



Artikelförfattare **GÖRAN WALL**  
Sysselsättning **Docent, fysisk resursteori, Chalmers tekniska högskola**  
Kontakt **gw@exergy.se**

# Livscykelexergianalys ett steg mot hållbar utveckling

XX

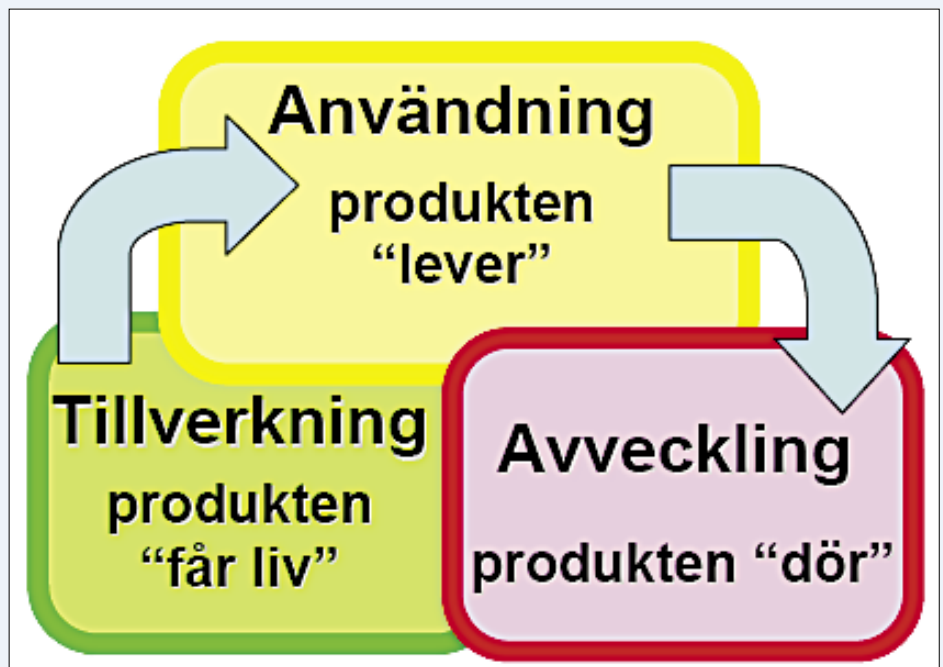
Inför utmaningen att skapa en hållbar utveckling behövs kraftfulla, naturvetenskapligt förankrade begrepp, verktyg och metoder såsom exergi, exergianalys och livscykelexergianalys.

I EN LIVSCYKELANALYS (LCA) uppskattas den totala miljöpåverkan för en produkt under dess hela livscykel, "från vaggan till graven", det vill säga tillverkning, användning och avveckling, se *figur 1*. Detta görs genom att väga samman miljöeffekterna av allt som tillförs och produceras under hela livscykeln. Livscykelanalyser kan göras för både varor och tjänster och visar också var i livscykeln som miljöpåverkan är störst. Arbetet med en LCA består bland annat av att inventera hela produktionskedjan in i minsta detalj för att kartlägga allt som tillförs och lämnar produkten under hela dess livscykel. Därefter uppskattas miljöeffekten för varje enskild detalj i denna kartläggning och den samlade miljöeffekten beräknas genom att väga samman dessa.

Allt fler företag och organisationer gör livscykelanalyser men den anses också av många som för komplex och godtycklig. Ett stort antal sinsemellan helt olika effekter ska ju vägas samman i ett enda tal, så tio olika analyser av samma produkt ger ofta tio olika resultat. Dessa brister till trots innebär analysen en viktig genomlysning av de samlade effekterna från en viss verksamhet.

## Exergi

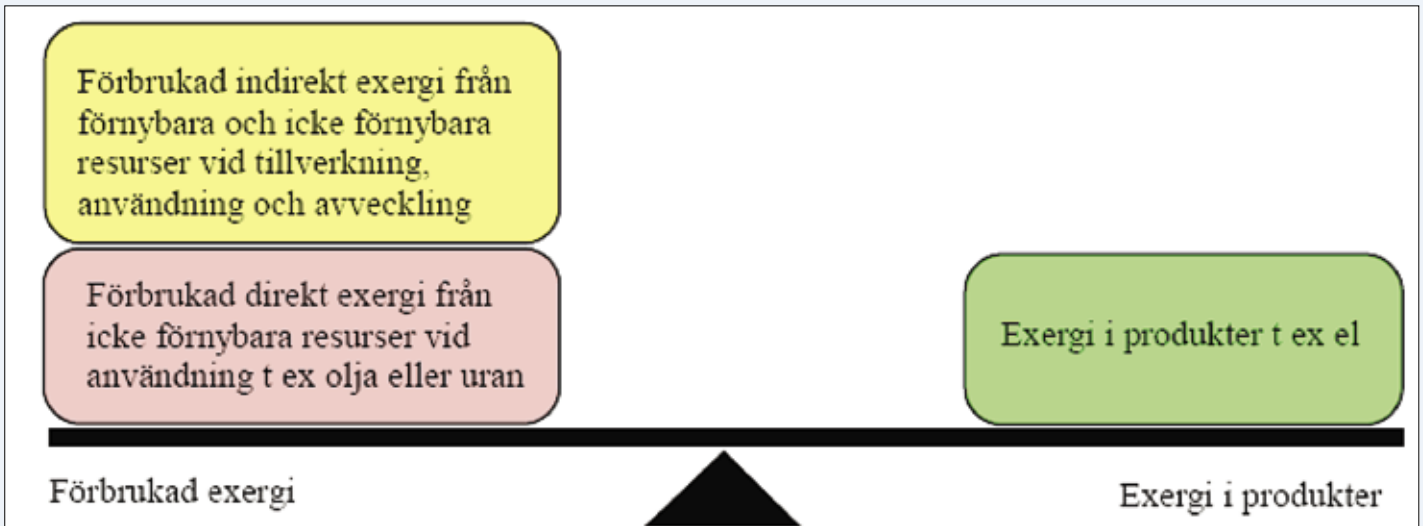
En förbättring av livscykelanalysen är att i stället ange alla in- och utflöden under produktens livscykel i samma storhet, nämligen exergi. Exergibegreppet beskrivs kort-



Figur 1: Livscykelanalys, "från vaggan till graven".

fattat i Energi & Miljö nr 11/2007 och på hemsidan [www.exergy.se](http://www.exergy.se). Hela livscykeln beskrivs då genom dess totala exergiom-sättning. Om vi också skiljer mellan förnybara och icke förnybara resurser får vi en livscykelexergianalys (LCEA) som är ett utmärkt verktyg för att skapa uthålliga energisystem. I ett kraftverk tillförs exergidels direkt, dels indirekt och produkten är

elektricitet eller kraft. Den direkta exergin omvandlas till kraft under dess användningscykel som då olja eller vind blir elektricitet. Den indirekta exergin åtgår för att tillverka, underhålla och avveckla anläggningen och deltar således inte direkt i kraftprocessen. Vid tillverkningen åtgår exergi för att bygga anläggningen och för att sätta den i drift, och en liten del ackumuleras i



Figur 2: Jämförelse mellan förbrukad och producerad exergi.

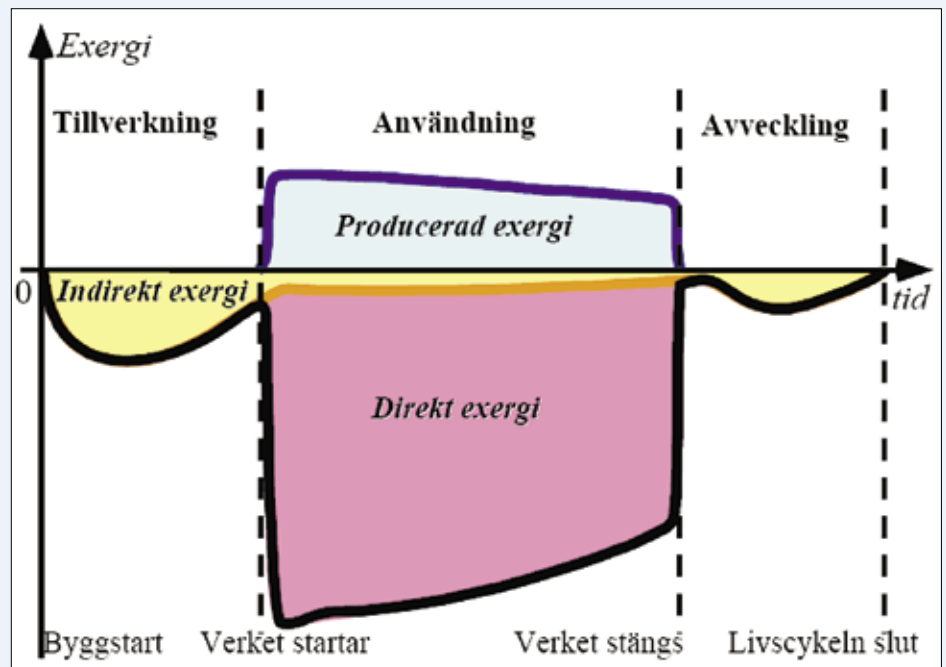
konstruktionen till exempel i stål. Under kraftverkets användningscykel åtgår exergi för att underhålla anläggningen vid sidan av den direkta exergin som omvandlas till kraft. Då anläggningen tjänat ut måste den rivs och allt återställas, vilket kostar exergi. Dessutom kanske restprodukter som kärnavfall måste förvaras under lång tid, vilket också kan kosta stora mängder exergi. Indirekt exergi förbrukas alltså vid tillverkning, användning och avveckling av ett kraftverk. Därtill kommer förbrukning av direkt exergi som omvandlas till kraft i anläggningen.

Vid en livscykelexergianalys jämförs all tillförd exergi, direkt och indirekt, med exergin i produkten. Observera dock att exergi från förnybara resurser som ingår i den direkta exergin inte ska räknas med eftersom de kan betraktas som fria och ändå går förlorade om de inte används, men för den indirekta exergin ska både förnybara och icke förnybara resurser ingå. Om den tillförda exergin är mer än den producerade exergin är verksamheten inte utållig – den förbrukar mer exergi än den levererar som exergi i produkterna, se figur 2, det vill säga verksamheten ”kostar mer än den smakar”.

### Icke förnybart bränsle

Figur 3 visar ett LCEA-diagram för ett kraftverk baserat på ett icke förnybart bränsle som olja eller uran. Längs tidsaxeln anges byggstart, då verket startar, det vill säga börjar leverera elektricitet, då verket stängs av, det vill säga tas ur drift och då det avvecklats och livscykeln är slut. Den vertikala axeln anger exergiomsättningen under verkets hela livscykel, det vill säga från byggstart till livscykelns slut. Under tidsaxeln anges förbrukad exergi och över tidsaxeln anges producerad exergi.

Vid tillverkningen, från byggstart till dess verket tas i drift, ser vi i diagrammet



Figur 3: Livscykelexergianalys av ett kraftverk som drivs med icke förnybara resurser.

att stora mängder indirekt exergi förbrukas. Indirekt exergi förbrukas också, fast i mindre mängder, under användnings- och avvecklingscyklerna. Detta område markerat ”indirekt exergi” i diagrammet anger således den totala mängden förnybar och icke förnybar exergi som verket förmodas förbruka under hela sin livstid.

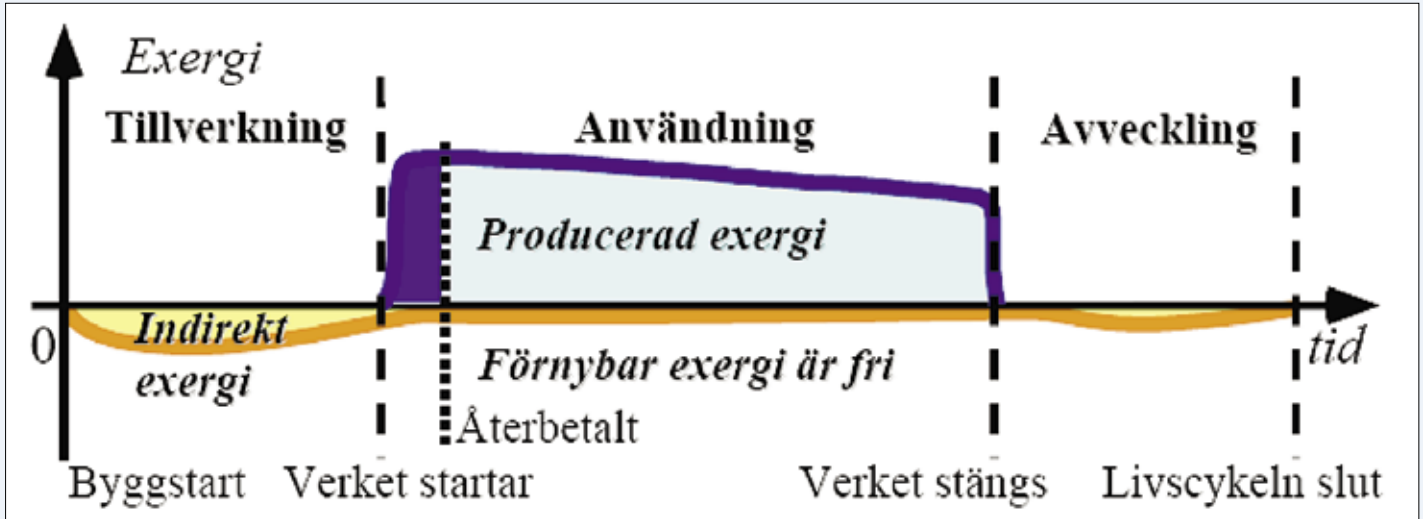
Då verket startas börjar det att producera elektricitet från ett bränsle som olja eller uran. Förbrukningen av bränslet ser vi som det stora området markerat ”direkt exergi” i diagrammet mellan tidpunkterna för då verket startar och stängs. Denna förbrukning antas sjunka något under kraftverkets användningscykel.

Ovanför detta område och ovanför tidsaxeln finns ”producerad exergi”, det vill säga den elektricitet som verket producerar. Vi ser tydligt att detta område är långt mindre

än området för indirekt och direkt exergi under tidsaxeln. Exergitvånet i moderna kraftverk är cirka 40 procent om bränslet är olja och cirka 30 procent om bränslet är uran. Således förbrukar kraftverket långt mer exergi i form av icke förnybara resurser än den exergi som produceras i form av elektricitet. Denna typ av kraftverk är alltså uppenbarligen inte uthålliga och passar således inte i ett hållbart samhälle.

### Förnybar resurs

Figur 4 (nästa sida) illustrerar LCEA-diagrammet för ett kraftverk baserat på en förnybar resurs som vind eller sol. Vi ser att verket endast förbrukar indirekt exergi då den direkta exergin helt utgörs av förnybar exergi, vilken inte ska tas med i analysen. Det är också uppenbart av diagrammet att kraftverket producerar mer exergi än vad



Figur 4: Livscykelexergianalys av ett kraftverk som drivs med förnybara resurser.

det förbrukar som förnybara och icke förnybara resurser. Området över tidsaxeln är ju större än området under densamma. Den totalt förbrukade indirekta exergin motsvarar endast en mindre del av den producerade exergin. Efter en viss tid, markerat som "återbetalt" i diagrammet är den uppskattade totala förbrukningen av indirekt exergi återbetald och därefter kommer kraftverket att producera ett exerginetto. För moderna vindkraftverk kan denna tid motsvara några månader av normal drift, vilken kan uppgå till tiotals år. Vindkraftverk är alltså exempel på en uthållig energiförsörjningsteknik som passar bra in i ett hållbart samhälle.

Det är dock inte självklart att ett energiförsörjningssystem som baseras på förnybara resurser är uthålligt. För en solfångare åtgår ofta stora mängder energi av hög kvalitet, det vill säga elektricitet och värme vid höga temperaturer, vid tillverkningen av glas och metaller. Den producerade exergin däremot utgörs av varmt vatten vid kanske 50 graders temperatur, det vill säga energi med lågt exergivärde. Det är inte självklart att exergin i det producerade heta vattnet överstiger exergin i de lagrade resurser som åtgått för tillverkning, underhåll och avveckling.

Det finns exempel på solfångare som inte ens kommer att kunna betala tillbaka den exergi som åtgått för dess tillverkning under sin livstid. En sådan solfångare är alltså också, precis som ett oljeeldat kraftverk, exempel på en misshushållning med våra resurser och inte uthållig. På liknande sätt kan dagens satsning på biobränslen för transporter ifrågasättas. En livscykelexergianalys av svensk etanolproduktion för drivmedel i transportsektorn skulle ge en tydlig bild av dess roll för att skapa ett uthålligt samhälle. En livscykelexergianalys kommer förmodligen att visa att många biobränslen är en ren förlustaffär ur miljösynpunkt då de förbrukar mer exergi som icke förny-

bara resurser än vad de sparar genom att ersätta bensin och diesel som drivmedel. Biobränslen måste med nödvändighet inte vara hållbara bara för att de nyttjar förnybara resurser eftersom de samtidigt förbrukar stora mängder lagrade resurser och kanske ödelägger odlingsbar mark eller tar marken från annan gröda som mat.

Det kan således visa sig vara mer miljövänligt att använda fossila drivmedel i stället för biobränslen, även om båda dessa är ohållbara på sikt. Det är också viktigt att förnybara resurser utnyttjas på sådant sätt att förnybarheten består. Skogsavverkningen i många länder uppfyller inte alltid detta krav utan måste ses som en utarmning med stora åtföljande miljökonsekvenser.

### Analyserna viktiga redskap

Således är livscykelexergianalys-diagram utmärkta hjälpmedel för att skilja uthållig teknik från icke uthållig teknik. Livscykelexergianalys är viktiga redskap för att skapa uthålliga system, särskilt uthålliga energiförsörjningssystem. En solfångare är till exempel inte med nödvändighet uthållig. Livscykelexergianalys måste därför tillämpas som en självklar del i att utveckla ett hållbart samhälle för att undvika denna typ av misshushållning av våra gemensamma resurser.

Hållbar teknik kan definieras som teknik som baseras på nyttjandet av förnybara resurser på sådant sätt att förbrukningen av icke förnybara resurser kan återbetalas. För att vara verkligt uthålligt måste den nyttjade lagrade resursen helt återställas, eller ännu bättre inte utnyttjas alls. Detta medför att den indirekta exergin som används till alla delar måste härröra från förnybara resurser. Genom att använda livscykelexergianalys och skilja på förnybara och icke förnybara resurser har vi ett utmärkt hjälpmedel för att skapa ett verkligt uthålligt samhälle. \*

” En livscykelexergianalys kommer förmodligen att visa att många biobränslen är en ren förlustaffär ur miljösynpunkt då de förbrukar mer exergi som icke förnybara resurser än vad de sparar genom att ersätta bensin och diesel som drivmedel. Det kan således visa sig vara mer miljövänligt att använda fossila drivmedel i stället för biobränslen, även om båda dessa är ohållbara på sikt.