

Exergi — ett användbart begrepp

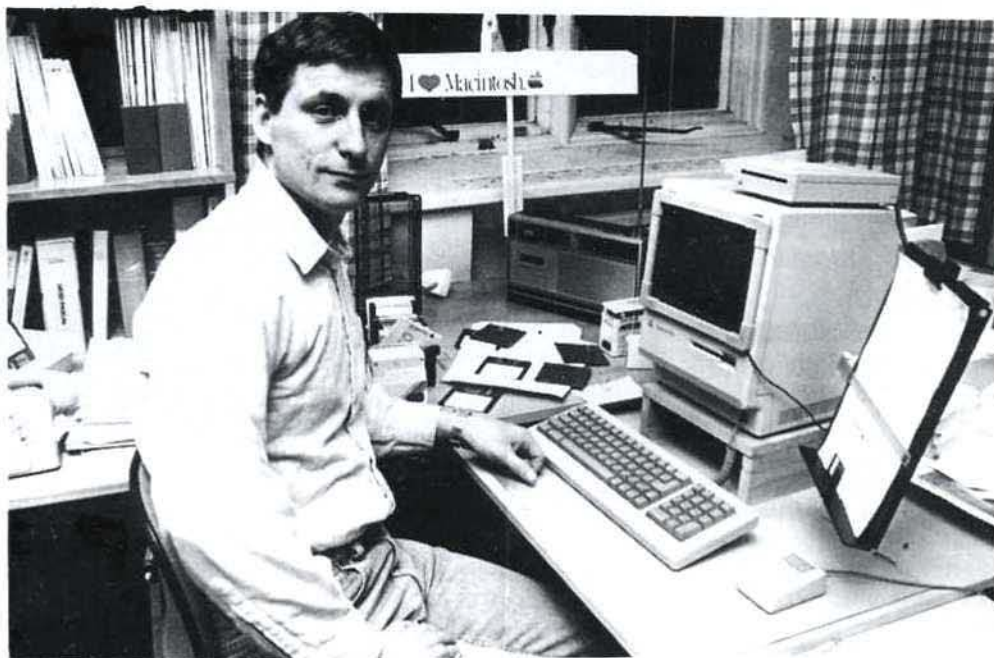
I tre artiklar kommer Göran Wall, forskare på Chalmers, att presentera en del av resultaten och slutsatser från den forskning han bedriver inom ämnet fysiskt resursteori (Wall 1986). I dessa artiklar vill han belysa viktiga brister i framför allt samhällets energiplanering. Artiklarna har följande rubriker och teman:

1. Exergi - ett användbart begrepp. Exergi är ett användbart mått som kan och bör användas vid all energiplanering.

2. Den svenska exergiomsättningen. Användningen av energi- och materialresurser måste beskrivas i ett sammanhang — inte var för sig.

3. Ett resurssnålt hus och samhälle. Vi måste bygga vårt samhälle så att vi tryggar resursförsörjningen och miljön. Vilka slutsatser bör vi dra inför den framtida resursomsättningen i samhället mot bakgrund av vad som presenterats i de två första artiklarna.

För mer än elva år sedan, den 18 november 1975, publicerade Svenska Dagbladet en artikel av Hannes Alfvén med rubriken "Exergitredning kan ge ny energipolitik". I denna artikel jämför Alfvén energistatistiken med en felaktig kassabokföring. "Att helt enkelt summerna 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 enkronan (elektricitet) mot femöringar (inomhusvärme), en enkrona för varje femöring. Tyvärr är alltså denna artikel lika aktuell idag.

Begreppet exergi har, mig veterligen, endast förekommit en enda gång i den hyllmeter av statliga energiutredningar 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 energislåg i allmänhet. I en intervju i KOMMUN-aktuellt, nr 3 den 29 januari 1987, påstår de ansvariga politikerna vid energi- och miljödepartementet och

energiexperterna vid statens energiverk och statistiska centralbyrån att exergibegreppet är för svårt för att användas i dessa sammanhang.

Begreppet energi

Energi anges ibland som arbete eller förmåga till arbete. Detta är fel. Energi bör istället anges som rörelse eller förmåga till rörelse. En visserligen mindre specifik men riktig definition. Istället är det exergi som är arbete eller förmåga till arbete, se nedan.

Energi kan inte skapas eller förstöras. Det är nämligen en fundamental naturlag att energin alltid bevaras (termodynamikens 1:a huvudsats). Den fö-

rekommer i olika former av skiftande kvalitet, och energins kvalitet kan förändras. Tabell 1 visar några energiformer efter avtagande kvalitet från "extra prima" till "värdelös". Kvaliteten anges som förhållandet mellan exergi och energi. För värmeenergi varierar kvalitetsindex avsevärt, från 60 för het ånga till 0 för värmestrålning från jorden.

Det är en fundamental naturlag, att exergin — totalt sett — ständigt försämras (termodynamikens 2:a huvudsats), 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

| | ENERGIFORM | EXERGI/ENERGI (%) |
|-------------|----------------------------|----------------------------|
| Extra prima | Lägesenergi ¹ | 100 |
| | Rörelseenergi ² | 100 |
| | Elektrisk energi | 100 |
| | Kärnenergi ³ | ca 95 |
| Prima | Solljus | 93 |
| | Kemisk energi ⁴ | omkring 100 |
| | Het ånga | ca 60 |
| Sekunda | Fjärrvärme | ca 30 |
| | spillvärme | 5 |
| | Värdelös | Värmestrålning från jorden |

¹t ex högt belägna vattenreservoarer

²t ex vattenfall

³energi i kärnbränsle

⁴t ex olja (värdet varierar kring 100 % pga definitionen på energivärdet)

exergin totalt sett minskar.

Begreppet exergi

Exergibegreppet ger ofta en ny bild av resursomsättande system och representerar härigenom ett nytt och för många ovant synsätt. Samtidigt som många brister avslöjas visas också möjligheterna till teknisk effektivisering, vilket alltid är värdefullt. Begreppet är inte nytt, men man kan säga att det återupptäckts. Antalet publikationer inom området har därför ökat dramatiskt under de senaste åren. (Bibliografien i min avhandling (Wall 1986) rymmer närmare 1400 referenser). En orsak är att intresset för effektivisering av energianvändningen ökat i takt med svårigheterna med energiförsörjningen. Trots att begreppet är både fundamentalt och enkelt finns, som sagt, fortfarande ett visst motstånd mot att använda det istället för energibegreppet.

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

$$E = \frac{T - T_0}{T} \cdot Q$$

där E anger exergin (arbete), Q värmemängden, T värmets absoluta temperatur (Kelvin) och T_0 omgivningens absoluta temperatur. Senare resulterade detta i formuleringen av termodynamikens andra huvudsats. 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

$$-e + T\eta - Pv + M_1m_1 + M_2m_2 \dots + M_nm_n$$

denotes the work obtainable by the formation (by a reversible process) of a body of which $e, \eta, v, m_1, m_2, \dots, m_n$ 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, \dots, M_n . (The medium is supposed so large that its properties are not sensibly altered in any part by the formation of the body.)"

Det kom att dröja ända till 1953 innan Z Rant föreslog att detta begrepp skulle benämnas exergi

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 (ion) 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.

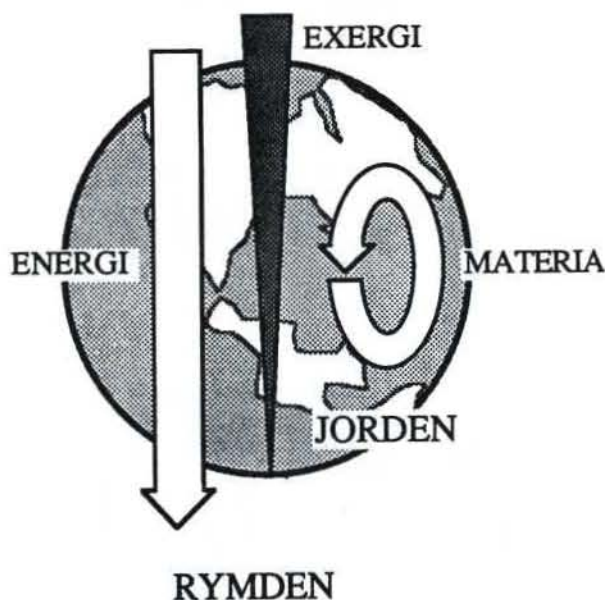
Damit lautet der neue Begriff Exergie: er erfüllt praktisch alle aufgestellten Forderungen, und der Buchstabe x unterscheidet ihn klar vom verwandten Begriff der Energie, so dass trotz der Analogie in der Wortbildung jede Verwechslung ausgeschlossen bleibt. Der Ausdruck kann in jede germanisch, romanische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

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

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

"Die Exergie ist der unbeschränkt, d.h. in jede andere Energieform umwandelbare Teil der Energie;"

SOLEN



Figur 1. Resursflöden av energi och materia drivs av kontrasten mellan solen och rymden.

Dessa tre arbeten utgör 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) samt Moran (1982). 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 useful to engineering for operating and design decisions, including design optimization.

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

Jag tror därför, i motsats till våra energipolitiker och energexperter vid statens

energiverk, att exergibegreppet kommer att vara allmänt accepterat och vara standard vid all beskrivning av energiomsättande system inom en nära framtid.

Exergi — ett mått på kontrast

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 sommar-dag, 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 kontrastrikedomen hittar vi i den av människa orörd naturen. Den som en gång skapat människan, den största kontrasten av allt. Här saknar t o m dagens vetenskap förmåga att uttrycka detta värde.

Solen — vår viktigaste exergikälla

Nästan all exergi, som omsättes i det tunna skikt på jordens yta där liv kan förekomma, härrör från solen. Exergirikt solljus når jorden. En hel del reflekteras, men den som jorden tar upp omsättes och lämnar så småningom jorden som exergitom värmestrålning, figur 1. 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 nedbrytande mikroorganismer.

Den mat som människan lever av är exergi som onvandlats från solljuset via växter och djur. Genom människokroppen blir en del arbete, en del används för att bygga upp or-

ganismen; större delen förbrukas dock i livsprocesserna, då maten blir värme. För de flesta människor på jorden är också solexergi, bunden i ved och organiskt avfall, den främsta yttre värmekällan.

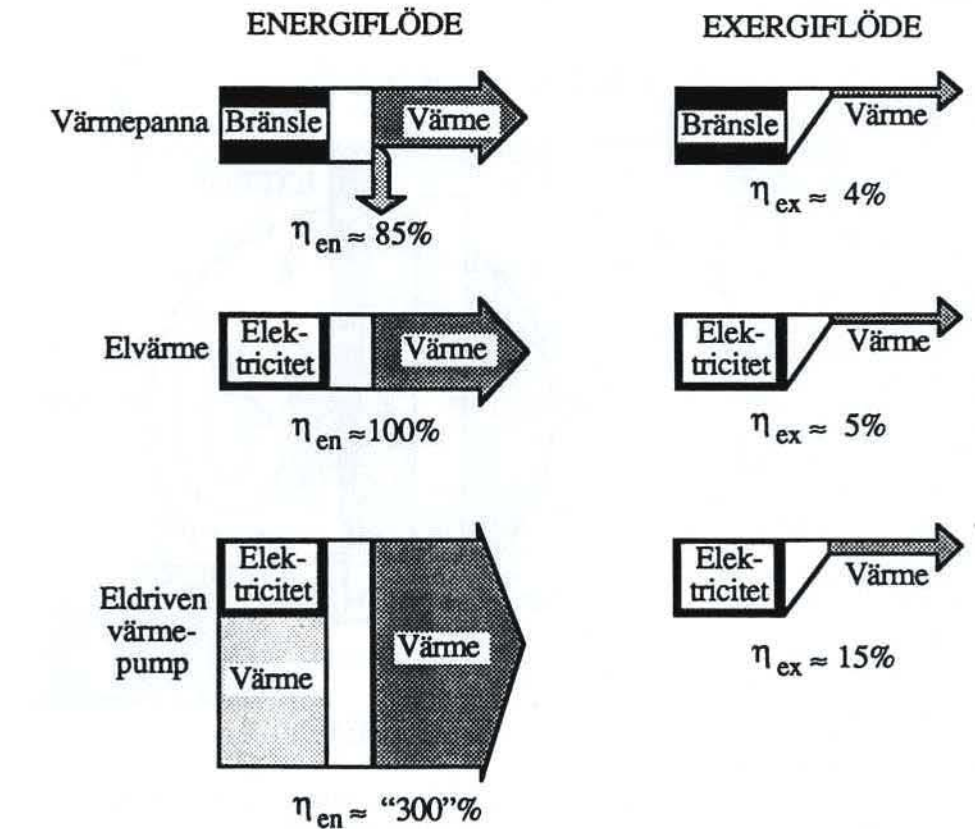
Vissa samhällen, däribland vårt, förbrukar nu som bekant stora mängder lagrad solexergi i form av kol och olja; detta sker mycket snabbare än upplagringen.

Rika fyndigheter av mineraler "kontrasterar" mot omgivningen, mera ju rikare de är. De är också bärare av exergi. Bryter man och använder mineralen finns exergin kvar; sprids det sedan ut och får vittera 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 omgivning — vi värmer våra hus på vintern därför att omgivningen blir kall — innebär användandet av exergibegreppet ett automatiskt hänsynstagande till omgivningen.

Energi eller exergi?

Skillanden i energi- och exergisynsättet och deras respektive verkningsgrader illustreras i figur 2 för tre omvandlingssystem: värmepanna, direktverkande elradiator och eldriven värmepump. I en vanlig värmepanna omvandlas bränsle som olja, ved eller gas till värme. Energi-verkningsgraden är ca 85% men exergiverkningsgraden är endast ca 4%. Detta beror på att vi inte utnyttjar den stora kvalitetsskillnaden mellan bränslet å ena sidan och lågtemperaturvärmes å andra sidan. Elvärme — en form av elektrisk kortslutning — har som vi ser en energi-verkningsgrad av 100%. (Jämför termodynamikens 1:a huvudsats ovan.) Detta är som vi ser av diagrammet för den elektriska värmepumpen ingen övre gräns för energi-



Figur 2. Energi och exergiverkningsgrader för en värmepanna, en direktverkande elradiator och en eldriven värmepump.

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

Exergin utgör själva drivmedlet för system som omsätter energi och material: en levande cell, en maskin, ett

ekosystem eller ett samhälle.

Exergibegreppet bör därför systematiskt användas vid den vetenskapliga beskrivningen av sådana system. I nästa artikel kommer jag att illustrera detta genom att beskriva den svenska resursomsättningen i exergitermer.

För den som vill läsa mer om exergibegreppet hänvisar jag till min avhandling, *Exergy — a Useful Concept, som kan beställas från Chalmers, 412 96 Göteborg. Pris 100 kr.* Referenser — Ahern, J E, 1980, *The Exergy Method of Energy Systems Analysis*, Wiley, N Y. Baehr, H D, 1965; *Energie und Exergie*, VDI-Verlag, Düsseldorf. Carnot, N L S, 1824, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Bachelier, Paris, 1824; Fox, R (ed.), *Librairie Philosophique J Vrin*,

Paris 1978.

Edgerton, R H, 1982, *Available Energy and Environmental Economics*, Lexington Books.

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.

Gibbs, J W, 1873, *Collected Works*, Yale University Press, New Haven 1948. Ursprungligen publicerad i *Trans.Conn.Acad.*, Vol II, sid 382-404.

Moran, M J, 1982, *Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Penner, S., ed., 1980, "Second Law Analysis of Energy Devices and Processes", *Energy*, vol 5 sid 665-1011.

Rant, Z, 1956, *Forschung Ing.-Wesens*, vol 22, nr 36.

Wall, G, 1986, *Exergy - a Useful Concept*, Doktorsavhandling, ca 330 sidor. (Kan beställas direkt från författaren för 100 kr).

Nästa nummer:

Den svenska exergiomsättningen