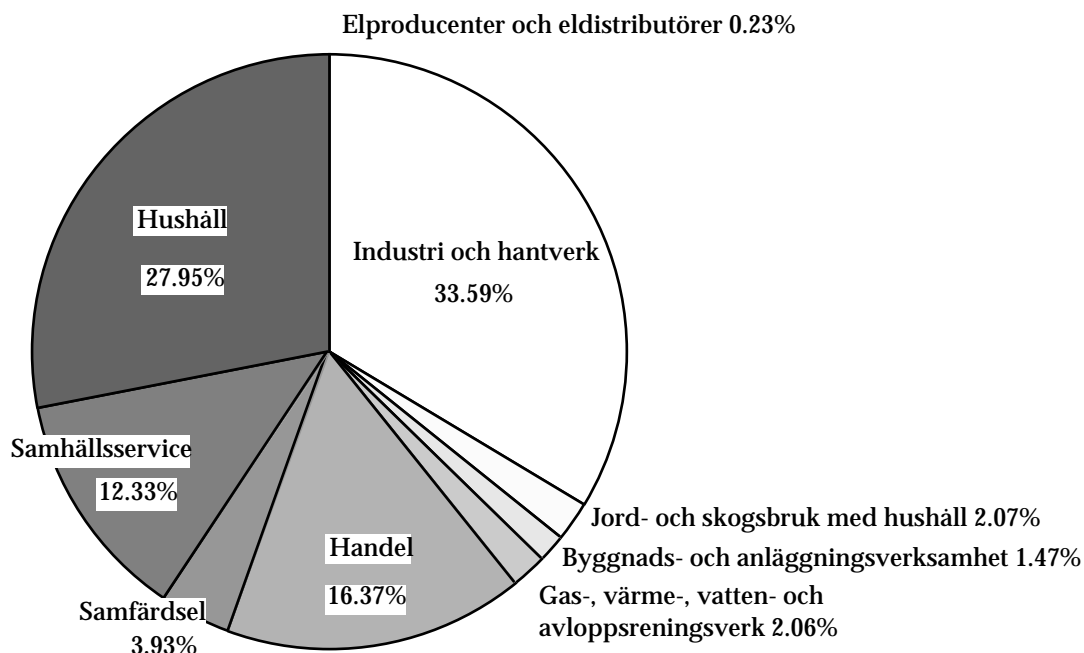
Då förbrukningen för ventilation, tvättstugor, etc saknas för lägenheter är skillnaden inte så stor som tabellen antyder. För abonnenter med elvärme har ovanstående medelvärden dragits bort så att en uppskattad elvärmeanvändning redovisas. För övrig belysning har medelvärdet 25 kWh/m² antagits de aktuella ytorna ca 5×10⁶ m². {Lundström 1991} Av industrins

elanvändning uppskattas ca 50% gå till motorer och 20% till transportenergi.
{Bogren 1981}



Figur 4.9 Elanvändningen vid Outokumpu copper 1989, totalt 67 GWh (240 TJ).

Diagrammet i fig. 4.10 nedan visar hela kommunens elanvändning uppdelad på olika kategorier, vi urskiljer lätt industrin, hushållen och handeln.



Figur 4.10 Elförbrukning uppdelad på olika kategorier

Petroleumprodukter

Västerås importerar alla petroleumprodukter via fartyg, tåg eller lastbil. Oljebolagen (utom OK) har inte varit villiga att ge uppgifter, vilket medfört osäkra siffror för omsättningen. Tabell 4.5 nedan visar leveranserna. {SCB 1990} Då dessa verkar vara för höga har petroleumprodukternas förbrukare inom kommunen uppskattats i tab. 4.6. {Östlund 1991} Västerås hamn betyder mycket som lagringsplats för petroleumprodukter, se tab. 4.7, som visar hamnens omsättning av petroleumprodukter.

Tabell 4.5 Petroleumprodukter till slutanvändare 1989. {Statistiska meddelande 1989}

Kategori	m ³	GWh
Bensin	79500	693
Dieselloolja	49200	490
Eo1	67800	678
Eo2-Eo5	900	10
Summa	197400	1871

Utifrån antagandena enligt tab. 4.6 har den slutliga förbrukningen 1989 beräknats till 1152 GWh (4147 TJ). Hamnens omsättning var 5285 GWh (19026 TJ) och skillnaden 4133 GWh (14879 TJ) distribueras således till närliggande kommuner eller lagras.

Tabell 4.16 Petroleumanvändare i Västerås kommun 1989 [GWh].

Kategori	Bensin	Diesel	Eo1	Eo2-Eo5
Transporter	656	195		
Hushåll			171	
Industri			19	4
Energisektorn:				
Uppvärmning				39
Elektricitet				68
Summa	656	195	190	111

Tabell 4.7 Hamnens omsättning av petroleumprodukter 1989. {Hamnen 1989}

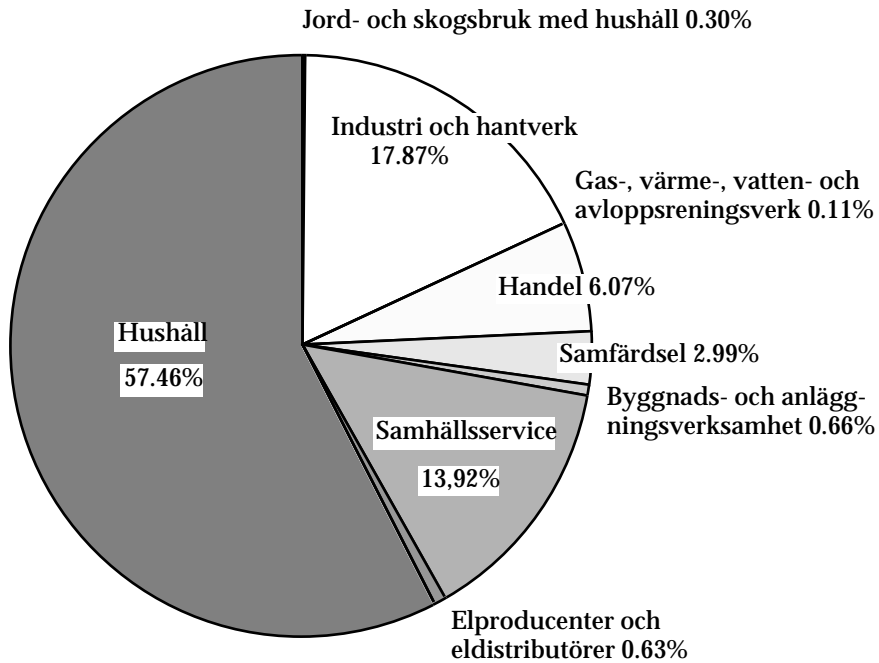
Kategori	Lastat	Lossat	Netto [m ³]	Netto [GWh]
Bensin	0		314799	314799
Fotogen	16713		16166	-547
Olja	13923		269484	255561
Summa	91951		600449	569813

Fjärrvärme

Värme för uppvärmning och tappvarmvatten distribueras via fjärrvärme vid 80 till 120°C till abonnentcentraler där värmets via värmeväxlare överförs till varmvatten vid 50 till 60°C. Det avkylda fjärrvärmets returneras sedan. Den sammanlagda nätlängden uppgår till 440 km i Västerås kommun.

Diagrammet i fig. 4.11 nedan visar den totala fjärrvärmeanvändningen i Västerås kommun (även abonnenter utanför tätorten). Vi noterar att hushållen är den största användaren. Den energi i form av värme (varmt vatten) som skickades ut från kraftvärmeverket i Västerås och hetvattencentralen i Skultuna samt de 8 mindre anläggningarna var ca 1652 GWh (5947 TJ) energi. Exergin i fjärrvärmens, kan antas till 20% av energin, dvs exergifaktorn 0,2, vilket ger exergin 330 GWh (1189 TJ). Den använda energin var ca 1445 GWh (5202 TJ), dvs en ledningsförlust på 206 GWh (746 TJ) energi till omgivningen. Exergianvändningen är istället ca 72 GWh (260 TJ), om vi antar att värmen används för rumsvärme och varmvatten, vilket ger en förlust på 258 GWh (929 TJ). Observera alltså att den största förlusten i exergifallet nu sker

vid produktionen av fjärrvärme, se fig. 3.27, då fjärrvärmen produceras genom kraftvärme. I de fall fjärrvärmen produceras genom omvandling av inköpt el till värme, blir exergiutbytet endast 2%, om elen härrör från bränslen som olja eller uran, se fig. 3.25.



Figur 4.11 Fjärrvärmeanvändning uppdelat på kategori

4.3.4 Slut användning

Transporter

Flyg och båttrafik ingår ej i transportsektorn i tab. 4.8 nedan däremot ingår el för vägbelysning, SJs lok och lokaler, totalt 891 GWh (3210 TJ). Utbytet i form av uträttat transportarbete kan uppskattas till ca 0.6% av den tillförda exergin eller energin för bensin och dieselfordon, se fig. 4.17 nedan, vilket ger nettoutbytet ca 5.1 GWh (19 TJ) för dessa. Om vi för elen antar utbytet 1% blir det total utbytet ca 6 GWh eller ca 20 TJ.

Tabell 4.8 Transportsektorns energi- och exergianvändning¹ i Västerås kommun 1989.

Kategori	Antal	m ³	GWh
<i>Personbilar</i>			
Bensin	47114	63619	554.8
Diesel	960	1553	15.5
<i>Lastbilar</i>			
Bensin	2558	8128	70.9
Diesel	1398	13789	137.3
<i>Bussar</i>			
Bensin	11	72	0.6
Diesel	244	3468	34.5
<i>Motorcyklar</i>			
Bensin	386	115	1.0
<i>Traktorer</i>			
Bensin	1652	3304	28.8
Diesel	135	203	2.0
<i>SJ (Lok)</i>			
Diesel		521	5.2
Totalt			
Bensin		75238	656
Diesel		19533	195
El			40

1 Med hänsyn till att exergifaktorn för de aktuella energiformerna är ungefär 1 kan exergin och energin sättas lika.

Industri

De mest exergiomsättande industrierna är ABB och Outokumpu copper. För övrigt finns det ca 400 olika industri- och hantverksföretag i kommunen. Olja används i huvudsak till drift av processer och uppvärmning av lokaler. Gas används i huvudsak till smältugnar på Outokumpu copper. Tabell 4.9 visar industrins energi- och exergianvändning. (För enkelhets skull antar vi exergifaktorn 1 för alla energiformer utom fjärrvärme, där exergifaktorn sätts till 0.2.)

Tabell 4.9 Industrisektorns energi-, exergianvändning och uppskattat exergibehov i Västerås 1989 [GWh]

	Användning		Uppskattat exergibehov
	energi	exergi	
Värme	258	52	13
El ¹	343	343	180
Gas ²	70	70	28
Eo2-Eo5 ³	4	4	0
Eol ³	19	19	1
Totalt	694	488	222

1 50% antas till uppvärmning, dvs exergifaktorn 0.05.

2 100% antas till uppvärmning med exergifaktorn 0.4.

3 100% antas till uppvärmning, dvs exergifaktorn 0.05.

Hushåll och övriga

Här ingår all hittills icke redovisad energi och exergi till slutanvändarna, se tab. 4.10. (För enkelhets skull antar vi exergifaktorn 1 för alla energiformer utom fjärrvärme, där exergifaktorn sätts till 0.2.) Oljan används i oljepannor till uppvärmning. I avsn. 4.2.4 redovisades hur elen används av övrigsektorn. Enligt folk och bostadsräkningen 1985 fanns det 1980, 251 fastbränslepannor och ca 1400 kombinationspannor, dvs ved och el eller olja. Om man antar att ett medelstort hus omsätter 25 000 kWh per år, samt att en kombinationspanna eldas med ved till ca 20% av uppvärmningsbehovet med en energiverkningsgrad på 50%, då blir vedförbrukningen ca 27 GWh/år eller ca 0.1 PJ/år, jfr avsn. 4.2 ovan. Om veden innehåller 2 MWh/m³ så blir den totala volymen ved ca 13.5 Mm³ skogsbränsle.

Tabell 4.10 Hushåll och övrigas energi-, exergianvändning och uppskattat exergibehov i Västerås kommun 1989 [GWh].

	Användning		Uppskattat exergibehov
	energi	exergi	
Värme ¹	1187	237	59
El ²	639	639	62
Eol ³	171	171	8
Biobränslen ³	27	27	1
Totalt	2024	1074	130

1 100% antas till uppvärmning, dvs exergifaktorn 0.2 respektive 0.05.

2 200 GWh antas ha en exergifaktor antas till 0.2 resten med faktorn 0.05.

3 100% antas till uppvärmning, dvs exergifaktorn 0.05.

4.3.5 Sammanställning av energisystemet

I fig. 4.12 presenteras energiomsättningen i Västerås kommun 1989. Energibärare, importerade eller i kommunen utvunna, går som flöden genom kommunens försörjningssystem till användaren. Konsumenten omvandlar energin — förbrukar exergin — till en icke användbar form som lämnar jorden som värmestrålning, se fig. 3.2 och 3.10.

Västerås kommun importerar nästan all sin energi, se tab. 4.11, där kol dominerar (1820 GWh/6552 TJ). Värme transporteras i fjärrvärmenätet till slutliga användaren, över 10% av energin i värmen går förlorad i ledningarna dessutom förekommer stora förluster vid omvandlingen. Den andra stora importen är el. Man har möjlighet att inom kommunen producera el men elpriset var under året så förmånligt att man istället omvandlat el till värme. Petroleumprodukter är den tredje stora importvaran, vilka till största delen används i transportsektorn, med enormt stora energiförluster pga dålig effektivitet.

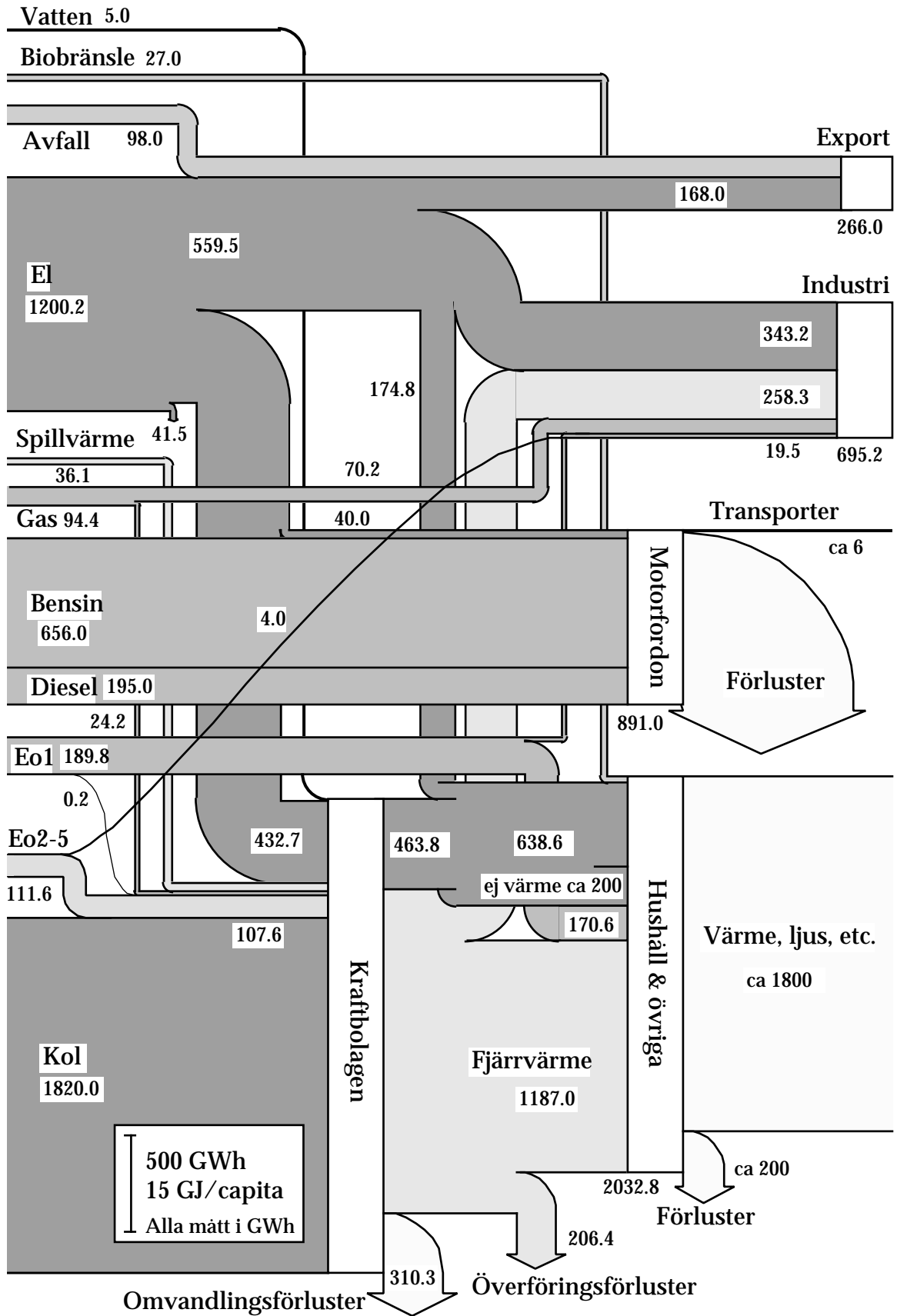
Stora energimängder i form av uran går genom Västerås, där ABB-Atom förädlar uranet. Detta flöde motsvarar energin 333 TWh, vilket är lika mycket som tre fjärdedelar av hela landets totala energianvändning. Flödet är inte medtaget i schemat på nästa sida av praktiska skäl (ca 10 m i den aktuella skalan).

Den största energianvändaren i kommunen är hushåll och övriga, denna kategori står för nästan hälften av hela kommunens slutliga energiomsättning. För övrigt är industri och transporter ungefär lika stora. Energiförlusterna i fig. 4.12 framstår som rätt beskedliga, om vi bortser från transporterna.

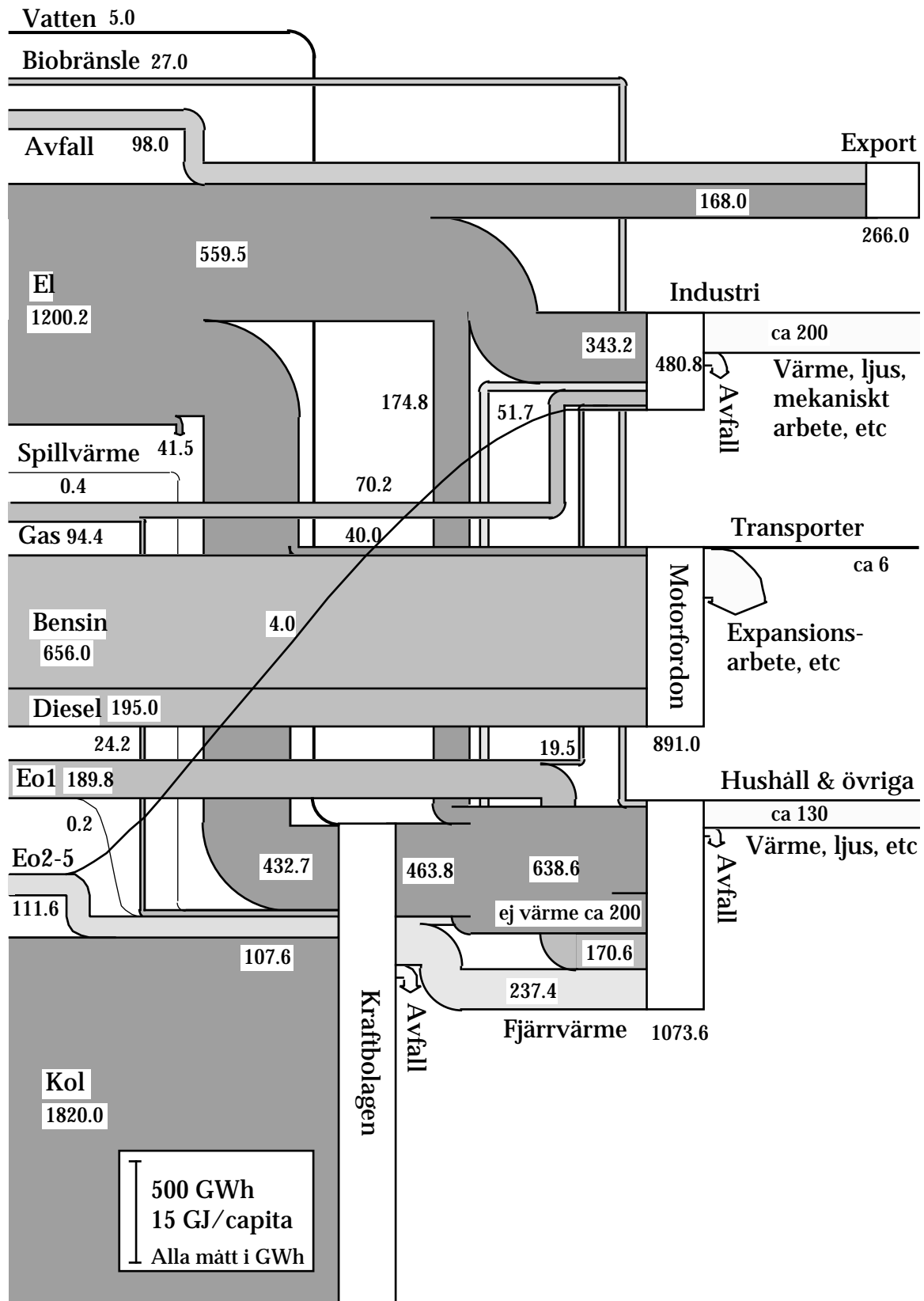
Tabell 4.11 Energiomsättning i Västerås 1989

	GWh	PJ	GJ/capita
Tillförsel	4433	15.96	134.8
Import	4243	15.27	129.0
Egna resurser	190	0.69	5.8
Användning	3875	13.95	117.8
Hushåll och Övriga	2023	7.28	61.5
Industri	695	2.50	21.1
Transporter	891	3.21	27.1
Export	266	0.96	8.1
Förluster	558	2.01	17.0

Låt oss nu göra en analog sammanställning över exergiomsättningen i energisystemet, se tab. 4.12. Det är då också viktigt att särskilja den mottagna exergin hos slutanvändarna, dvs den distribuerade exergin, från den egentliga användningen, framför allt för fjärrvärmens. Exergiutbytet, dvs förhållandet mellan använd 624 GWh (2.24 PJ) och tillförd exergi 4433 GWh (15.96 PJ) blir endast 14%, om vi bortser från exporten blir den ynka 9%, och 1722 GWh eller ca 39% förloras i primärledet och 2088 GWh eller 47% av tillförd exergi förloras hos användaren. Enorma resurser kan alltså sparas genom en effektivare omvandling mellan tillförselsystemet och användaren. Exergidiagrammet i fig. 4.13 ger en ännu tydligare bild av exergislöseriet i kommunen.



Figur 4.12 Västerås energiomsättningen 1989 i energienheter.
 Total omsättning 4433 GWh 16.0 PJ eller 134.8 GJ/person. Nettoutbyte ca 2800 GWh 10PJ
 eller 84 GJ/person.



Figur 4.13 Västerås energiomsättningen 1989 i exergienheter.

Total omsättning 4433 GWh 16.0 PJ eller 134.8 GJ/person. Nettoutbytte ca 600 GWh 2PJ eller 18GJ/person.

Tabell 4.12. Exergiomsättning i Västerås 1989

	GWh	PJ	GJ/capita
<u>Tillförsel</u>	<u>4433</u>	<u>15.96</u>	<u>134.8</u>
Import	4243	15.27	129.0
Egna resurser	190	0.69	5.8
<u>Distribuerad</u>	<u>2711</u>	<u>9.76</u>	<u>82.4</u>
Hushåll och Övriga	1074	3.87	32.7
Industri	480	1.73	14.6
Transporter	891	3.21	27.1
Export	266	0.96	8.1
Primära förluster	1722	6.20	52.4
<u>Användning</u>	<u>624</u>	<u>2.24</u>	<u>19.0</u>
Hushåll och Övriga	130	0.47	4.0
Industri	222	0.80	6.8
Transporter	6	0.02	0.2
Export	266	0.96	8.1
Sekundära förluster	2088	7.52	63.5
Totala förluster	3810	13.71	115.8

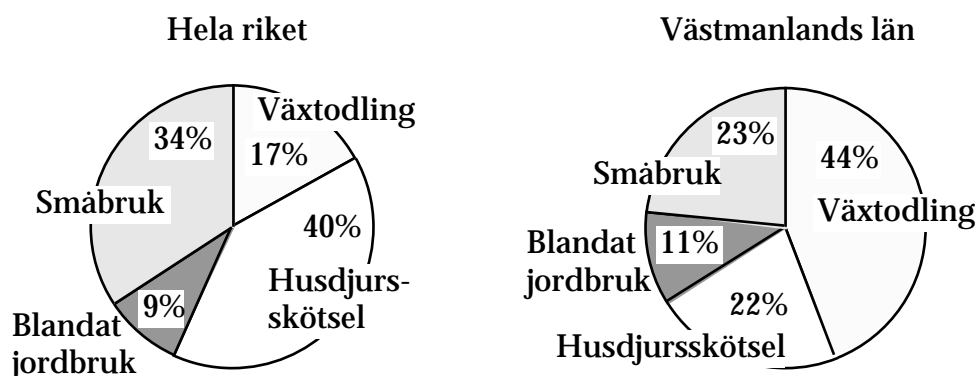
4.4 Skogs- och jordbruk

Västerås kommuns produktiva skogsmark omfattar ca 410 km² vilket motsvarar knappt hälften av kommunens totala landareal. Sett till riket och länet i övrigt är andelen privatskog och allmän skog mycket stor i kommunen. Den stora andelen privatskog innebär sannolikt att det finns ett mer varierande skogsbruk i kommunen än i länet i övrigt.

Virkesvolymen är fördelad på 87% barrträd och 13% lövträd. Knappt 1% utgörs av ädelskog. Det totala virkesförrådet inom kommunen uppgår till ca 5.2 Mm³ sk (skogskubikmeter = virkesvolym mätt på skog på rot) eller ca 42 PJ[†] (11.7 TWh) och årligen avverkas ca 0.1 Mm³ sk eller ca 810 TJ (225 GWh). Några större industrier för förädling av skogsråvaror finns inte i kommunen och därför förädlas det mesta av skogsuttaget i andra kommuner. Av den avverkade skogen går 55% till massaved och 45% till virke.

Som jag nämnde i avsnitt 3.12 har stora förändringar skett inom jordbruket sedan andra världskriget, bl a en utpräglad specialisering. Figur 4.14 nedan visar hur specialiseringen fördelar sig i hela riket och i Västmanlands län.

[†] 1 m³ sk = 450 kg/m³ sk med 18 MJ/kg fäs alltså 8.1 GJ/m³ sk {Wall 1986 a}



Figur 4.14. Andelen företag efter driftsinriktning 1988 (SCB, 1989).

Av fig. 4.14 framgår att antalet företag med husdjurskötsel dominerar i riket medan växtodlingsföretag dominerar i Västmanlands län.

Jordbruksarealen 1989 i Västerås kommun var ca 30 522 ha, varav 57% för stråsäd, 7.1% oljeväxter, 10.2% vall, 2.5% övrigt och 23.2% i träda eller obrukat. {Wirell 1992} Odlingsmarken i Västerås består till 95% av leror, därav styva leror 20%, mellanleror 70% och lättleror 10%. Sand och mulljordar utgör tillsammans 5%. {Miljön i Västerås 1990}

Trenden inom det svenska jordbruket under senare delen av 1900-talet har varit minskad areal och ökad produktivitet. Så är även fallet i Västerås kommun vars jordbruksmark 1988 uppgick till 32 266 ha, jämför ovan. Minskningen utgörs av nedläggning och beskogning av marginell åkermark utanför de stora jordbruksbygderna.

Ökad produktivitet har åstadkommit genom växtförädling, ökad gödsling och användning av bekämpningsmedel. I det svenska jordbruket används idag ca 5 600 ton bekämpningsmedel. Jordbruket svarar för ca 36% av användningen för riket, industrin 61% och hushållen 3%. I Västerås kommun används ca 70 ton ogräs-, insekts och svamppreparat. {Miljön i Västerås 1990}

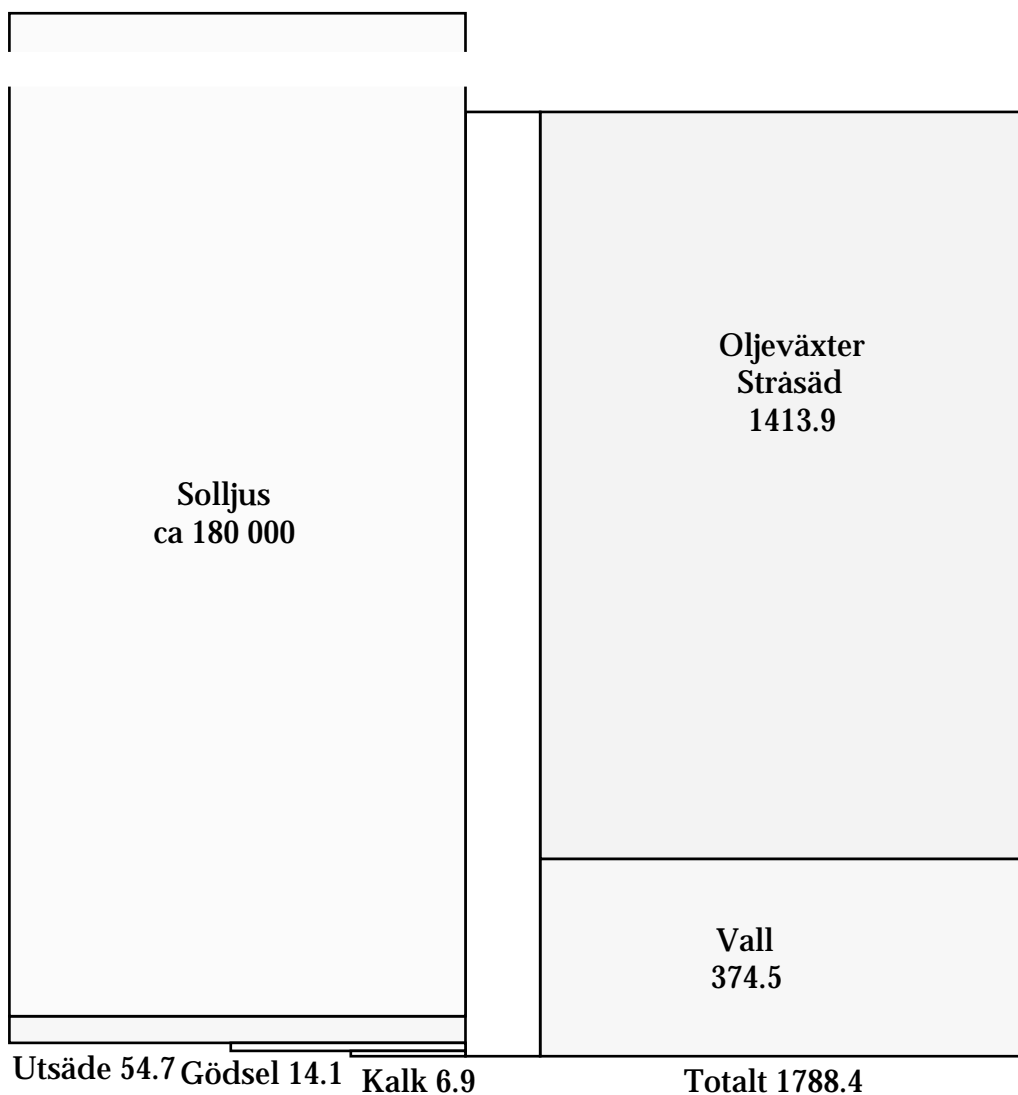
Inom åkermark utgör de försurande nedfallen 10-20% av markens syrabelastning. Åkermarken kräver en viss kalkning för att optimala brukningsförhållanden skall erhållas. På åkermark i Västerås kommun sker kalkning av åkermarken regelbundet med givor av i genomsnitt 150 kg CaO per ha och år, vilket ger ca 3 500 ton CaO. {Miljön i Västerås 1990}

Ungefärliga årliga insatser av material till åkermarken är: handelsgödsel 3 800 ton, stallgödsel 107 000 m³, utsäde och fröer 3 600 ton {Soisalo 1992}, kalk 3 500 ton och 70 ton bekämpningsmedel. Normalskörden är ca 84 000 ton stråsäd, 25 000 ton vall, 4 200 ton oljeväxter och 32 000 ton övrigt.

Exergivärdern, MJ/kg, för gödningsmedel och kalk är kväve (NH₄NO₃) 3.68, fosfor (P₂O₃) 2.91, kalium (KO) 4.39 och kalk (CaO) 1.97. {Szargut 1988} Exergiinflöden till jordbruket i form av handelsgödsel blir ca 14.1 TJ och i

form av kalk ca 6.9 TJ. Mängden utsäde är för stråsäd 180-220 kg/ha, oljevaxter 8-10 kg/ha och vallfrö ca 20 kg/ha. Exergin, MJ/kg torrsvikt, {ASME 1987} respektive vattenhalt {SCB 1991}, är för stråsäd 18 resp. 15% för oljevaxter 21 resp. 18% för vallfrö 18 resp. 16.5%. Exergin i utsäde blir då 54.7 TJ. Andra exergiinflöden som ej är här redovisade är t ex bevattning, el, drivmedel och mänskligt arbete.

Skörden är beräknad efter normal skörd {SCB 1991} och den totala exergin i skörden beräknas till ca 1800 TJ. Exergiomsättningen för växtodlingen blir då enligt fig. 4.15. Utbytet blir ca 23 gånger, om vi bortser från solens bidrag. Vid en exergianalys, då även exergikostnaderna i form av maskiner etc inkluderas blir utbytet betydligt lägre och i vissa fall t o m mindre än ett. Detta innebär alltså att avkastningen blir mindre än de samlade insatserna, vilket är ohållbart i längden, i synnerhet då insatserna härrör från lagrade resurser.



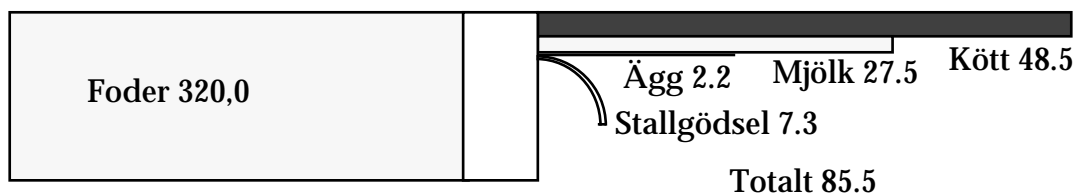
Figur 4.15 Exergiomsättningen för växtodlingen [TJ].

Foderförbrukningen varierar mycket för olika djur, åldrar och syftet med djuren. Den totala exergimängden i foder har beräknats till ca 320 TJ. {Soisalo 1992} Ytterligare exergiflöden till djurskötseln är el, drivmedel till maskiner, kemikalier och vatten till renhållning, mediciner och mänskligt arbete.

Exergin i kött varierar med fetthalten, 17.5 MJ/kg (sidfläsk) till 4.4 MJ/kg (fläskfilé). Den slaktade kroppen är för grisen 75% av levande vikt och för nöt 50% av levande vikt, spillet går bl a till kosmetika- och foderindustrin. Om vi endast betraktar exergin i köttproduktionen blir den totala exergin ca 50 TJ.

Om vi antar att en mjölkko producerar 7000 liter mjölk per år, med exergin 3 MJ/kg, blir den totala exergin som mjölk i Västerås ca 28 TJ 1989. Om en höna producerar 18 kg ägg per år, med exergin 2.4 MJ/kg {ASME 1987}, motsvarar äggproduktionen 2.2 TJ exergi. Stallgödselns exergi uppskattas till ca 7 TJ.

Exergiomsättningen för köttproduktionen blir då enligt fig. 4.16. Exergiutbytet i köttproduktionen blir endast 26% och då saknas många av inflödena, enligt ovan.



Figur 4.16 Exergiomsättningen för köttproduktionen [TJ].

4.4 Bilen som transportmedel

Bilen svarar för den största exergiförbrukningen inom transportsektorn, vilket framgår av fig. 3.21, 3.22, 4.12 och 4.13. I fig. 4.17 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% blir transportarbete, dvs används för att flytta personer eller varor. De mesta av arbetet används ju för att flytta själva bilen — 1000 kg stål etc. Arbete eller exergi åtgår, som tidigare nämnts, för att accelerera en kropp samt för att motverka luftmotstånd och friktion mot vägbanan.

Exergiutbytet för bilen, som transportmedel är alltså ca 0.6 procent, dvs för att flytta västeråsaren 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 exergiutbytet blir alltså ännu lägre om man också tar hänsyn till “kringkostnaden”. Här erbjuder cykeln och de kollektiva trans-

portmedlen 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. 4.18.

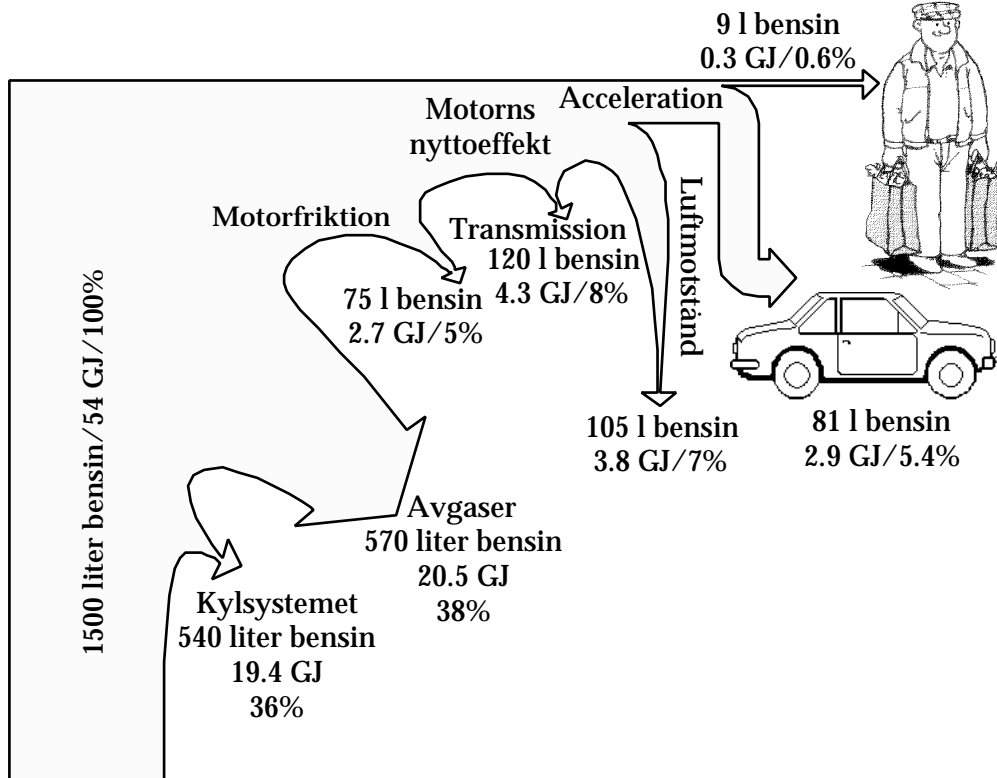


Fig. 4.17 Exergiomsättningen för en bil som körs ca 1500 mil.

Det största arbetet i en bilmotor går faktiskt åt till att “trycka undan” omgivning för att avgaserna skall få plats, se fig. 4.17. 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 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 och dess möjligheter

De typiska 50-tals husen 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. 4.18 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 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 man reducerat uppvärmningsbehovet med en tredjedel. {Nordström 1987}

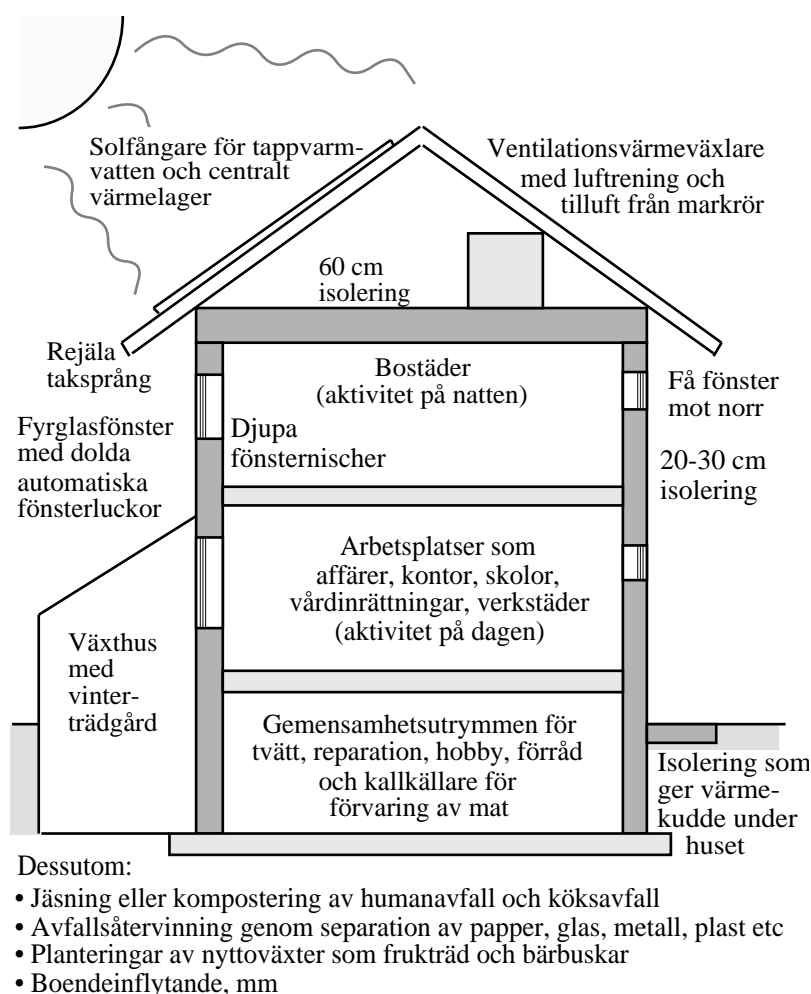


Fig. 4.18 Hus för ett resurssnålt och miljövänligt samhälle.

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 resurssnålt och miljövänligt samhälle

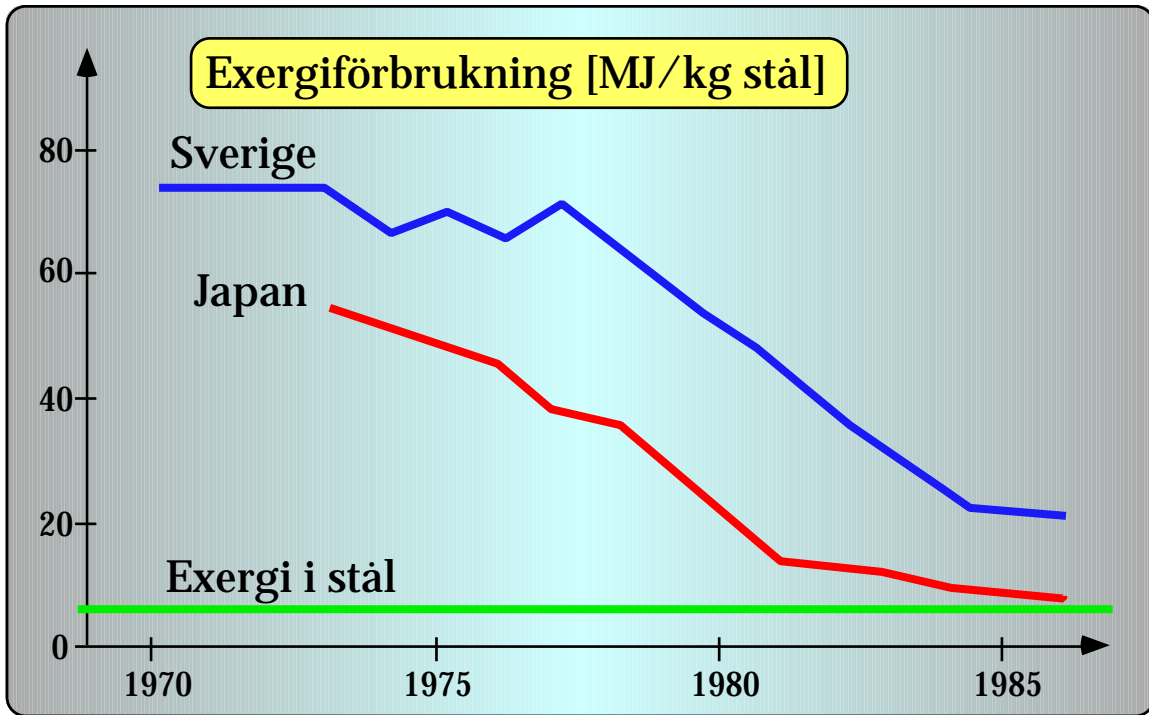
Dagens hus är ett bra exempel på hur bristen på exergitänkande och helhets-syn innebär allvarliga konsekvenser resursförbrukningen och miljön. Bostaden har en central roll i vårt samhälle. Den utgör bl a ett skydd mot regn och kyla och en samlingsplats för familjen och innebär värme och trygghet. Men 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.

Utformningen 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 nödtröft. 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 flerfamiljshus, 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.



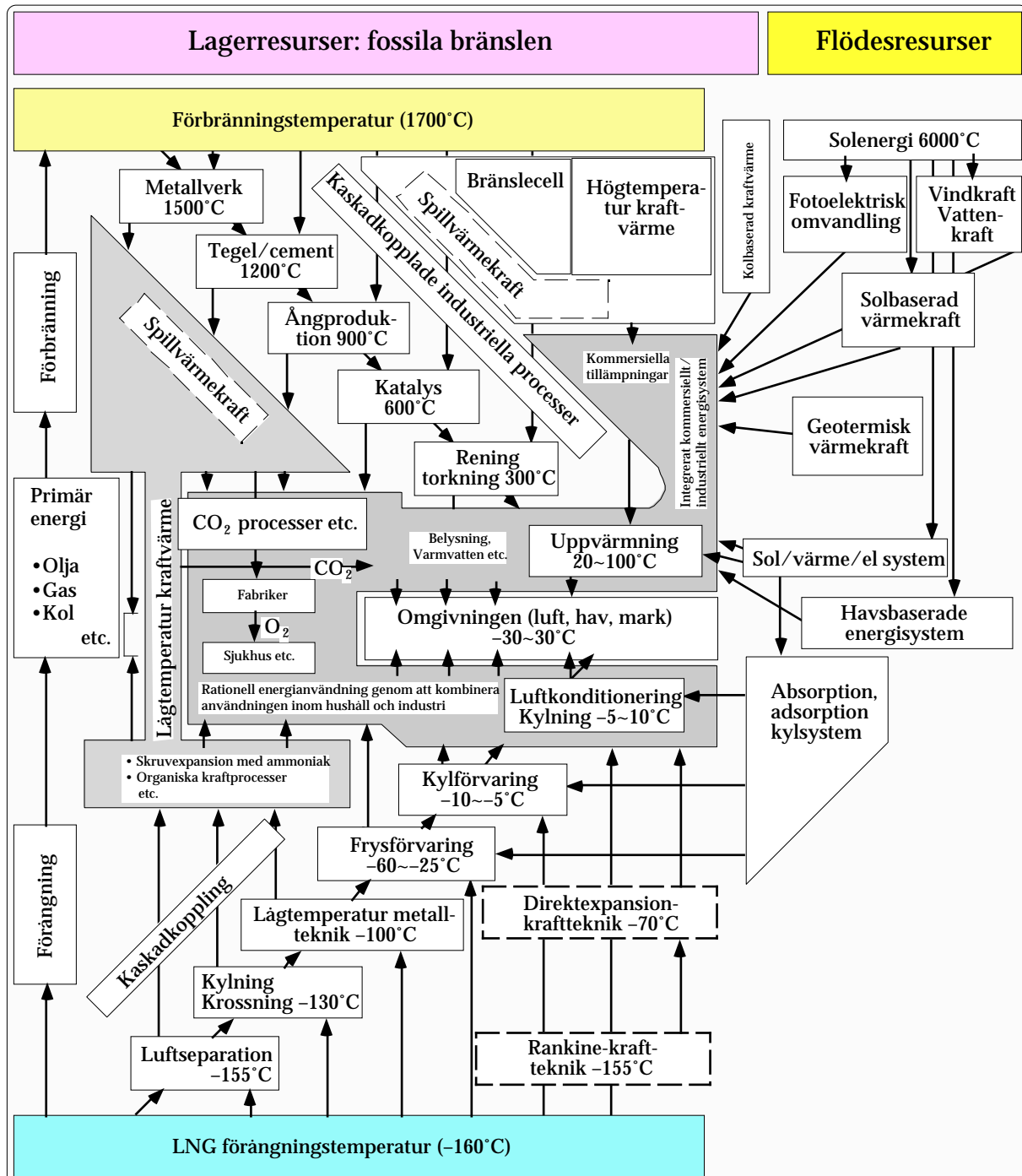
Figur 5.1 Exergiförbrukningen vid stålproduktionen i Sverige och Japan.

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°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.

För framtiden är ett oskadliggörande av CO_2 , 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.



Figur 5.2 En integrerad resursomsättning.

5.4 Hinder mot ett resurssnålt 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. 3.23 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. 4.18 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.

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 framtidsstudier är talande exempel på detta. Ett undantag är dock en framtidsstudie från Centrum för tvärvetenskapliga studier av människans villkor, Västerås 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 (Pressmeddelande från statsrådsberedningen, 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 bedrivas 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.

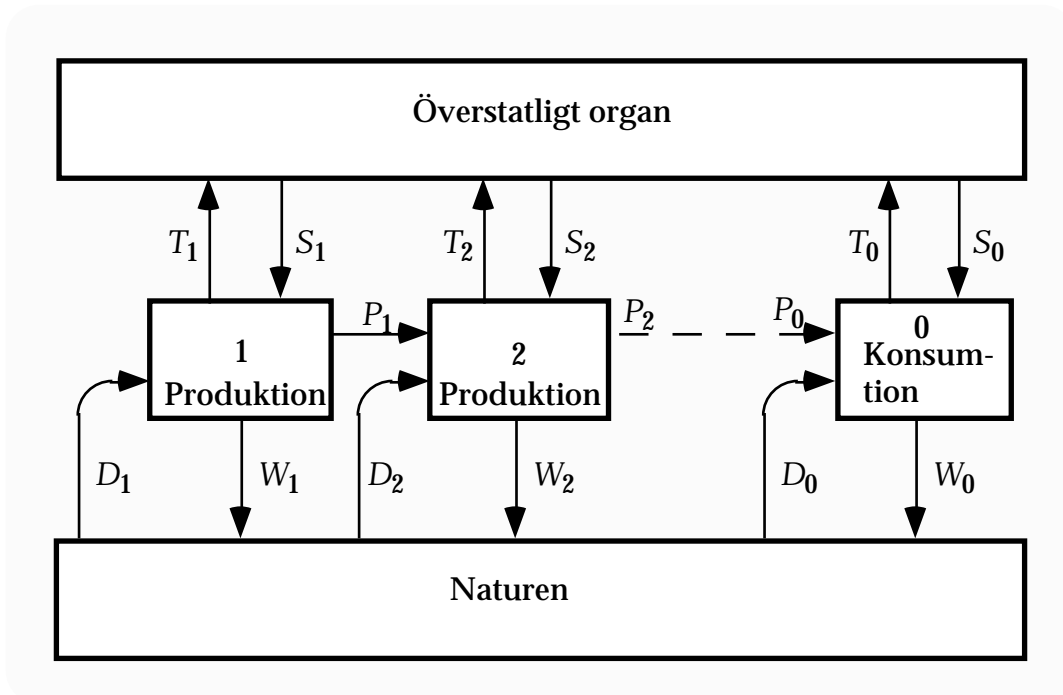
Anledningen till att detta avsnitt framför allt refererar till källor från 70-talet beror på att framtidsfrågorna, såväl som många andra viktiga frågor, kom att skjutas åt sidan under 80-talet, då hyckleriet tilltog. Decenniet då miljoner satsades på energiforskning utan överblick och samordning. Resultaten 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 konkurrenskraftig 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, så vi har fortfarande mycket att lära.

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

För att kunna se klart vad som verkligen sker i världen måste vi lägga mänskliga skapelser som religion, politik och ekonomi åt sidan ett ögonblick. Jag ber ofta mina åhörare vid föreläsningar att fundera över vad är vi överens om — att alla människor skall ha samma värde oavsett färg och religion, alla människor skall ges samma möjligheter oavsett ... Alla är alltid överens med mig om detta! Men varför är då världen så full av orättvisor? Många svarar att ekonomin eller religionen hindrar oss. Men om vi är överens om de faktiska skillnader som måste överbryggas — låt oss då skapa de religioner, den politik och den ekonomi som ger oss rättvisa — vad skall vi annars med dessa skapelser till. Såvida de inte är till just för att upprätthålla orättvisorna, men då skall de också deklarerars — annars är det inget annat än hyckleri. Den nyligen avslutade miljökonferensen i Rio illustrerar den kompakta oviljan från den rika världen att skapa en global gemenskap. Det ekonomiska system som den rika världen skapat för sitt eget välbefinnande används nu som hinder för rättvisa. Den rika världens girighet och oviljan att dela med sig är kompakt och närmast grotesk. Detta hyckleri gör oss själva offer för våra livslögner och vår civilisation går under som många tidigare civilisationer gjort. För mänskligheten blir vår civilisations undergång en befrielse från orättvisor, resursutarmning och miljöförstöring, så att nya mer livskraftiga civilisationer kan byggas.

5.5 Förslag på en ny skatt — en exergiskatt

I fig. 3.14 och 3.15 såg vi hur avsaknaden av en återföring av “avfallet” till råvaror i den samhälleliga metabolismen skapar både en resursutarmning och en miljöförstöring, vilket måste motverkas för att undvika en katastrof. Ett förslag är att beskatta exergiuttaget av lagrade resurser och exergiutsläppen till miljön, se fig. 5.3 nedan. Denna skatt bör förvaltas av ett överstatligt organ som Förenta nationerna eftersom effekterna är globala. Skatten kan följa en vara genom samhället på samma sätt som mervärdesskatten och intäkten kan användas för att stimulera en ökad exergieffektivitet.



Figur 5.3 Ett överstatligt organ för att beskatta resursutarmning och miljöförstöring.

I fig. 5.3 tänker vi oss ett antal producenter av varor eller tjänster vilka säljs på marknaden, antingen för direkt konsumtion eller för vidare produktion. Vi har alltså ett antal producenter, 1, 2, etc och en slutkonsument, 0, illustrerade som numrerade boxar i figuren. Flöden, relaterade med nummer, av värde mellan dessa, den omgivande naturen och ett överstatligt organ illustreras som pilar med beteckningar enligt nedan.

D = lagrad resurs (eng. deposit). Naturligtvis tas resurser även ur fonder och naturliga flöden, men dessa är ointressant i detta resonemang, då de inte innebär någon resursutarmning. För de enskilda företagen och konsumenterna är de naturligtvis mycket intressanta som resurs, vilket kommer att framgå nedan.

- P = produkt
 T = skatt (eng. tax) relaterad till uttag av lagrade resurser och utsläpp i naturen
 S = subvention eller stimulans för att motverka resursutarmning och miljöförstöring
 W = utsläpp (eng. waste) till omgivande luft, vatten eller mark

Låt oss först betrakta produktionsprocess 1. Företaget producerar ett värdeflöde P_1 och ett utsläpp till miljön W_1 , samtidigt som det konsumerar lagrade resurser D_1 . Dessutom utbyts värde T_1 och S_1 med skatteorganisationen. Låt oss nu beräkna exergin i W_1 och D_1 och beteckna dessa, E_{D1} respektive E_{W1} . Ansätt nu en skatt T_1 som är en funktion av dessa exergier, dvs $T_1(E_{D1}, E_{W1})$, t ex en enkel summation,

$$T_1 = k_{D1}E_{D1} + k_{W1}E_{W1},$$

där k_{D1} och k_{W1} är konstanter med enheten SEK/J, vilka alltså omvandlar exergin till ekonomiska värden. Exergin ges alltså ett ekonomiskt värde vilket är viktigt, som vi snart skall se. Härigenom beskattas företaget i relation till exergiuuttaget av lagrade resurser och exergibelastningen på miljön. Att välja just exergi som bas för beskattningen är viktigt av flera skäl. Exergin kan entydigt beräknas vid de givna naturliga förutsättningarna, som också kan beslutas genom internationella överenskommelser. Smärre variationer för dessa har också liten betydelse för exergin. Exergin är relaterad till dels användbarheten för den utnyttjade resursen, samt till dess betydelse i naturen, dels vad det "kostat" naturen att skapa den dels vad den åsamkar naturen då den hamnar där som avfall. Exergin är dessutom alltid ett positivt värde då vi har en avvikelse från den naturliga omgivande miljön. Låt mig ta två exempel för att illustrera detta.

Antag att ett företag använder stora mängder kylvatten i sina process. Vattnet tas direkt ur en flod, passerar genom processen och återförs floden nedströms. Det enda som händer med vattnet är att temperaturen stiger 5°C. Omsättning av massa och energi är betydande, kanske tusentals ton och milliontals Joule per timme. Men exergin såväl som effekten på miljön är relativt begränsad varför företaget betalar en låg skatt för sitt utsläpp till miljön. Antag att ett annat företag använder mycket små mängder av en tungmetall. Små mängder av metallen hamnar i den omgivande miljön, kanske några gram per dag. Utsläppet av massa och energi är således försumbart, men exergin däremot kan vara betydande då metallen är mycket sällsynt i naturen. Genom att den representerar en stor kontrast i naturen har den också mycket exergi, vilket företaget alltså beskattas för. Eftersom

metallen också bryts av företaget i en gruva beskattas även denna verksamhet. Denna beskattning måste alltså företaget ha täckning för då varan erbjuds på marknaden.

Varje vara belastas således med en extra kostnad, pga denna beskattning, vilken följer varan under dess livscykel och slutkonsumenten blir alltså den som till slut får stå för hela kostnaden. Således påminner denna beskattning om principen för mervärdeskatt, där mervärdet i produktionen beskattas och konsumenten blir den som till slut står för hela kostnaden. Varje företag får alltså kvitta sin utgående mot ingående mervärdeskatt, vilket innebär att de bara betalar skatt på mervärdet, vilket betalas av kunden. På motsvarande sätt kan alltså företag som satsar på resurssnåla och miljövänliga processer stimuleras genom bidrag eller lån från den överstatliga exergiskattemyndigheten.

Genom att företagen tvingas betala en extra kostnad för lagrade resurser och miljöutsläpp kan t ex avfallsföretag profitera på att ta hand om avfall till en lägre kostnad än "avfallsskatten" W . Om de oskadliggör "avfallet" befrias de ju från skatt eftersom de inte släpper ut någon exergi. Om de dessutom klarar av att omvandla avfallet till råvaror med en lägre kostnad än vad motsvarande lagrade resurser kostar på marknaden inklusive skatt, så kan de profitera på att resursutarmningen minskar. Dessa företag, som alltså omvandlar avfall till råvaror, fungerar alltså i princip på samma sätt som destruenterna i det ekologiska systemet, se fig. 3.15, och därigenom sluter de kretsloppen i samhället. Detta kan vara ett steg mot ett kretsloppssamhälle. {Tiberg 1993} Om dessa företag kan utveckla tekniker för att "gömma undan" dvs tvätta ut allvarliga gifter i naturen, på samma sätt som ett ekologisk system så bör det naturligtvis stimuleras. Det är således viktigt att exergiskatten inledningsvis används för att ge dessa destruktionsföretag möjlighet att utvecklas och etablera sig på marknaden.

Ytterligare en aspekt som gör denna skatt tilltalande är att ett företag som inte belastar de lagrade resurserna eller miljön med avfall slipper exergiskatt. Denna skatt stimulerar således samhället mot en miljövänlig riktning.

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 μ_{i0} (temperatur, tryck och kemisk potential). Låt de intensiva parametrarna för A betecknas T , p och μ_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 A_0 är isolerat från omgivningen fränsett arbete W som på ett kontrollerat sätt tas ur det totala systemet,

$$\begin{aligned} U &\ll U_0 \\ V &\ll V_0 \\ N_0 &\ll N_{i0} \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

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

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

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

Differentialen av ekv. A.2 är

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

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

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

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 W utförs vid denna process. Antag också att den totala

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

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

eller

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

Eftersom

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

enligt termodynamikens andra huvudsats fås att

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

där likheten gäller då $S^{\text{tot}} = 0$, 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_{eq} , V_{eq} , S_{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 ,

$$\begin{aligned} G = U + pV - TS & \quad \text{dvs} \quad E = G & \quad \text{då} \quad N_i = 0, p = p_0 \text{ och } T = T_0 \\ G_0 = U + p_0V - T_0S & \quad \text{dvs} \quad E = G_0 & \quad \text{då} \quad N_i = 0 \end{aligned}$$

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

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.

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

och en ”global” exergi, ekv. A.9:

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

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.

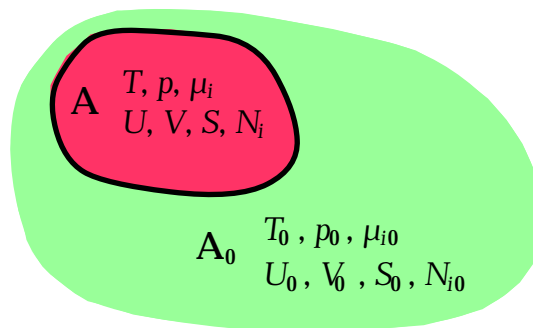


Fig. A.1 System A i en omgivning A₀.

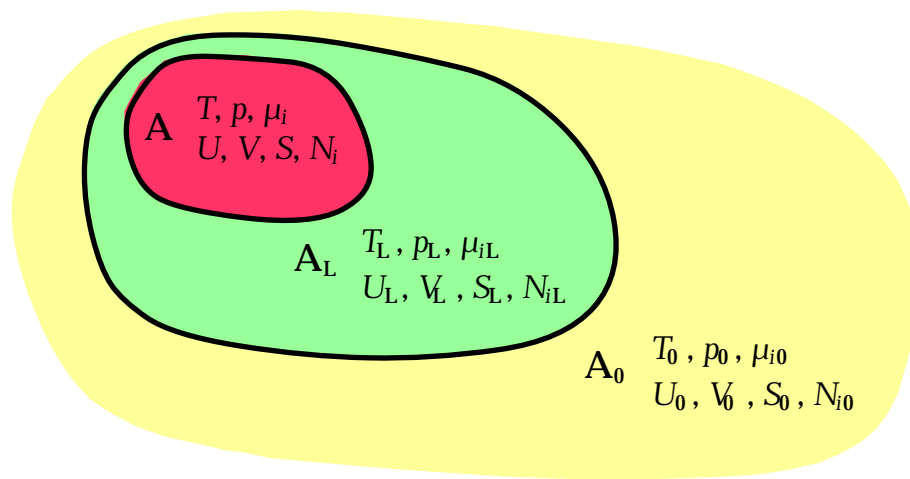


Fig. A.2 System A i en lokal omgivning A_L i en omgivning A_0 .

APPENDIX B

Exergin 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 μ_i^0 är kemiska potentialen för ämne i relativt sitt referenstillstånd.

Vidare gäller att

$$a_i = \frac{c_i}{c_{i0}} \quad (\text{B.3})$$

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 användningen av exergibegreppet 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 (Fe_3O_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 (Fe_2O_3) i fast form och med molkoncentrationen 2.7×10^{-4} och att syre 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:

$$\begin{aligned}\mu^0(\text{Fe}_{\text{magnetit}}) & \frac{1}{3} (-1014.2 + 2 \times 3.84) \text{ kJ/mol} = -335.5 \text{ kJ/mol} \\ \mu^0(\text{Fe}_{\text{hematit}}) & \frac{1}{2} (-741.0 + 1.5 \times 3.84) \text{ kJ/mol} = -367.6 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

Där 3.84 kJ är mängden exergi som frigörs då partialtrycket för 1 mol syrgas (O_2) sjunker från 101.325 kPa till 20.40 kPa vid 15°C.

Specifika exergin för järnmalm och järn blir då:

$$\begin{aligned}e_{\text{järnmalm}} & 10.7 \{-335.5 - (-367.6)\} \times 10^3 + 8.31 \times 288 \times \ln \frac{0.83^\dagger \times 0.43}{2 \times 2.7 \times 10^{-4}} = \\ & 0.51 \text{ MJ/kg} \\ e_{\text{järn}} & 17.9 \{0 - (-367.6)\} \times 10^3 + 8.31 \times 288 \times \ln \frac{1}{2 \times 2.7 \times 10^{-4}} = 6.90 \text{ MJ/kg}\end{aligned}$$

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.

[†] 1 kg järnmalm = 0.6 kg Fe = 10.7 mol Fe = 10.7/3 mol Fe_3O_4 = 0.83 kg Fe_3O_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 ε 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 χ är beroende av v . Om många vägar är möjliga i processen, från begynnelse- till sluttillståndet, så låt χ_0 beteckna det lägsta möjliga värdet på χ . 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_{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 karaktäristiska exergieffekten för processen. Från (ii) och (iii) kan vi också definiera en relativ exergiverkningsgrad η_{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} cm³) men ur mikroskopisk synpunkt är mycket stora och följaktligen består av ett stort antal partiklar (10^{15} cm³ 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 beror exponentiellt av N . Låt sannolikheten för det j :te tillståndet vara P_j och att

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

Entropin för systemet är då enligt statistisk mekanik definierad som

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

En bit information är alltså ekvivalent med 1.0×10^{-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 $k'T_0 = 2.9 \times 10^{-21}$ 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

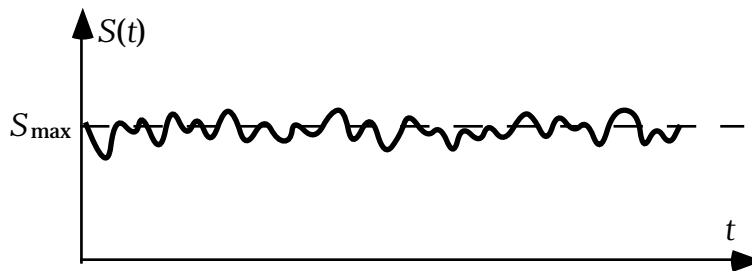
Några idealiserade termodynamiska system

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 fig. E.1 nedan

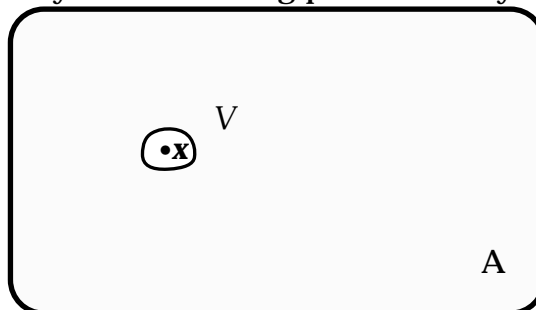


Figur E.1 Entropin som funktion av tiden för ett system i jämvikt

Vid jämvikt är parametrar som temperatur och entropi väl definierade.

II. Ett system nära jämvikt

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



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

Om V är makroskopiskt liten men tillräckligt stor för att innehålla ett stort antal partiklar kan vi anta att det råder inre termodynamisk jämvikt i V . (Relaxationstiden för att uppnå jämvikt i V antas liten i jämförelse med reaktionstider mellan V och omgivningen.) Då kan temperatur, tryck, entropitäthet och andra intensiva variabler för 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)

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

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

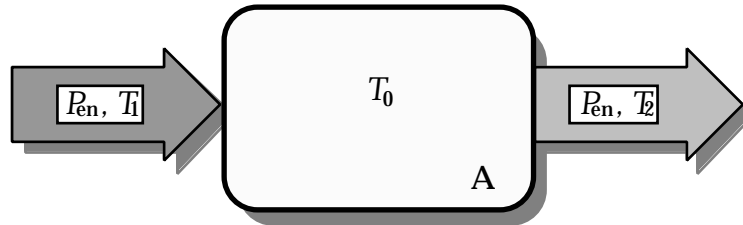
$$\nabla [\nabla X_i(\mathbf{x}, t)] = 0 \quad (\text{E.6})$$

III. Icke-jämviktssystem. Stationära tillstånd

Ett system kan upprätthållas i ett icke jämviktstillstånd om det befinner sig i ett exergiflöde, se fig. 2.1 ovan. Låt oss anta ett system A, se fig. 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 värmeflödets 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_{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 fig. 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 fig. E.3 är en metallstav som leder värme från en varm till en kall reservoar.

Om avvikelsen från jämvikt inte är för stor 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

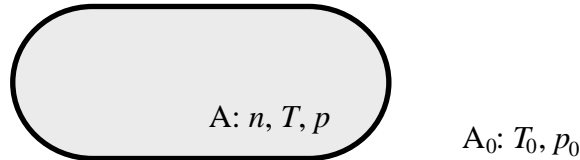
$$\frac{dS}{dt} = 0 \quad (\text{E.8})$$

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 app. 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

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

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

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

och för jämviktsenergin U_{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

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

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

$$t = \frac{T - T_0}{T_0}$$

$$v = \frac{V - V_{\text{eq}}}{V_{\text{eq}}} \quad (\text{E.14})$$

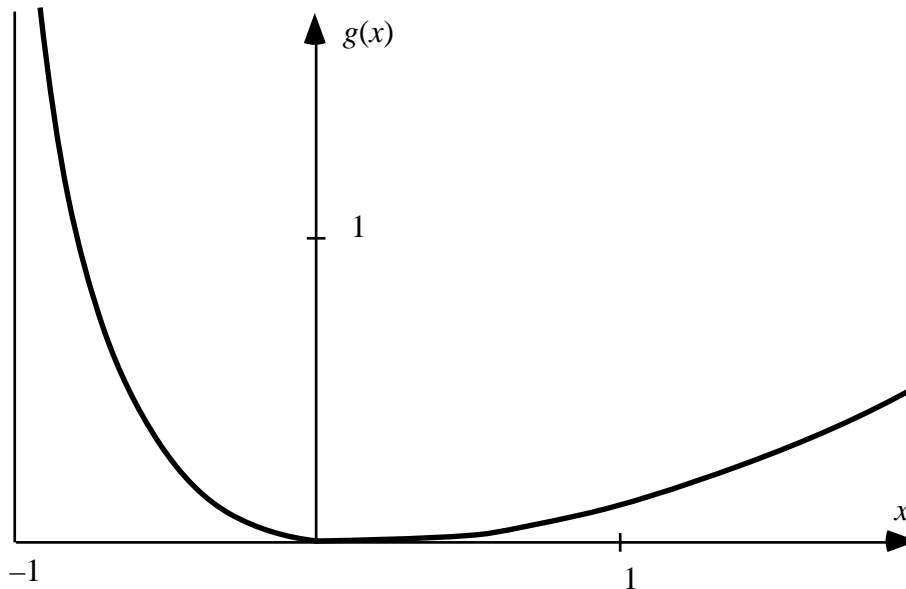
har vi

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

där funktionen $g(x)$ är definierad enligt

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

Denna funktion visas i fig. 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

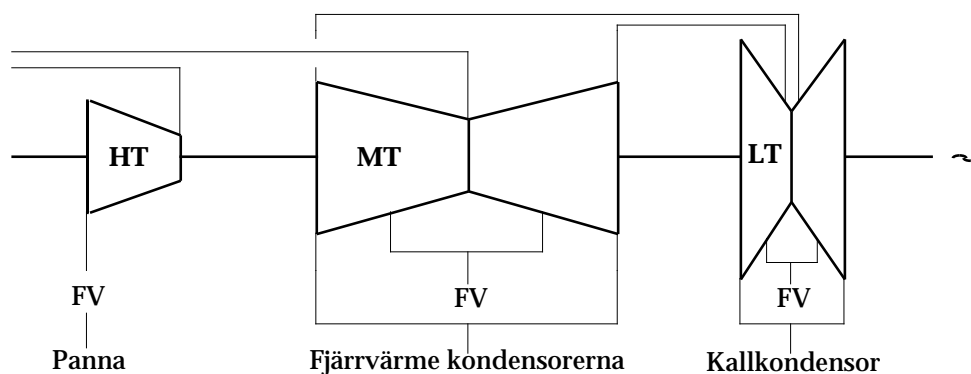
Tre driftfall vid block 4 i kraftvärmeverket, Västerås

Pannan kan eldas med kol eller olja. I de studerade driftfallen användes tre olika kolsorter. Vid driftfallet 172/280 MW användes kolsorten Marc Rich och pannverkningsgraden enl. DIN var 0.939. Vid 137/220 MW användes en polsk kolsort och verkningsgraden var enl. DIN 0,927 och i det tredje fallet, 0/252 MW, användes en rysk kolsort och verkningsgraden blev enl. DIN 0,928 (KVV:s statistik). Askans innehåll av energi och exergi har även räknats in i de totala värdena för kol. Askans huvudbeståndsdelarna är SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , Li_2O , P_2O_5 , TiO_2 , SO_3 , dessutom innehåller askan spårämnen Pb, Cd, V, Ni, Cu, Cr, Zn, Hg. För den polska kolen har askans energi och exergivärden antagits. De beräknade värdena skiljer sig något enligt tabellen nedan från KVV:s.

Kolsort	h_i (KVV) [MJ/kg]	h_i [MJ/kg]	e [MJ/kg]	h (aska) [kJ/kg]	e (aska) [kJ/kg]	h (rökgas) [kJ/kg]	e (rökgas) [kJ/kg]
Marc Rich	27,93	28,41	29,46	60,00	64,50	1005,80	177,80
Polsk	26,69	27,23	28,25	80,00	80,00	928,19	155,37
Rysk	24,66	25,24	26,21	118,27	114,30	909,29	158,15

Marc Rich (amerikanskt) är den bästa av de tre kolsorterna, den har de högsta effektiva värmevärdena och minst energi och exergi för askan, även askhalten var minst.

Turbinanläggning består av tre delturbiner, en högtrycksturbin (HT), en mellantrycksturbin (MT) och en lågtrycksturbin (LT), se fig F.1. Dessa bildar en axelsträng tillsammans med en ASEA-generator. HT-turbinen är en 25-stegs enkelströmmig axialreaktionsturbin. Ångan tappas dels tillbaka till pannan och dels får högtrycksförvärmarna ånga från HT-turbinen. MT-turbinen är en dubbelströmmig osymmetrisk axialreaktionsturbin med inlopp i mitten och utlopp vid båda ändarna. Delar av ångan tappas av vid 5 avtappningsgenomföringar. LT-turbinen, värmekondensatorerna (VK) och några av förvärmarna (FV) får ångan från MT-turbinen. LT-turbinen är dubbelströmmig och osymmetriskt uppbyggd. Ångan tappas till kallkondensorn men även en av lågtrycksförvärmarna får ånga från LT-turbinen.



Figur F.1 Turbinanläggningen

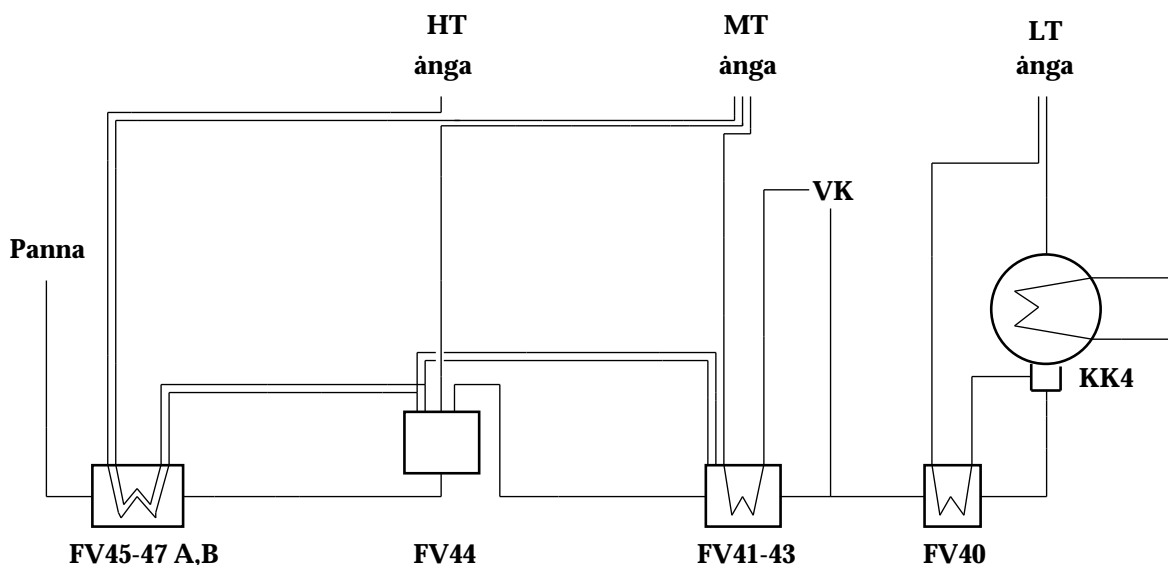
I fig. 4.5 - 4.7 illustreras alla turbinerna tillsammans. För de utflöden som inte har både tryck och temperatur angivna i leveransproverna har mättad ånga antagits. HT-turbinen förser en del av högtrycksförvärmarna med ånga, största delen av ånga leds dock tillbaka till pannan som figuren ovan visar. Vid direktvärmefallen används HT-turbinen till att strypa ångan till ett lägre tryck. Högtrycksförvärmarna får ånga från HT-turbinen, men större delen av ångan leds tillbaka till pannan. Energimässigt blir det ingen förlust att strypa ett flöde men exergimässigt blir det en förlust som framgår av fig. 4.5 - 4.7.

Värmekondensatorerna (VK41-42) är enströmmiga, fjärrvärmevattenkylda och försedda med 1 st tubknippe vardera. Kondensatorerna är seriekopplade och erhåller avtappningsånga från MT-turbinen. Ångan från MT-turbinen har inga mätvärden från provtillfällena och därför har värden för mättad ånga använts i beräkningarna. I beräkningarna blev värmemängderna ca 1-2 MW mindre än i KVV:s data. Men värmekondensatorerna har beräknats med 100% energiverkningsgrad och förmodligen var värmemängderna ännu mindre än i beräkningarna. Vid direktvärmefallet används inte värmekondensatorerna, se nedan. I fig. 4.5 - 4.7 är de båda värmekondensatorerna summerade.

Direktvärmarna (DV41-42) är två stycken och de värmer upp fjärrvärmevattnet med ånga direkt från pannan, vilket medför stora exergiförluster, se fig. 4.7. Turbinprocessen är förbikopplad när man använder direktvärmarna. Direktvärmarna används endast i driftfallet 0/252 MW. Efter värmebalansen med 100% verkningsgrad blev det sammanlagda flödet 1515 kg/s. I fig. 4.5 - 4.7 har de båda direktvärmarna summerats.

Kallkondensorn (KK4) är tvåströmmig, sötvattenkyld och försedd med 2 st tubknippen. I kondensorn dräneras LT-turbinens avloppsånga, se fig. F.2 nedan. Till kondensorn leds också dränage från förvärmare. Provtillfällena var mitt i vinter och kylvattnet från Mälaren var under referenstemperaturerna dvs inkommande ca 1.7°C och utgående ca 5°C. Endast kondensflödet

från kallkondensorn var givet och beräkningarna har helt och hållet baserats på energibalanser.



Figur F.2 Kondensoranläggningen

Lågtrycksförvärmare (FV 40) värmer upp kondensat från kallkondensorn med ånga från LT-turbinen. Dränaget från FV 40 leds till kallkondensorn. Förvärmarna FV 41-43 värmer upp kondensatet från värmekondensatorerna (VK41-42) och från FV 40 med ånga från MT turbinen och dränage från högtrycksförvärmarna. Dränaget från FV 41-43 leds till värmekondensatorerna (VK). Förvärmare FV44 (matarvattentank) värmer upp matarvattnet från tidigare nämnda förvärmare och dränaget från högtrycksförvärmarna med ånga från MT-turbinen. Högtrycksförvärmarna (FV45-47 A,B) värmer upp matarvattnet från matarvattentanken (FV44) med ånga från både MT- och HT-turbinerna. Dränaget från högtrycksförvärmarna leds dels till FV44 och dels till FV43. I fig. 4.5 - 4.7 har 6 stycken högtrycksförvärmare (FV45-47A,B), 5 stycken lågtrycksförvärmare (FV40-44) och kallkondensorn (KK4) summerats.

APPENDIX G

Naturliga fysiska resurser

G.1 Solljus

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

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 W/m^2 . På jorden är intensiteten (vinkelrätt mot solen) i medeltal 800 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 långvågig 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 Västerås 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/m²år på horisontella ytor. Sveriges landyta mottar 360000 TWh/år. Solinstrålningen i Sverige på horisontella ytor varierar mellan 800 kWh/m²år (norra Norrland) och 1000 kWh/m²år (Skåne).

I Sverige mottar en horisontell yta 800-1000 kWh/m²år. Räknat över hela året mottar en vertikal yta något mer energi än en horisontell. Med 50% verkningsgrad erhålls 400-500 kWh/m² 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 instrålning 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 (torrsubstans). Halm har ett energiinnehåll på 4.5 kWh/kg (torrsubstans) och ved 5.0 kWh/kg (torrsubstans). Energiinnehållet i produkterna varierar. I ved kan energiinnehållet uppgå till 5.6 kWh/kg (torrsubstans).

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% exergiinnehåll.

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

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

ρ är luftens densitet, dvs 1.29 kg/m³. 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:

$v = 5$ m/s	ger	$P/A = 80$ W/m ²
$v = 11.5$ m/s	ger	$P/A = 1000$ W/m ²
$v = 20$ m/s	ger	$P/A = 5200$ 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 2×10^7 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 km². Med restriktioner för bl a områden för friluftsliv och kulturminnesvård och med 1 km avstånd till samhällen återstår 7 500 km² 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 km² 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 km², medan nettobehovet blir ungefär 0.02 km² (2ha).

Med ett årsmedelvärde för utvunnen effekt på 25% av den nominella effekten fås att utvunnen energi per m² markyta (nettobehov) och år blir ungefär 200 kWh/m²år. Om man räknar på bruttobehovet erhålls 4 kWh/m²år.

Med större aggregat ökar utvunnen energi per m² markyta och år.

APPENDIX H

H.1 Exergin för värme och kyla

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°C (293 K) i en omgivning vid 0°C (273 K)?

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

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

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:

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

Energiverkningsgraden = $\frac{\text{Nyttjat energiutflöde}}{\text{Nyttjat energiinflöde}}$ dvs $\eta_{en} = \frac{Q_{ut}}{Q_{in}}$ där Q 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:

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

Om vi nu sätter in numeriska värden får vi:

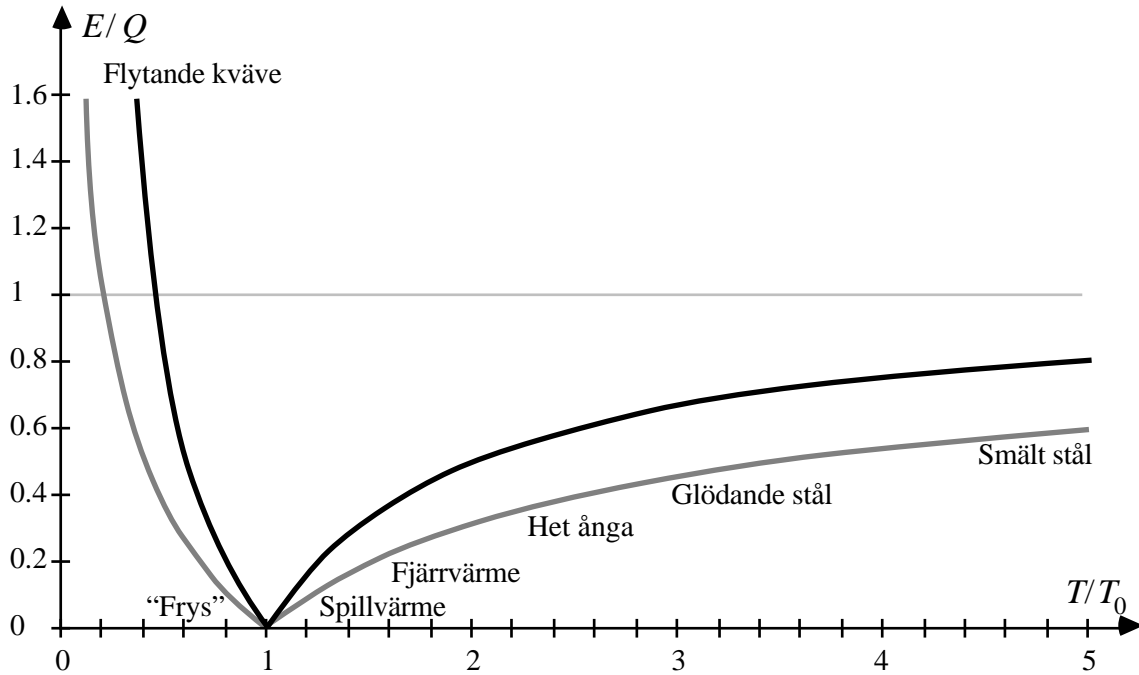
$$\eta_{en} = 0.03 \frac{0.9}{0.04} = 0.675 = 67.5\%$$

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 fig. H.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°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 frysrum 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:

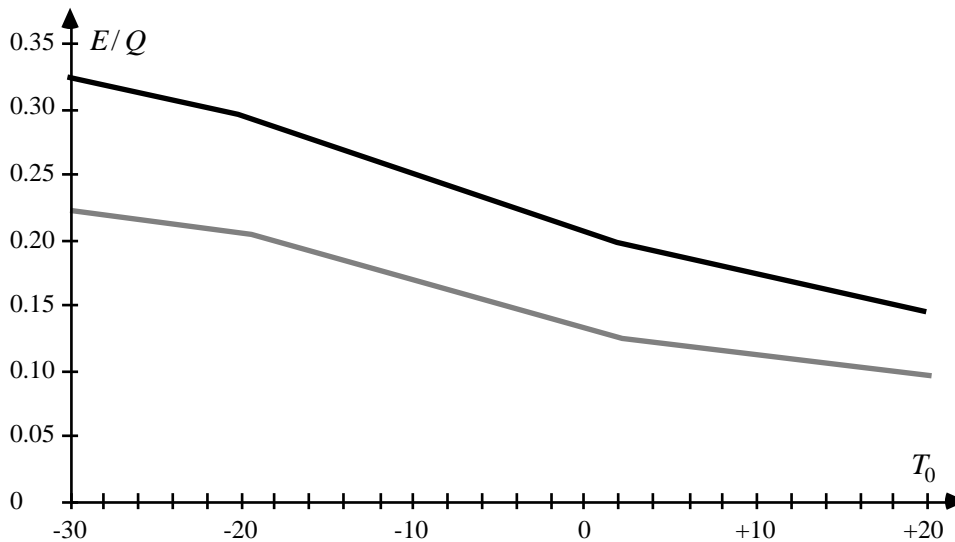
$$\frac{E}{Q} = 1 - \frac{T_0}{T_{\text{fram}} - T_0} \ln \frac{T_{\text{fram}}}{T_0}, \quad (\text{H.3})$$

där T_{fram} anger framledningstemperaturen ($T_{\text{fram}} > T_0$) Om vi antar denna till 85°C då $T_0 > +2^\circ\text{C}$ och att den sedan ökar linjärt med sjunkade utetemperatur till 120°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°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_{fram} anger framledningstemperaturen, som ovan och T_{retur} anger returtemperaturen, vilken vi antar till 55°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°C .



Figur H.2. Exergifaktorn för fjärrvärme, den övre svarta kurvan anger exergifaktorn för skillnaden mellan levererad och returnerad fjärrvärme vid 55°C , den nedre skuggade kurvan anger exergifaktorn för levererad fjärrvärme.

Exempel: Vad är exergifaktorn för fjärrvärme då utetemperaturen är 0°C ? Beräkna också exergifaktorn för utnyttjad fjärrvärme, se ekv. H.4 ovan?

Lösning: Först måste vi beräkna temperaturen på fjärrvärmen T_{fram} vid den rådande utetemperaturen 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 $T_{\text{fram}} = 88.2^\circ\text{C} = 361\text{K}$. Numeriska värden i ekv. H.3 ger således:

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

dvs exergifaktorn för fjärrvärmen blir alltså ca 13%.

För utnyttjad fjärrvärme får vi istället, enligt ekv. H.4, då returtemperaturen antas till 55°C dvs 328K:

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

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 mätliga 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 gränsytan 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 exerginnehållet 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 för varje månad under ett år.

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 . (Värmekapacitiveteten mc_p kan också skrivas $V\rho c_p$, där V anger volymen och ρ anger densiteten.) Vanligen kan vi anta att värmekapacitiveteten 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 inte är linjärt beroende av utomhustemperaturen, enligt ekv. H.7. Genom en enkel modell kan vi dock beräkna exergifaktorn för den årliga energiomsättningen {Wall 1986a}. 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_{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:

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

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]

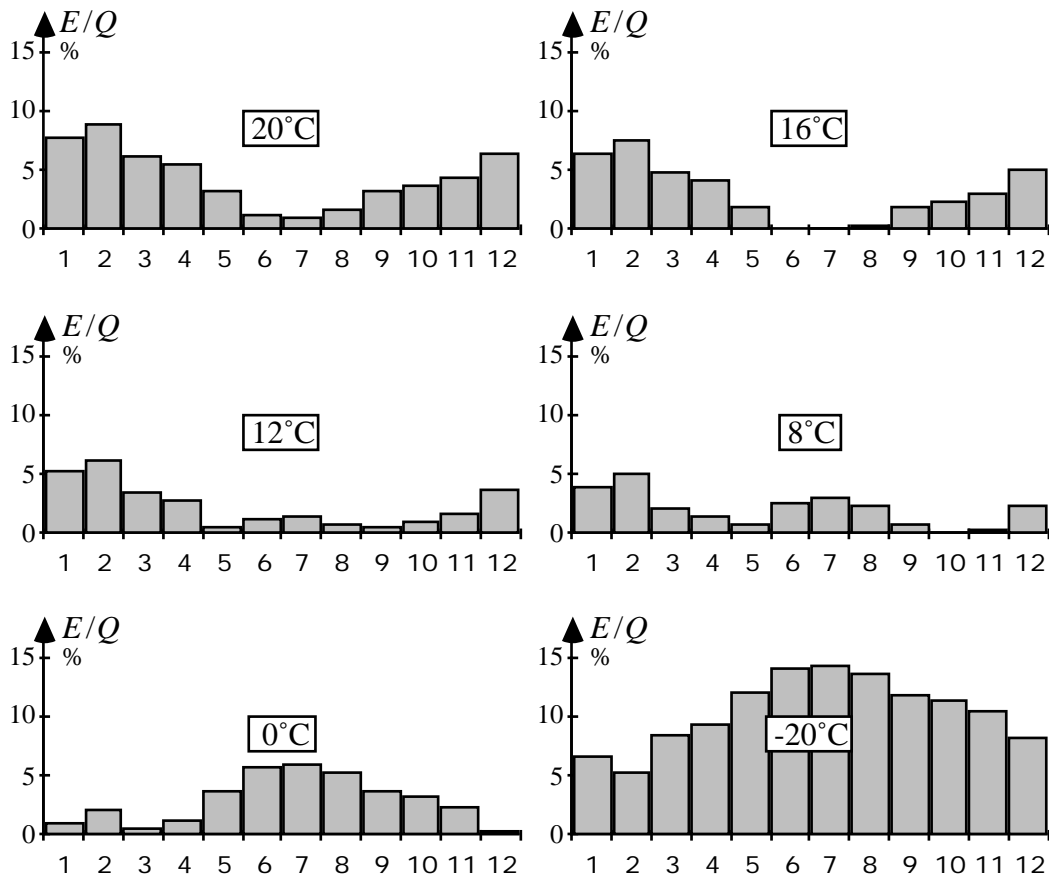
ω = $\frac{2}{365}$ per dygn.

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 ger exergifaktorn ca 4% för södra Sverige {Wall 1986a}.

H.5 Exergibehovet för att upprätthålla en lokaltemperatur

H.5.1 Exergin för värmeflöden vid olika temperaturer

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



Figur H.3. Exergifaktorn E/Q för olika temperaturnivåer om månadsmedeltemperaturerna var (gäller för Göteborg 1986): 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:

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

dvs en ideal kylmaskin för att upprätthålla denna temperaturdifferens skulle ha en kylfaktor (COP) av ca 35¹. En verklig kylmaskin borde åtminstone kunna erbjuda kylfaktorn 10, dvs ca 30% av den ideala, om den optimerades för denna temperaturdifferens. Om detta appliceras på kylrum i t ex livsmedelsindustrin skulle 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

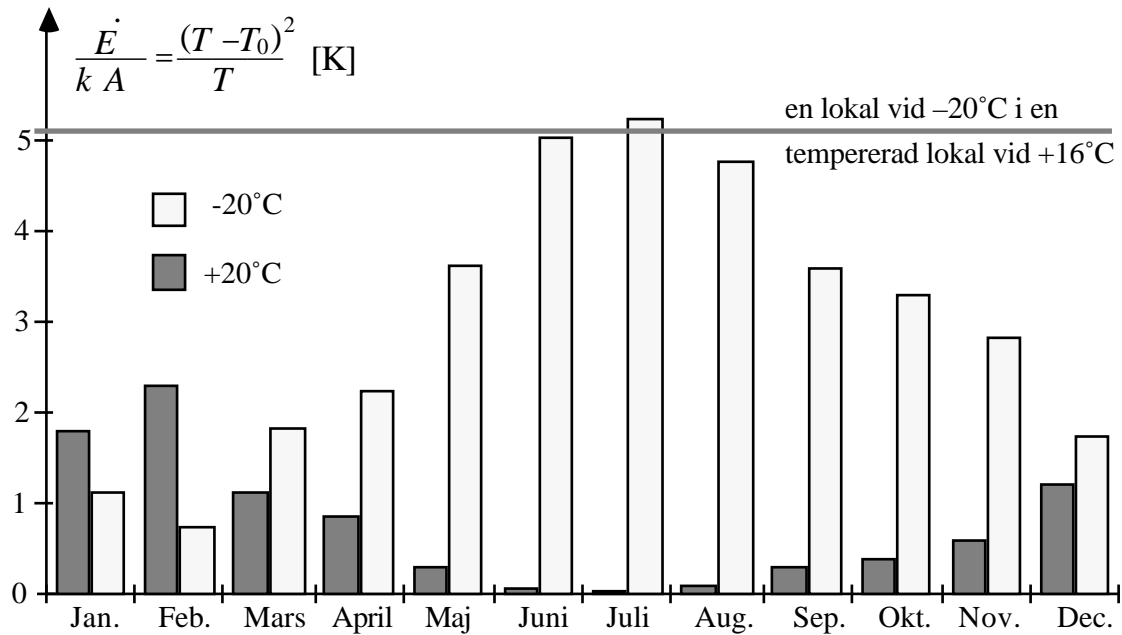
Låt oss också använda exergibegreppet för att studera hur exergibehovet för att upprätthålla ett system som en lokal eller ett frysrum vid en konstant temperatur under det att utomhustemperaturen varierar, enligt ekv. H.7 ovan. Om vi baserar studien på månadsmedeltemperaturerna enligt fig. H.3 får vi 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°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 fig. H.4. 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.

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



Figur H.4. Relativa exergieffekten för att upprätthålla temperaturen i en varm respektive kall lokal beräknat från månadsmedeltemperaturen enligt fig. H.3 samt för ett frysrum (-20°C) i en tempererad lokal vid $+16^{\circ}\text{C}$. Förhållandet mellan det totala exergibehovet för det kalla och varma systemet blir 3.9 samt för frysrum i $+16^{\circ}\text{C}$ 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. (1975) *Lärobok för 80-talet*, Prisma, Lund.
- Adler-Karlsson, G. (1990) *Lärobok för 90-talet*, Prisma, Stockholm.
- Ahern, J. E. (1980) *The Exergy Method of Energy Systems Analysis*, Wiley.
- Andersson, L. (1981) "Problemanalys — åtgärd", *Symposium om energikvalitetsbegrepp*, red. G. Wall, Chalmers tekniska högskola, Västerås.
- Arnmark, L., et al. (1992) *Fosfor i Svartådalen Västerås kommun*, Högskolan i Eskilstuna/Västerås.
- ASME (1987) *Thermodynamic Data for Biomass Materials and waste Components*, American society of Mechanical Engineers, New York.
- Baehr, H. D. (1965) *Energie und Exergie*, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Bogren, E. Fredriksson, R. Johansson, T. B. Steen, P. (1981) *Energi — till vad och hur mycket?*, Stockholm.
- Borgström, G. (1973) *Focal Points - A Global Food Strategy*, Macmillan, New York eller *Brännpunkter*, Trevi 1975.
- Boulding, K. (1950) *A Reconstruction of Economics*, Wiley, New York 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. (1989) *The Organization of Hypocrisy*, Chichester: John Wiley.
- Brunsson, N. (1990) "Det organiserade hyckleriet", *Tvårsnitt*, s. 55-60.
- 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. (1983) *Metal Resources and Energy*, Butterworths.
- Cottrell, F. (1955) *Energy and society. The relation between energy, social changes and economic development*, Mc Graw-Hill, New York.
- Deming, W. E. (1982) *Out of the Crisis*, Cambridge Univ. Press.
- Edgerton, R. H. (1982) *Available Energy and Environmental Economics*, Lexington.
- Fratzscher, W., Brodjanskij, V. M. und Michalek, K. (1986) *Exergie - Theorie und Anwendung*, VEB, Springer.
- Gaggioli, R. A., ed., 1980, *Thermodynamics: Second Law Analysis*, ACS Symposium Series 122, American Chemical Society, Washington, D.C.
- Gaggioli, R. A., ed. (1983) *Efficiency and Costing*, ACS Symposium Series 235, American Chemical Society, Washington, D.C.
- Georgescu-Roegen, N. (1971) *The Entropy Law and the Economic Process*, Cambridge, Harvard Univ. Press 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).
- Gunnarsson, A. (1992) red., "Amerika 500 år", *Nyheter från Latinamerika/Fjärde världen*, Stockholm.
- Gyftopoulos, E. P., Lazaridis, L., Widmer, T. (1974) *Potential Fuel Effectiveness in Industry*, Ballinger Publ. Co., Cambridge, Mass.

- Hagenfors, Leif (1991) "Värmedrivna kylprocesser — en möjlighet att utnyttja fjärrvärme sommartid?", Fysisk resursteori, Chalmers.
- Hamnen (1989), "Årsberättelse 1989", Västerås hamnstyrelse.
- Herendeen, R. (1989) *Ecological Modelling*, Vol. 48, No. 1-2, pp. 19-44
- Hornborg, A. (1989) "Imperialismens termodynamik", *Tvärsnitt*, nr. 4, s. 32-41.
- IFIAS (1975) Workshop reports, Energy Analysis, International Federation of Institutes of Advanced Study, report no. 6 se även "Energy Analysis and Economics" Report no. 9 eller Kristoferson, L. och Nilsson, S., *Ambio* 5, 27 (1976).
- Imai, M. (1986) *KAIZEN - The Key to Japan's Competitive Success*, The KAIZEN Institute, Ltd.
- Janzon, L., övers. (1988) *Papalagi — Den vite mannen tal av söderhavshövdingen Tuiavii från Tiavea*, bokförlaget Korpen.
- Kashiwagi, T. (1990) "Present Status and Future Prospects of Advanced Energy Technology for Solving Global Environmental Problems", *Europe - Japan The Global Environmental Technology Seminar 1990*, JETRO, Stockholm.
- Kotas, T. J. (1985) *The exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Butterwoods.
- Kåberger, T. (1991) "Att beskriva resurshantering", Fysisk resursteori, Chalmers, Göteborg.
- Kåberger, T. (1992) personlig kontakt.
- Lindgren, G. (1992) personlig kontakt.
- Lindgren, G. (1993) *Arvet — avfall, kretslopp och framtid*, Tidens förlag.
- Lindgren, P., Keen, K., Åkerlund, P., Jungen, B., Eriksson, T. (1983) *Jorden vi ärvde*, Sveriges Utbildningsradion.
- Lovelock, J. E. (1988) *The Ages of Gaia: a Biography of Our Living Earth*, Oxford University Press.
- Lundberg, B. och Abram-Nilsson, K. (1988) *Synvänder - om naturen, människan och helheten*, LTs förlag.
- Lundberg, B. och Olsson, K. (1992) *Optimum — om miljön och människans möjligheter*, Utbildningsradion.
- Lundström, R. (1985) "Energiplan för Västerås kommun", Västerås.
- Lundström, R. (1991) personlig kontakt, Tekniska verken, Västerås.
- Malaska, P. (1989) "Nature-Oriented Technology", Turku School of Economics and Business Administration, Finland.
- McGannon, H. E. (1971) *The Making, Shaping and Treating of Steel*, U.S. Steel, 9th ed.
- Miljön i Västerås (1990) VBB Viak.
- Mobara, M., Hajzadeh-Fallah, M. (1991) *Underlag för konstruktion av driftsimulator på KVV block 4 i Västerås*, Högskolan i Eskilstuna/Västerås.
- Moran, M. J. (1989) *Availability Analysis - A Guide to Efficient Energy Use*, ASME.
- Nordström, C. och Nordström, K. (1987) personlig kontakt.
- Ny Teknik • Teknisk Tidskrift 1991:36, s. 12-14, Stockholm.
- Odum, H. T. (1971) *Environment, Power and Society*, Wiley, New York.
- Odum, H. T. och Odum, E. C. (1976) *Energy Basis for Man and Nature*, New York, Wiley.
- Penner, S., ed. (1980) "Second Law Analysis of Energy Devices and Processes", *Energy*, vol. 5 sid. 665-1011.
- Pirsig, R. (1974) *Zen and the Art of Motorcycle Maintenance*, New York, Morrow Publisher.

- Prop. 1978/79:115, Regeringens proposition 1978/79:115, Riktlinjer för energipolitiken, Bilaga 1.
- Rant, Z. (1956) *Forschung Ing.-Wesens* **22** (36).
- SCB (1989) Jordbruksstatistisk årsbok, Statistiska centralbyrån, Örebro.
- SCB (1990) Statistiska meddelanden, E 13 SM 9001, Örebro.
- SCB (1991), J 15 SM 9101, Örebro.
- Schrödinger, E. (1949) *What is life?*, Cambridge University Press (1944) se även *Vad är liv?*, Bonniers.
- Soisalo, K. (1992) Exergistudie av kraftvärmeverket samt jord- och skogsbruket i Västerås, Högskolan i Eskilstuna/Västerås. (Diskett)
- SOU 1972:59, Statens offentliga utredningar 1972:59. Att välja framtid.
- SOU 1974:64,65, Statens offentliga utredningar 1974:64,65.
- SOU 1974:72-76, Statens offentliga utredningar 1974:72-76. *Energiforskning*.
- Squires, A. M. (1986) *The Tender Ship — Governmental Management of Technological Change*, Birkhäuser.
- Szargut, J., Morris, D. R., and Steward, F. R. (1988) *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*, Springer
- Tiberg, N., (1993) *Kretslopp och kretsloppssamhälle*, Svenska Naturskyddsföreningens årsbok.
- Tribus, M. (1987) *Quality First*, National Society of Professional Engineers, Washington och Tribus, M., "Deming's Way", *Mechanical Engineering*, s. 26-30, Januari 1988.
- Tribus, M. och McIrvine, E. C. (1971) *Scientific American* **224** (3) s. 179.
- Tribus, M., Hicks, T., Polk, L. M., Wild, O. (1992) *Simple as A B C*, presentation vid National Forum, 29 april, British Deming Association.
- Trolle, U. (1990) *Mot en internationellt konkurrenskraftig akademisk utbildning*, Studentlitteratur.
- Wall, G. (1977) *Exergi — ett användbart begrepp inom resursräkenskap*, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Wall, G. (1986 a) *Exergy — a Useful Concept*, Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Wall, G. (1986 b) "Thermoeconomic Optimization of a Heat Pump System", *ENERGY*, Vol. 11, No. 10, pp. 957-967.
- Wall, G. (1987) "Exergy Conversion in the Swedish Society", *RESOURCES and ENERGY*, Vol. 9, pp. 55-73.
- Wall, G. (1988) "Exergy Flows in Industrial Processes", *ENERGY*, Vol. 13, No. 2, pp. 197-208.
- Wall, G. (1990 a) "Exergy Conversion in the Japanese Society", *ENERGY*, Vol. 15, No. 5, pp. 435-444.
- Wall, G. (1990 b) "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. (1990 c) "Exergilära", kompendium, Högskolan Eskilstuna/Västerås.
- Wall, G. (1990 d) "Ta miljöproblemen på allvar!" *Miljö i Sverige*, vol. 18, nr. 7, s. 28, 1990 och *Sveriges Natur*, vol. 82, nr. 1, 1991 en förkortad version i *Vestmanlands läns tidning*, 5 januari 1991, s. 2.
- Wall, G. (1991 a) "On the Optimization of Refrigeration Machinery", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 14, pp. 336-340.
- Wall, G. (1991 b) "Naturliga fysiska resurser", kompendium i alternativa energisystem, Högskolan i Eskilstuna/Västerås.

- Wall, G. (1991 c) "Sverige/Japan — en skrämmande jämförelse", presentation vid konferensen "Den krackelerande välfärdsstaten", 6 november 1991, Gävle. Förkortade versioner av denna presentation har också publicerats i Göteborgs Posten 1991-12-12 och Ny Teknik • Teknisk Tidskrift 1992:1-3, s. 2 och 1992:12, s. 2, Stockholm.
- Wall, G. (1992) *Exergi och helhetssyn — en tillämpning på Göteborg*, underlagsmaterial 6:92 till översiktsplan för Göteborg, Stadsbyggnadskontoret, Göteborg.
- Wall, G. och Cardfelt, H. (1988) "Exergistudie av Slakthusets industriområde i Västerås", 62 s., Göteborg Energi AB.
- WEC (1986) Frisch, J-R. *Future stresses for energy resources, Energy abundance: myth or reality*, World Energy Conference, Graham & Trotman, Oxford.
- Wilkinson, R.G. (1973) *Poverty and progress*, Methuen, London.
- Wirell, C-A., Lantbruksstatistik, Länsstyrelsen i Västmanlands län.
- Wirén, E. (1990) *Naturresurserna och den regionala planeringen*, rapport 90:7, Forskningsrådsnämnden, Stockholm.
- Östlund, M. et al. (1991) *Energiomsättningen i Västerås kommun 1989*, Högskolan i Eskilstuna/Västerås.