OKTOBER 1998

ECN-I--98-048

ECO-EFFICIENCY VAN EEN CHEMISCHE WARMTEPOMP

S. SPOELSTRA

The Netherlands Energy Research Foundation ECN is the leading institute in the Netherlands for energy research. ECN carries out basic and applied research in the fields of nuclear energy, fossil fuels, renewable energy sources, policy studies, environmental aspects of energy supply and the development and application of new materials.

ECN employs more than 700 staff. Contracts are obtained from the government and from national and foreign organizations and industries.

ECN's research results are published in a number of report series, each series serving a different public, from contractors to the international scientific world.

The I-series is for internal reports that contain results mainly of interest for (fellow) colleagues, principally within ECN but also for those employed elsewhere. Although these reports may not be in their final form, they may be referred to.

Het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) is het centrale instituut voor onderzoek op energiegebied in Nederland. ECN verricht fundamenteel en toegepast onderzoek op het gebied van kernenergie, fossiele-energiedragers, duurzame energie, beleidsstudies, milieuaspecten van de energievoorziening en de ontwikkeling en toepassing van nieuwe materialen.

Bij ECN zijn ruim 700 medewerkers werkzaam. De opdrachten worden verkregen van de overheid en van organisaties en industrieën uit binnen- en buitenland.

De resultaten van het ECN-onderzoek worden neergelegd in diverse rapportenseries, bestemd voor verschillende doelgroepen, van opdrachtgevers tot de internationale wetenschappelijke wereld.

De I-serie is de serie interne rapporten die resultaten bevat bestemd voor de ECN-collega's, maar ook voor vakcollega's die elders werkzaam zijn. Deze rapporten hebben een minder definitief karakter, maar zijn wel refereerbaar.

Revisies		
A	Concept versie	1 september 1998
B	Tweede concept versie	15 september 1998
1	Definitieve versie	1 oktober 1998

Gemaakt door 1/10/98 S. Spoelstra	**Goedgekeurd door** P.T. Alderliesten 1/10/98	ECN Energie Efficiency
Gecontroleerd door J. Hugill	**Vrijgegeven door** 01-10-98 S. Spoelstra	Industriële Processen

This report is available from the library of ECN,
tel. +31 224 564328 or fax +31 224 561156

© Netherlands Energy Research Foundation ECN

Dit rapport kunt u bestellen bij de bibliotheek van ECN,
tel. (0224) 56 43 28 of fax (0224) 56 11 56

© Energieonderzoek Centrum Nederland

SAMENVATTING

Dit rapport behandelt een vijftal analyses die zijn uitgevoerd voor een chemische warmtepomp en een gasgestookte boiler als alternatief hiervoor. Deze analyses hebben betrekking op energieverbruik, milieueffecten, uitputting grondstoffen en kosten. Deze analyses zijn bedoeld als test case om de gehanteerde methodieken te testen.
De uitgevoerde analyses zijn: (1) exergie-analyse, (2) levenscyclusanalyse (LCA), (3) exergetische LCA, (4) levenscycluskosten (LCC) analyse en (5) exergo-economische analyse.
Absolute conclusies ten aanzien van de resultaten zijn niet goed te trekken vanwege het feit dat weinig inspanning is verricht naar het verkrijgen van allerlei goed onderbouwde invoerinformatie omdat het hier slechts om het testen van de methodieken gaat.
De resultaten laten echter zien dat voor de vergelijkende analyses LCA, ELCA en LCC, de gasgestookte boiler beter scoort op het gebied van economie. De chemische warmtepomp leidt echter tot minder milieubelasting en minder grondstoffengebruik (ELCA). De overige twee analyses (exergie en exergo-economisch) geven aan in welke richting het ontwerp van de chemische warmtepomp aangepast zou kunnen worden om tot een energetisch en kostenoptimaal ontwerp te komen.

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING 5

2. SYSTEEMBESCHRIJVING 7

3. ANALYSES 9

3.1 Exergie-analyse 9
3.2 Levenscyclusanalyse (LCA) 10
3.3 Exergetische LCA 11
3.4 Levenscyclus kostenanalyse (LCC) 11
3.5 Exergo-economische analyse 12

4. RESULTATEN 15

4.1 Exergie 15
4.2 LCA 17
4.3 ELCA 21
4.4 LCC 22
4.5 ExEco 24

5. CONCLUSIES & AANBEVELINGEN 27

6. REFERENTIES 29

APPENDIX A: ECO-INDICATOR '95 31

APPENDIX B: KOSTENBEREKENINGEN 33

APPENDIX C: RELATIE TUSSEN DIVERSE STROMEN 41

1. INLEIDING

Bij het streven naar een duurzame economische ontwikkeling vindt economische groei plaats in combinatie met een daling van de milieudruk. Economie en ecologie moeten samengaan bij deze ontwikkeling waarbij in de behoeften van de huidige generatie wordt voorzien zonder daarmee toekomstige generaties de mogelijkheden te ontnemen ook in die behoeften te voorzien. Dit vergt van het bedrijfsleven een strategisch bedrijfsmilieubeleid waarin de relatie wordt versterkt tussen de producten en processen enerzijds en het grondstoffen- en energieverbruik en de emissies anderzijds.

In [1] wordt bijvoorbeeld aangegeven hoe milieumaatregelen afgewogen kunnen worden op basis van kosteneffectiviteit. Probleem daarbij is de weging van de verschillende milieueffecten om tot één vergelijkingswaarde te komen. In [1] worden een aantal methoden genoemd om hiertoe te komen. Eén hiervan is de eco-indicator waarbij met behulp van levenscyclusanalyse (LCA) en een weging van de milieueffecten één indicator voor een bepaald productieproces/product bepaald wordt. De beschikbaarheid van de benodigde grondstoffen en energie worden hierbij echter niet meegenomen. Bij het streven naar een duurzame samenleving waarbij zo min mogelijk verbruik plaatsvindt van de aanwezige hulpbronnen (grondstoffen en energie) moeten deze zaken echter wel in de beschouwing worden meegenomen. Daarnaast zijn kosten van diverse opties vaak cruciaal voor de keuze die gemaakt wordt voor een bepaald productieproces.

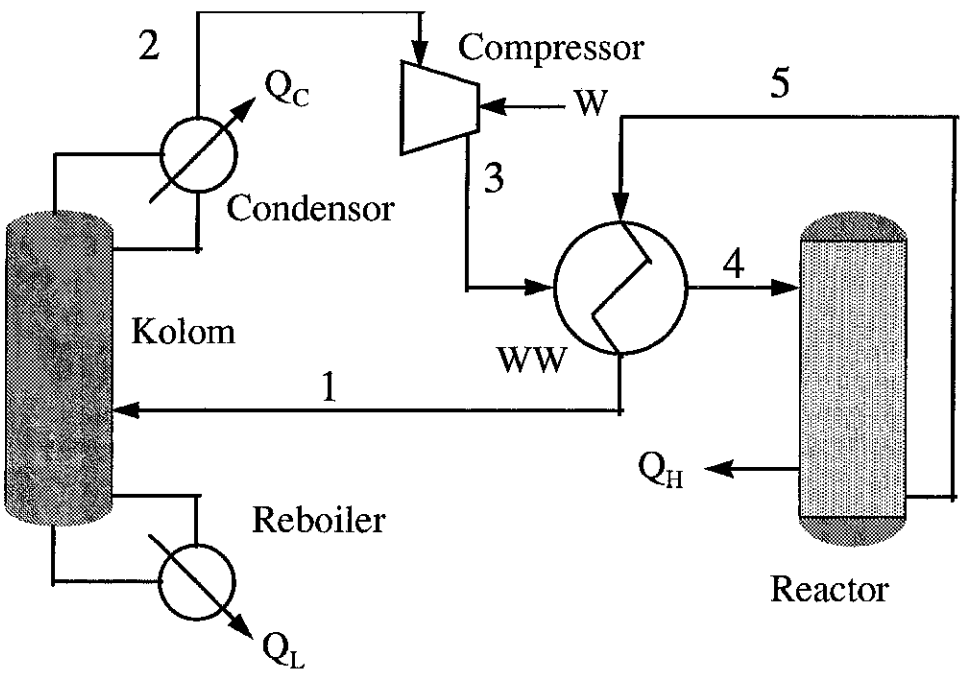
Bij het implementeren van een duurzaamheidsstrategie bestaat er behoefte aan een instrument om de verschillende producten/processen met elkaar te vergelijken ten aanzien van de mate van duurzaamheid of eco-efficiency. Voor ECN is het belangrijk te weten welke factoren hierin belangrijk zijn en welke indicatoren het best gebruikt kunnen worden om zodoende de industrie te overtuigen van het voordelen van alternatieve producten/processen.

Binnen dit project worden een aantal vergelijkende analyses gemaakt voor twee verschillende systemen met dezelfde functionaliteit. Daarbij wordt een vergelijking gemaakt met betrekking tot energieverbruik, materiaalgebruik, milieueffecten en kosten. De doelstelling van dit project is na te gaan wat de meest effectieve indicator voor eco-efficiency is. Dit gebeurt aan de hand van het uitvoeren van een aantal analyses aan een case waarin zowel economie als energieverbruik en milieubelasting worden gekwantificeerd. Dit project is uitgevoerd voor een tweetal cases. De eerste case betreft een chemische warmtepomp die momenteel binnen de werkeenheid Thermal Matching van ECN-EE in ontwikkeling is. De tweede case betreft een productieproces bij Shell Pernis. De eerste case wordt beschreven in dit rapport.

In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van de te analyseren chemische warmtepomp alsmede het alternatieve systeem. Hoofdstuk 3 beschrijft de verschillende analyses die in dit rapport uitgevoerd worden. De resultaten van de diverse analyses worden in hoofdstuk 4 gepresenteerd. Hoofdstuk 5 tenslotte geeft de conclusies weer.

2. SYSTEEMBESCHRIJVING

Het doel van een warmtepomp is het opwaarderen in temperatuurniveau van laagwaardige restwarmte. Hiervoor is veelal een kleinere hoeveelheid hoogwaardige (elektrische bijvoorbeeld) energie nodig. De verhouding tussen de hoeveelheid warmte die vrijkomt op een hoger temperatuurniveau en de toegevoerde hoogwaardige energie wordt de Coëfficiënt of Performance (COP) genoemd. Over het algemeen geldt voor warmtepompen hoe hoger de temperatuurlift, hoe lager de COP-waarde.
Binnen de werkeenheid Thermal Matching van ECN-EE wordt gewerkt aan een chemische warmtepomp (CWP) die gebaseerd is op reversibele chemische reacties. Voordeel van dit type warmtepomp is dat veel hogere temperatuurliften mogelijk zijn dan met conventionele typen zonder dat dit ten koste van de COP-waarde gaat. Ook is het door keuze van een geschikt werkstoffenpaar mogelijk om in een veel hoger temperatuurgebied te opereren.
Het systeem waar op dit moment aan wordt gewerkt is het isopropanol/aceton+waterstof systeem. Figuur 2.1 geeft een stroomschema weer van dit systeem.



Figuur 2.1: *Stroomschema chemische warmtepomp.*

In dit systeem wordt bij een temperatuur van 80 °C isopropanol onder invloed van een katalysator omgezet in aceton en waterstof. Met behulp van destillatie worden de aceton en isopropanol gescheiden. Door deze combinatie van reactie en scheiding in één apparaat (reactieve destillatie) wordt het evenwicht naar de productenkant verschoven. Deze "truc" maakt het CWP concept mogelijk. Het aceton-waterstof mengsel (en een kleine hoeveelheid isopropanol) wordt m.b.v. een compressor via een warmtewisselaar naar de hydrogeneringsreactor geleidt. Daar reageren aceton en waterstof terug naar isopropanol. Deze reactie vindt

eveneens onder invloed van een katalysator plaats en is exotherm. Het is mogelijk deze warmte op een temperatuurniveau van 200 °C beschikbaar te krijgen. Enkele kentallen voor dit systeem zijn hieronder weergeven. Het systeem wordt rond atmosferische druk bedreven en er is aangenomen dat de drukval in het systeem 0.5 bar bedraagt.

Restwarmtestroom 80 °C	:	4	MW
Afkoeling restwarmte	:	10	°C
Compressorvermogen	:	0.14	MW
Condensorvermogen	:	3.14	MW
Vrijkomende warmte 200 °C	:	1	MW
Temperatuurlift	:	120	°C
Energetische rendement	:	0.25	
COP	:	7.1	

Een alternatief voor dit systeem is dat de 1 MW warmte op 200 °C in de vorm van stoom geleverd wordt door een aparte boiler. Deze boiler kan dan olie- of gasgestookt zijn. Er van uitgaande dat het boilerrendement 85 % bedraagt moet er (1/0.85) * 1 MW = 1.18 MW aan aardgas/olie toegevoegd worden. Voor Nederlands aardgas (LHV = 31.65 MJ/m^3) betekent dit een flow van 0.037 m^3/s. Voor olie is deze flow afhankelijk van de kwaliteit van de olie. In dit rapport wordt uitgegaan van een gasgestookte boiler, tenzij anders vermeld.

De warmte die in de vorm van verzadigde stoom op 200 °C (circa 15 bar) wordt geleverd is 1 MW. Dit correspondeert met een stoomflow van 0.41 kg/s of 12330 ton/jaar.

3. ANALYSES

Binnen dit project zijn een vijftal analyses gedefinieerd. In dit hoofdstuk zal nader worden ingegaan op de achtergrond van deze analyses zonder de pretentie te hebben goede tekstboeken hieromtrent te herhalen.

3.1 Exergie-analyse

Exergie is een begrip uit de thermodynamica dat ontstaat door een combinatie van de eerste en tweede hoofdwet. Exergie is een maat voor de kwaliteit van energie en correspondeert met de maximaal hoeveelheid arbeid die uit een hoeveelheid energie kan worden verkregen door een stroom via reversibele processen in evenwicht te laten komen met de omgeving. In werkelijkheid treden altijd irreversibele processen op waardoor exergie, in tegenstelling tot energie, verloren gaat.

Een exergie-analyse verschaft inzicht in de prestatie van diverse processen. Het lokaliseert de plek binnen het proces waar de verliezen optreden. Een vermindering van exergieverliezen leidt automatisch tot een vermindering van de benodigde primaire brandstoffen voor dat proces. De toepassing van exergie-analyses hebben tot op heden meestal betrekking op energieconversie-processen. De laatste jaren vindt er meer toepassing plaats op chemische processen.

De hoeveelheid exergie kan worden onderverdeeld in fysische-, meng- en chemische exergie.
De fysische exergie is de maximale hoeveelheid arbeid die uit een stroom kan worden verkregen door deze in thermisch en mechanisch evenwicht (p_0,T_0) met de omgeving te laten komen.
De mengexergie is de minimale hoeveelheid arbeid die nodig is om een mengsel vanuit thermisch en mechanisch evenwicht (p_0,T_0) te scheiden in de afzonderlijke componenten of de maximale hoeveelheid arbeid die vrijkomt uit een dergelijk proces.
De chemische exergie is de maximale hoeveelheid arbeid die uit een stof kan worden verkregen door deze vanuit thermisch en mechanisch evenwicht (p_0,T_0) in chemisch evenwicht met de in de omgeving voorkomende stoffen te laten komen. Andersom geredeneerd is het de minimale hoeveelheid arbeid die nodig is om de stof te creëren vanuit de stoffen aanwezig in de omgeving.

Uit bovenstaande blijkt dat het zeer belangrijk is om de omgevingstoestand vast te leggen. Deze referentiecondities worden in navolging van [2] gedefinieerd als: p_0 = 1.01325 bar, T_0 = 298.15 K. Referentie [2] geeft ook aan wat de referentiestoffen en hun concentraties zijn in de omgeving ten behoeve van de chemische exergie berekening. In [2] zijn tabellen opgenomen waarin van een groot aantal organische en anorganische verbindingen de standaard chemische exergie staat vermeld.

Tekstboeken hieromtrent zijn bijvoorbeeld de al genoemde [2] of [3, 4].

3.2 Levenscyclusanalyse (LCA)

Een Life Cycle Assessment of een milieugerichte levenscyclusanalyse is een van wieg-tot-graf benadering van een product/proces. Het omvat de productie-, gebruiks- en afdankfasen van een product/proces. Voor iedere levensfase worden de milieueffecten in kaart gebracht. Het doel van een LCA is het beoordelen of vergelijken van een product of proces. De methodiek voor het uitvoeren van een LCA heeft al enige ontwikkeling doorgemaakt en binnen Nederland bestaat er een goede handleiding hiervoor [5, 6]. Voor energietechnologie is er nog een aparte methodiek [7] omschreven die echter niet wezenlijk afwijkt van de CML handleiding. In [8] is een LCA beschreven voor een warmtepomp.
Een LCA bestaat uit de volgende componenten.

Doelbepaling
Binnen deze component wordt bepaald wat de toepassing is van de LCA. Hierbinnen valt de keuze van de doelstelling (productinformatie, productinnovatie, productregulering, beleidsstrategieën), de doelgroep (consumenten, producenten, overheden) en de diepgang van de studie. Ook wordt de functionele eenheid gedefinieerd van het te bestuderen systeem. De functionele eenheid omschrijft de centrale functie die een product/proces vervult en hoeveel er van deze functie in beschouwing wordt genomen.

Inventarisatie
In deze component wordt een overzicht samengesteld van de processen die de levenscyclus realiseren, de zogenoemde procesboom. Hierbij wordt vastgelegd wat de systeemgrenzen zijn waarvoor de LCA wordt uitgevoerd. Van alle meegenomen (economische) processen worden de procesgegevens verzameld. Dit betreft gegevens over de in- en uitstromen met de economie (goederen, diensten, materialen, energie, te verwerken afval) en in- en uitstromen met het milieu (grondstoffen, energiedragers, ruimte, emissies, straling, geluid, warmte, licht, calamiteiten). Hierna moeten de toerekeningsregels toegepast worden. Deze zijn van belang indien een proces meerder economische producten levert. Als laatste stap binnen deze component wordt de zogenoemde ingreeptabel opgesteld. Per functionele eenheid worden alle milieuingrepen van alle processen zo veel mogelijk gekwantificeerd.

Classificatie
Binnen de classificatie wordt een vertaling gemaakt van de milieuingrepen van een functionele eenheid product naar relevante milieueffecten. Deze milieueffecten geven de bijdrage weer aan milieuproblemen als verzuring, broeikaseffect, aantasting ozonlaag, etc. Voor elk milieuprobleem zijn classificatiefactoren bepaald die aangeven hoe zwaar een bepaalde emissie bijdraagt aan dat milieuprobleem. Nadat dit voor ieder milieuprobleem is gedaan is het milieuprofiel ofwel tabel met effectscores bekend. Om de effectscores onderling te kunnen vergelijken worden ze genormaliseerd. Dit betekent dat de bijdrage van een bepaald product/proces aan een milieueffect wordt gerelateerd aan de bijdrage van een bepaalde gemeenschap gedurende een bepaalde tijd aan hetzelfde probleem.

Evaluatie
In de evaluatie vindt de uiteindelijke beoordeling plaats van het milieuprofiel zoals dat in de classificatie is vastgesteld. Hierbij is het onderlinge gewicht van de effectscores van belang. De Eco-indicator methode is een manier om de verschillende milieueffecten te wegen om tot één getal voor de totale milieubelasting te komen.

De hiervoor genoemde componenten kunnen gevolgd worden door een verbeteranalyse waarin de in de voorgaande fasen verzamelde kennis wordt gebruikt om tot proces/product verbetering te komen.
De analyses in dit rapport zijn uitgevoerd met het commercieel verkrijgbare software pakket SimaPro, versie 4.0, zie [9, 10].

3.3 Exergetische LCA

De exergetische LCA of ELCA-methodiek wordt geclaimd te zijn ontwikkeld aan de UT, zie [11]. In feite is er echter ook al eerdere literatuur waarin dezelfde concepten worden getoond, [12, 13]. Het doel van een ELCA is om de mate van uitputting van grond- en brandstoffen voor de gehele levenscyclus van producten/processen te bepalen. Het is dus geen methodiek om milieueffecten te bepalen. Een variant op deze methodiek is de "Zero-ELCA" waarbij emissies vertaald worden naar de hoeveelheid exergie die nodig is om de emissies tot nul te reduceren.
Exergie wordt in deze methodiek gebruikt als een maat voor de uitputting van zowel energie als materialen. De reden hiervoor is dat exergie, in tegenstelling tot energie en materialen (nucleaire reacties uitgezonderd), verbruikt wordt. Het gaat uiteindelijk om de bruikbaarheid of kwaliteit van de energie & materialen. Het erts waaruit een materiaal voorkomt is zelf van lage kwaliteit. Er moet eerste exergie toegevoerd worden om van het erts een bruikbaar materialen te verkrijgen. Door nu zowel energie- als materiaalstromen in exergie-eenheden uit te drukken wordt één getal verkregen voor de uitputting van deze bronnen.

3.4 Levenscyclus kostenanalyse (LCC)

Een levenscyclus kostenanalyse of "Life Cycle Costing (LCC)" analyse kijkt naar de totale kosten over de hele levensduur van een installatie. Dit betekent dat niet alleen investeringskosten worden meegenomen, maar ook de installatiekosten en onderhouds- en bedrijfskosten. Tevens wordt rekening gehouden met inflatie en het feit dat geld ook belegd kan worden in plaats van geïnvesteerd.

De volgende principes worden in dit rapport gehanteerd.
- De kapitaalsinvestering per apparaat bedraagt drie keer de apparaatkosten. In deze investering zitten ook de kosten voor de installatie, de pijpen, de instrumentatie en regelingen, elektrische bijbehoren, civiele constructies en engineering & constructie.
- De afschrijvingstermijn is 20 jaar. Over deze 20 jaar wordt lineair afgeschreven.
- Per jaar is 1 % van de kapitaalsinvestering nodig om de eigendomsbelasting en de verzekering te bekostigen.

- De onderhouds- en bedrijfskosten (O&M) vormen bij aanvang 5 % van de kapitaalsinvestering voor de CWP en 1 % voor de gasgestookte boiler.
- De inflatie bedraagt 3 %. De brandstofprijzen stijgen met 4 % per jaar.
- Het disconto (kosten van geld) wordt gesteld op 10 %.
- Er wordt geen rekening gehouden met belasting en gewenste winstpercentages.

Voor ieder van de 20 jaren wordt nu gerekend met een vast bedrag aan afschrijvings- en belasting/verzekeringskosten. De O&M-kosten worden jaarlijks met het inflatiepercentage verhoogd, terwijl de brandstofkosten escaleren met het hiervoor genoemde percentage van 4 %. De som van dit alles geeft de totale kosten voor het specifieke apparaat voor betreffende jaar. De totale kosten zijn niet constant maar lopen gedurende de levensduur op. Om nu met een constant getal te kunnen rekenen wordt een jaarlijkse annuïteit berekend. Eerst worden de kosten C in een bepaald jaar teruggerekend naar het huidige jaar volgens

$$P_m = C_m \frac{1}{\left(1+i_{eff}\right)^m}$$, waarbij m het jaarnummer is en i_{eff} het disconto.

De annuïteit A wordt vervolgens bepaald met

$$A = \frac{i_{eff}\left(1+i_{eff}\right)^n}{\left(1+i_{eff}\right)^n - 1} \sum_{m=1}^{n} P_m$$, waarbij n het totaal aantal jaren is (n=20).

Een veelgebruikt winstgevenheids-criterium is de Netto Contante Waarde (NCW of Net Present Value). Hierbij wordt de contante waarde van een toekomstige cash flow bepaald. De NCW bedraagt de som van de verdisconteerde cash flows over de diverse jaren minus de investering. In formule vorm:

$$NCW = \sum_{m=1}^{m=n} \frac{(CashFlow)_m}{(1+i_{eff})^m} - I ,$$

waarbij I de investering is. De cash flow wordt gegeven door de inkomsten minus de uitgaven. In de uitgaven zitten alleen de vaste en variabele productiekosten en niet de afschrijvingen. Een positieve waarde van NCW betekent dat de investering wordt terugbetaald, het geïnvesteerde kapitaal een rente van i_{eff} %/jr oplevert en nog een extra winst genereert met een contante waarde van NCW.

3.5 Exergo-economische analyse

Exergo-economische of thermo-economische analyse is een combinatie van een exergie analyse en economische principes welke tot inzichten kan leiden die tot een kostenoptimaal systeem leiden. In feite is het een exergie-gestuurde kostenminimalisatie. Het doel van deze analyse kan vierledig zijn, (1) kostenberekening van meerdere producten indien dit het geval is, (2) inzicht verkrijgen in kostenstromen binnen het systeem, (3) optimaliseren van ontwerpparameters voor een enkele component of (4) optimaliseren van het gehele systeem.

Omdat de kosten van jaar tot jaar verschillen wordt bij deze methodiek gebruik gemaakt van constante kosten, de zogenoemde annuïteiten die in sectie 3.4 genoemd zijn.

De in dit rapport gevolgde benadering is gestoeld op [3]. Een kostenbalans voor een systeem of component wordt opgesteld als:

$$\dot{C}_P = \dot{C}_F + \dot{Z}_{CI} + \dot{Z}_{OM}$$

Dit wil zeggen dat de kostenstroom C_P van het product gelijk is aan de bestedingen die gedaan moeten worden om dat product te genereren. Deze bestedingen zijn de brandstofkosten C_F (fuel) en de kostenstromen met betrekking tot de kapitaalsinvestering Z_{CI} en het bedrijf en onderhoud Z_{OM}. Deze laatste twee termen worden vaak in één term samengevoegd.

Een belangrijke aanname in dit soort analyses is te veronderstellen dat de kosten van een stroom binnen het systeem evenredig is met de exergie van die stroom. De redenatie hierachter is dat exergie de ware waarde vertegenwoordigd van een stroom. De kostenstroom C wordt dan uitgedrukt in de gemiddelde kosten per exergie-eenheid (fl/MJ), vermenigvuldigd met de exergiewaarde van die stroom.

Voor iedere component in het systeem wordt nu een kostenbalans opgesteld die er in algemene vorm voor component k als volgt uitziet:

$$\sum_e (c_e \dot{E}x_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}x_{q,k} + \sum_i (c_i \dot{E}x_i)_k + \dot{Z}_k \ ,$$

waarbij subscripts e en i voor respectievelijk de uit- en ingaande stromen staan. Subscript w heeft betrekking op gegenereerd vermogen terwijl subscript q de toegevoerde warmte betreft.

Van deze vergelijking zijn de exergiewaarden bekend vanuit de exergie-analyse en de Z-waarden vanuit de kostenanalyse. De onbekenden zijn dus de gemiddelde kosten per exergie-eenheid (fl/MJ). Aannemende dat deze kosten voor de ingaande stroom bekend zijn, dan kan met behulp van bovenstaande vergelijking de specifieke kosten van de uitgaande stroom berekend worden. Indien er meerdere uitgaande stromen zijn moeten er additionele vergelijkingen opgesteld worden. Deze extra vergelijkingen zijn gebaseerd op een redenatie over welke stroom de kosten voor een component moet dragen.

Nadat alle vergelijkingen voor iedere component zijn opgelost, zijn de specifieke kosten en daarmee de kostenstromen bekend. Voor de thermo-economische evaluatie van een component zijn nu de volgende vijf kentallen van belang:

- specifieke kosten van de brandstof (fl/MJ)
- specifieke kosten van het product (fl/MJ)
- kosten van exergievernietiging C_D (fl/s)
- het relatieve kostenverschil $r = (c_P - c_F)/c_F$
- exergo-economische factor $f = Z/(Z+C_D+C_L)$, waarbij C_L de kosten van exergieverliezen zijn.

De eerste twee uit dit rijtje volgen uit het oplossen van de vergelijkingen.

Voor de kosten van exergievernietiging zijn twee formuleringen mogelijk. In het geval dat het product vaststaat en de exergievernietiging moet worden gecompenseerd door extra brandstof dan is $C_D=c_F*E_D$. Indien de hoeveelheid brandstof vaststaat leidt de exergievernietiging tot minder product en worden de kosten gegeven door $C_D=c_P*E_D$. Op voorhand is niet aan te geven welke formulering moet worden gebruikt. Normaal gesproken leidt het gebruik van de brandstofkosten tot een lagere schatting dan het gebruik van de productkosten.

Het relatieve kostenverschil geeft aan wat de relatieve verhoging is van de gemiddelde exergiekosten van brandstof en product. Een verhoging van deze kosten wordt veroorzaakt door de kapitaals en O&M kosten van de component

en de kosten van exergieverliezen en -vernietiging. Bij optimalisatie van een component moet deze factor zo klein mogelijk zijn.
De exergo-economische factor f geeft de verhouding weer tussen de niet-exergie gerelateerde kosten (kapitaal, O&M) en de kosten die gepaard gaan met exergieverliezen en -vernietiging. Een lage waarde voor deze factor suggereert een verhoging van de investeringskosten teneinde de component efficiënter te maken. Een hoge waarde suggereert een verlaging van investeringskosten ten koste van de exergetische efficiency.

4. RESULTATEN

De resultaten van de verschillende analyses worden hieronder per sectie weergegeven. De chemische warmtepomp is binnen dit project alleen beschouwd als een soort test case om te kijken hoe de verschillende methodieken werken. Daarom is ook niet getracht met veel inspanning detailgegevens te verzamelen maar is gebruik gemaakt van de tot nu toe beschikbare informatie, zoals grotendeels vastgelegd in referenties [14, 15]. In ieder van de secties zal eerst de gasgestookte boiler behandeld worden waarna de chemische warmtepomp volgt.

4.1 Exergie

Gasgestookte boiler
De exergieanalyse van de gasgestookte boiler is eenvoudig. Bij een boilerrendement van 85 % moet 1.18 MW aan aardgas toegevoerd worden om 1 MW aan warmte te genereren. De overige 0.18 MW gaat met de rookgassen verloren. De rookgassen worden verondersteld een temperatuur van 100 °C te hebben en de samenstelling is dusdanig dat de rookgassen geen chemische exergie meer bevatten. De exergie getallen zijn dan als volgt.

Ex. aardgas	(MW)	1.28
Ex. warmte	(MW)	0.37
Ex. rookgassen	(MW)	0.036
Ex. vernietiging	(MW)	0.684
Ex. efficiency	(%)	28.9

De exergiewaarde van aardgas is gebaseerd op 1.04 * LHV, waarbij de 1.04 afkomstig is uit [2]. Het lage exergetisch rendement wordt veroorzaakt door de grote temperatuurverschillen tussen de vlamtemperatuur en de temperatuur van de uiteindelijk geproduceerde stoom. Het grote temperatuurverschil leidt tot een grote drijvende kracht voor warmteoverdracht maar ook tot grote exergievernietiging.

Chemische warmtepomp
De exergie-analyse van de warmtepomp is met behulp van ASPEN PLUS en de exergie-subroutine EXPEN PLUS door ECN-BCM uitgevoerd, zie [16]. Voor het berekenen van de exergiewaarden van de warmtestromen is de energiewaarde vermenigvuldigd met de Carnot factor $(1 - T_0/T)$. Voor het toegevoerde elektrische vermogen is de exergiewaarde identiek aan de energiewaarde.
De resultaten zijn weergeven in Tabel 4.1. De nummers van de stromen zijn weergegeven in Figuur 2.1. De exergiewaarden van de stromen binnen de CWP zijn zeer groot vanwege de hoge bijdrage van de chemische exergie in de totale exergie.

Tabel 4.1: *Exergiewaarden voor de CWP.*

Stroom	Exergiewaarde (MW)
1	95.130
2	95.537
3	95.643
4	95.802
5	95.388
Q_L	0.62
Q_C	0.12
W	0.14
Q_H	0.37

De exergetische rendementen voor alle componenten zijn bepaald door de exergie van het "product" van een bepaalde component te relateren aan de exergie van de "brandstof". Tabel 4.2 geeft voor ieder van de componenten aan wat als "product" en "brandstof" is gedefinieerd. De hierin benoemde stromen verwijzen wederom naar Figuur 2.1.

Tabel 4.2: *Product- en brandstofstromen voor CWP.*

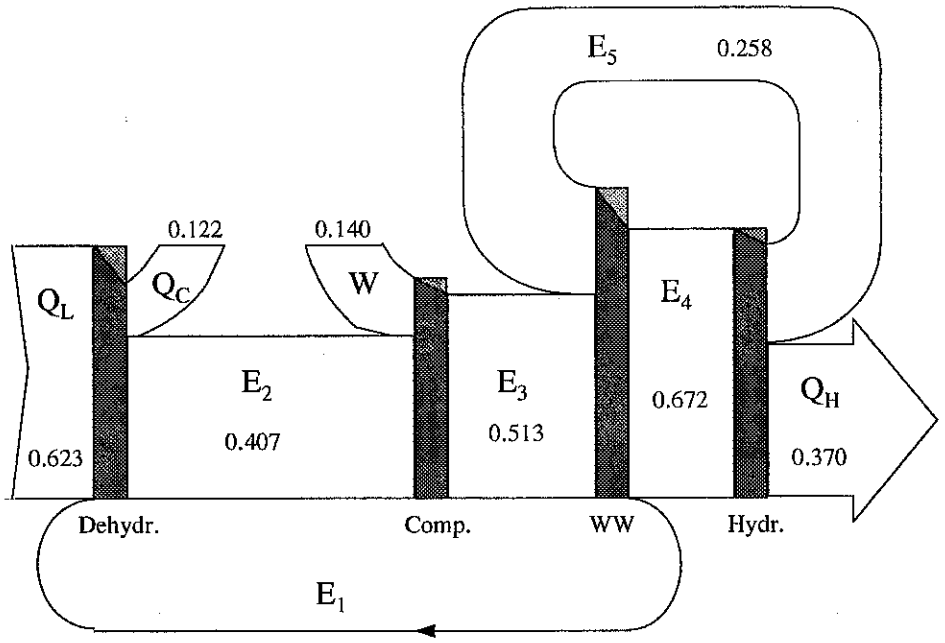
Component	Product	Brandstof
Dehydrogenering	2 - 1	Q_L - Q_C
Compressor	3 - 2	W
Warmtewisselaar	4 - 3	5 - 1
Reactor	Q_H	4 - 5

Dit leidt tot de in Tabel 4.3 genoemde exergievernietiging en exergetische rendementen. De "Destruction Ratio" is gedefinieerd als de verhouding tussen de vernietigde exergie voor een component en de toegevoerde exergie voor het hele systeem, in dit geval Ex_{fuel} van zowel de dehydrogenering als de compressor.

Tabel 4.3: *Exergetische resultaten voor de CWP.*

Component	Ex_{Fuel} (MW)	$Ex_{Product}$ (MW)	$Ex_{Efficiency}$ (%)	$Ex_{Destruction}$ (MW)	Destruction ratio (%)
Dehydrogenering	0.501	0.407	81.2	0.094	14.7
Compressor	0.140	0.106	75.7	0.034	5.3
Warmtewisselaar	0.258	0.159	61.6	0.099	15.4
Hydrogenering	0.414	0.370	89.4	0.044	6.9
Totaal	-	-	57.7	0.271	

In Figuur 4.1 is het exergiestroom- of Grassman diagram weergegeven waarbij de exergiewaarde van stroom 1 op nul is gesteld teneinde het verstoorde beeld, dat ontstaat door de grote chemische exergiewaarde, op te heffen



Figuur 4.1: *Grassman diagram voor de CWP (eenheden in MW).*

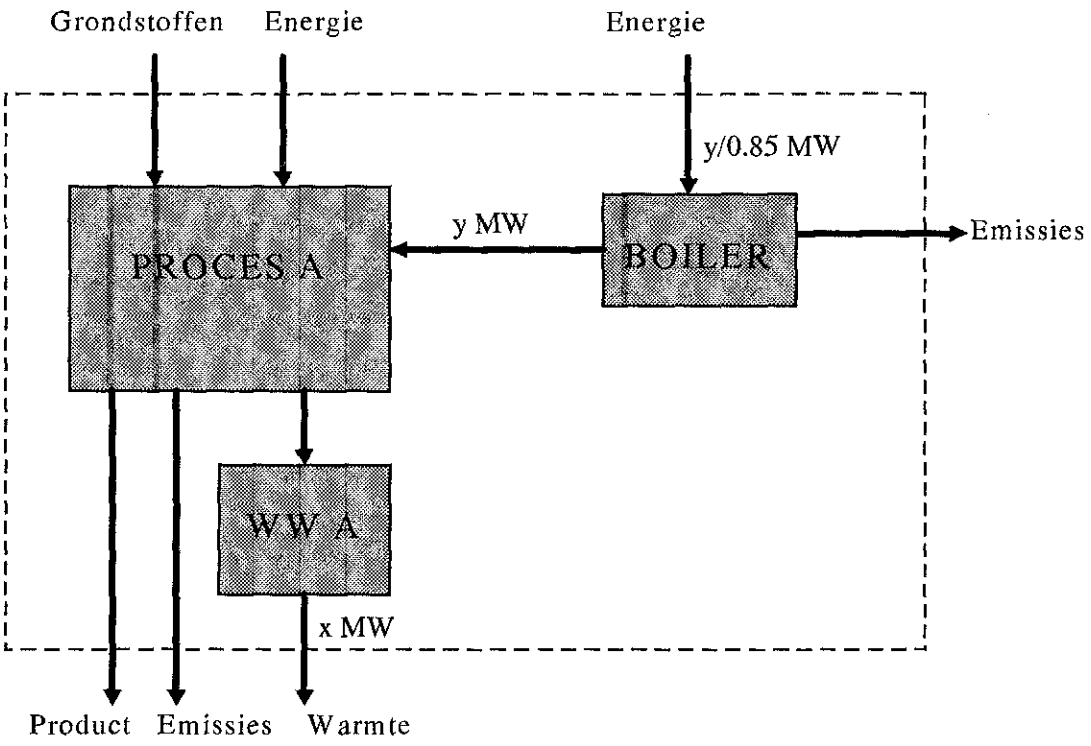
Discussie
De vergelijking van beide systemen op exergetisch gebied valt duidelijk in het voordeel van de CWP uit. Het exergetisch rendement is hoger en de exergievernietiging is lager. Met betrekking tot de CWP gaat de meeste exergie verloren in de dehydrogeneringsreactor en de warmtewisselaar.

4.2 LCA

In de normale levenscyclus van een procesapparaat zijn drie fasen te onderscheiden: de productiefase, de gebruiksfase en de afdankingsfase. In principe zijn voor ieder van de fasen de milieueffecten vast te stellen. In dit rapport wordt alleen de gebruiksfase bekeken. Hiervoor zijn twee redenen aan te geven. De eerste is dat uit vele studies blijkt dat de gebruiksfase door de lange levensduur van een apparaat verreweg de grootste milieubelasting met zich meebrengt, zie bijvoorbeeld [8]. De tweede reden is dat er niet voldoende informatie over de andere twee fasen beschikbaar is om deze praktisch te kunnen uitvoeren binnen dit project. Voor deze LCA worden dus de materiaalhoeveelheden gebruikt voor de constructie van de kapitaalgoederen verwaarloosd.

De LCA die hier uitgevoerd wordt is een vergelijkende LCA waarbij twee verschillende processen op hun milieu-impact vergeleken worden. De functionele eenheid is als volgt vastgelegd:
- leveren van 1 GJ stoom van 200 °C

Gasgestookte boiler
Het processchema zonder warmtepomp is in Figuur 4.2 weergegeven. De boiler is specifiek weergegeven omdat die voor een gedeelte vervangen wordt door de warmtepomp.



Figuur 4.2: *Processchema gasgestookte boiler.*

De boiler heeft een rendement van 85 %. Voor het leveren van 1 GJ stoom is dus 1.18 GJ aan aardgas nodig. Dit correspondeert met 1.18 GJ/31.65 MJ/m^3 = 37.3 m^3 aardgas. In SimaPro wordt gebruik gemaakt van een standaard gasfornuis op Slochteren aardgas.

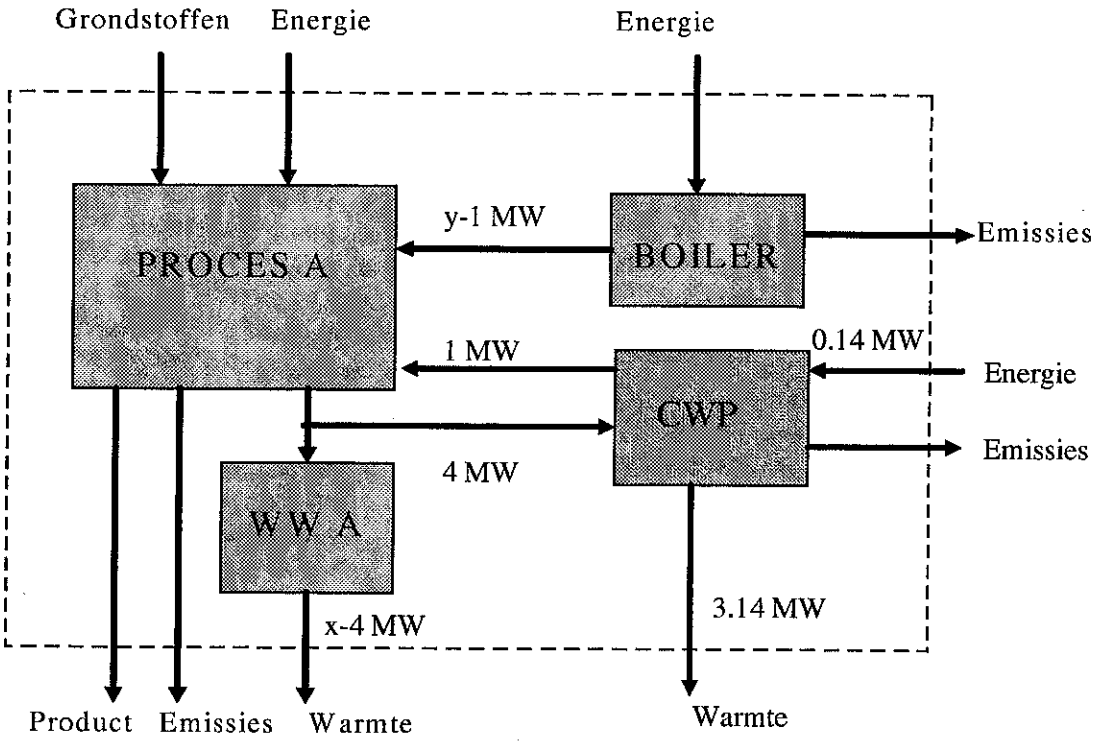
In SimaPro worden de emissies en benodigde grondstoffen/energie uitgerekend en vervolgens omgerekend naar de milieuthema's. Dit geeft dit het volgende beeld zoals weergegeven in Tabel 4.4.
De bijdrage van een bepaald proces aan een milieueffect wordt gerelateerd aan de bijdrage van een bepaalde gemeenschap gedurende een bepaalde tijd aan datzelfde probleem. De genormaliseerde waarden wordt dan gedefinieerd als het quotiënt van een effectscore en de wereldbijdrage aan die effectscore.

Tabel 4.4: *Milieu-effecten naar miliethema's voor een gasgestookte boiler.*

Klasse	Eenheid	Aantal	Genormaliseerd (jr)
Broeikaseffect	kg CO2	66.7	0.00511
Ozonlaag	kg CFC11	0	0
Verzuring	kg SO4	0.0548	0.000487
Vermesting	kg PO4	0.00947	0.000248
Zware metalen	kg Pb	3.73E-7	6.86E-6
Giftige stoffen	kg B(a)P	0	0
Wintersmog	kg SPM	0.00387	4.1E-5
Zomersmog	kg C2H4	0.00301	0.000168
Pesticiden	kg act. s	0	0
Energie	MJ LHV	1.37E3	0.00864
Vast afval	kg	0	0

De waarde voor energie klopt niet met de 1.18 GJ die in dit systeem toegevoerd wordt. De reden hiervoor is dat bij de classificatie binnen SimaPro in dit geval gerekend wordt met een verbrandingswaarde van 36.6 MJ/m^3 in plaats van de Slochteren waarde van 31.65 MJ/m^3. De SimaPro waarde is in de tabel vermeld om consistent te blijven in de verkregen resultaten uit SimaPro.

Chemische warmtepomp
De chemische warmtepomp maakt van de 4 MW laagwaardige warmte 1 MW in de vorm van stoom van 200 °C die wordt teruggeleverd aan het proces. Hiervoor is tevens 0.14 MW aan elektriciteit nodig. De resterende 3.14 MW wordt naar de omgeving weggekoeld. Voor de levering van 1 GJ stoom wordt 4 - 3.14 = 0.86 GJ warmte gerecycled en is 0.14 GJ elektriciteit nodig. Het processchema is weergegeven in Figuur 4.3.



Figuur 4.3: *Processchema CWP.*

De emissies gepaard met de elektriciteitsproductie levert een aanzienlijke lijst op omdat het gemiddelde electriciteitspark wordt meegenomen en alle ketens die hiervoor zitten. In SimaPro is de keuze gemaakt voor "electricity Holland 93" als het gemiddelde elektriciteitspark. In de berekening is geen rekening gehouden met de reductie in de benodigde koelwaterhoeveelheid.

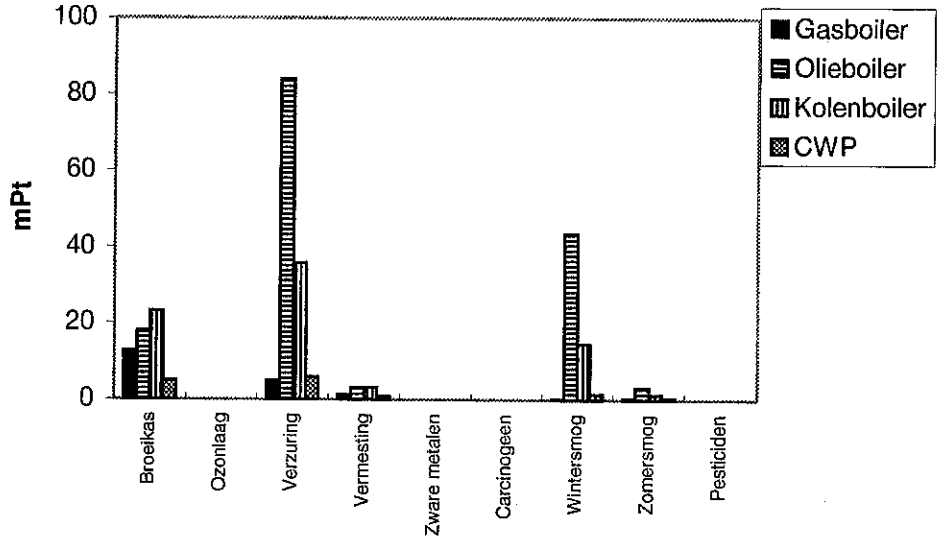
De emissies en benodigde grondstoffen/energie welke vervolgens omgerekend worden naar de milieuthema's geven het resultaat inTabel 4.5.

Tabel 4.5: *Milieueffecten naar milieuthema's voor de CWP.*

Klasse	Eenheid	Aantal	Genormaliseerd (jr)
Broeikaseffect	kg CO2	26.3	0.00201
Ozonlaag	kg CFC11	0	0
Verzuring	kg SO4	0.0658	0.000585
Vermesting	kg PO4	0.00704	0.000184
Zware metalen	kg Pb	0	0
Giftige stoffen	kg B(a)P	0	0
Wintersmog	kg SPM	0.0279	0.000296
Zomersmog	kg C2H4	0.00325	0.000181
Pesticiden	kg act. s	0	0
Energie	MJ LHV	397	0.0025
Vast afval	kg	0.0108	0

Zoals hiervoor vermeld moet niet te veel waarde aan de energiewaarde in bovenstaande tabel gehecht worden vanwege de verkeerde verbrandingswaarde bij de classificatie.

De eco-indicator, berekend volgens de Eco-indicator '95 methode (zie Appendix A) levert de volgende resultaten. De milieuthema's energie en vast afval leveren geen bijdrage aan deze indicator. Naast de gasgestookte boiler is ook nog een oliegestookte en kolengestookte ketel geanalyseerd. De verdeling van de (milli)eco-punten over de diverse milieuthemas is weergeven in Figuur 4.4.



Figuur 4.4: *Verdeling ecopunten over de diverse milieuthemas per variant.*

De gesommeerde resultaten voor de vier varianten tenslotte is gepresenteerd in Tabel 4.6.

Tabel 4.6: *Ecopunten voor de diverse varianten.*

Systeem	Eco-punten (mPt)
Gasgestookte boiler	19.5
Oliegestookte boiler	152
Kolengestookte boiler	78.1
Chemische warmtepomp	13.7

Discussie
Voorgaande leidt tot de conclusie dat de chemische warmtepomp volgens de eco-indicator methode beter scoort dan de gasgestookte boiler.

Hierbij dient te worden opgemerkt dat aangenomen is dat de chemische warmtepomp een gesloten systeem is. Dat betekent dat de aanwezige katalysatoren een 100 % selectiviteit hebben. Indien dit niet het geval is zullen er bijproducten ontstaan die periodiek of continu moeten worden afgetapt. Daarnaast moet het systeem weer aangevuld worden met de verloren gegane isopropanol. Omdat op dit moment niet bekend is of, en zo ja welke bijproducten ontstaan zijn hier geen analyses aan verricht. Daarnaast zal de katalysator periodiek moeten worden vervangen en geregenereerd. Ook dit is niet in de beschouwing meegenomen.

4.3 ELCA

In een exergetische LCA moet het volledige energie- en materiaalverbruik van de hele keten in kaart worden gebracht. In dit rapport wordt alleen gekeken naar het proces en niet naar het produceren van de apparaten en het afdanken hiervan. Het materiaalverbruik is daarom minimaal en te verwaarlozen ten opzichte van het energieverbruik.
SimaPro brengt de hele keten in kaart tot en met de onttrekking van grondstoffen (energiedragers) aan de milieu. In Tabel 4.7 staan de benodigde grondstoffen (Raw materials in SimaPro) vermeld (alleen de energiedragers). Hierin staat tevens een extra variant vermeld, waarbij de aanname is gedaan dat er continu per GJ geleverde warmte 1.15 kg isopropanol moet worden toegevoegd. Dit correspondeert met een katalysatorselectiviteit van 99.9 % en dus een omzetting van 0.1 % van de isopropanol recycle flow in bijproducten.

Tabel 4.7: *Benodigde exergie voor de productie van 1 GJ warmte op 200 °C.*

Grondstof	Exergie*) (MJ/eenheid)	Gasboiler	Exergie (MJ)	CWP	Exergie (MJ)	CWP (IPA additie)	Exergie (MJ)
Kolen	31.6	-	-	4.54 kg	143	4.56 kg	144
HO-gas		-	-	16.8 MJ	17.5	16.8 MJ	17.5
Aardolie	44.5	-	-	0.18 kg	8.0	0.95 kg	42.3
Aardgas	32.9	37.3 m^3	1227	6.19 m^3	204	7.33 m^3	241
Totaal			1227		373		445

*) Kolen: exergie = 1.08 * LHV = 1.08 * 29.3 MJ/kg = 31.6 MJ/kg
HO-gas (hoogovengas) = 1.04 * LHV = 1.04 * 4 MJ/m^3 = 4.16 MJ/m^3
Aardolie: exergie = 1.06 * LHV = 1.06 * 42 MJ/kg = 44.5 MJ/kg
Aardgas: exergie = 1.04 * LHV = 1.04 * 31.65 MJ/m^3 = 32.9 MJ/m^3

De vermenigvuldigingsfactoren waarmee de exergie van brandstoffen bepaald wordt aan de hand van de onderste verbrandingswaarde (LHV) zijn afkomstig uit [2].

Discussie
Bovenstaande tabel levert nauwelijks extra informatie op ten opzichte van de LCA analyse. Waarschijnlijk levert deze methodiek alleen nieuwe inzichten op indien er sprake is substantieel materiaalgebruik. Dit is bijvoorbeeld te zien in het grote verschil tussen de varianten met en zonder isopropanol additie.

Daarnaast geven deze resultaten wel de benodigde exergie weer maar dit is niet representatief voor de uitputting van betreffende bron, hetgeen namelijk afhankelijk is van de voorraden.

4.4 LCC

Onder de aannames uit sectie 3.4 zijn kostenberekeningen uitgevoerd teneinde de annuïteit te bepalen voor de kosten. Deze annuïteit is dus een constant bedrag dat ieder jaar betaald moet worden om uiteindelijk tot dezelfde som uit te komen na 20 jaar. De spreadsheets die gebruikt zijn om tot de volgende resultaten te komen zijn toegevoegd als Appendix B.

Gasgestookte boiler
De benodigde gashoeveelheid om 1.18 MW te leveren bedraagt 0.037 m^3/s ofwel 1.1 miljoen m^3/jr. De kosten hiervan bedragen bij aanvang 332 kfl, gebaseerd op een gasprijs van fl 0.30 $/m^3$. De investeringskosten zijn geschat op 300 kfl, terwijl voor het onderhoud slechts 1 % hiervan wordt gerekend. De berekende annuïteiten zijn als volgt :

Brandstof	:	455789 fl/jr	=	$1.525 \cdot 10^{-2}$ fl/s
O&M	:	4079 fl/jr	=	$1.365 \cdot 10^{-4}$ fl/s
Kapitaal	:	17714 fl/jr	=	$5.93 \cdot 10^{-4}$ fl/s

Bij een jaarproduktie van 12330 ton stoom zou de stoomprijs binnen het kader van het huidige rapport en de hierin gedane aannames uitkomen op 38.7 fl/ton stoom. Ter vergelijking: de kostprijs van conventioneel geproduceerde stoom bedraagt volgens [14] 20 tot 30 fl/ton stoom hetgeen dus iets lager is dan de hier vastgesteld waarde. Dit is waarschijnlijk te wijten aan verkeerde kostenschattingen maar binnen het bestek van dit rapport is dat niet relevant omdat vooral de methodiek getest wordt.

Chemische warmtepomp
De berekeningen zijn uitgevoerd voor ieder van de onderdelen van de chemische warmtepomp. Hierbij zijn geen kosten in rekening gebracht voor vervanging van katalysatormateriaal of isopropanol. Ook is geen winstopslag meegenomen. Tabel 4.8 geeft de resultaten weer voor de annuïteiten van de diverse componenten, tevens uitgesplitst naar brandstofkosten, onderhouds- en bedrijfskosten (O&M) en kapitaalskosten. Hierbij is geen rekening gehouden met de verminderde kapitaalsinvestering in het oorspronkelijke proces waar 4 MW minder hoeft te worden weggekoeld en dus een kleinere warmtewisselaar kan worden gebruikt.

Tabel 4.8: *Annuïteiten voor brandstof-, O&M- en kapitaalskosten per component voor de CWP met watergekoelde condensor.*

Component	Brandstof (kfl/jr)	O&M (kfl/jr)	Kapitaal (kfl/jr)	Totaal (kfl/jr)
Dehydrogenering	0	451.4	98.0	549.4
Compressor	208.7	18.8	15.2	242.7
Warmtewisselaar	0	52.0	42.3	94.3
Hydrogenering	0	57.3	46.6	103.9
Totaal	208.7	579.5	202.1	990.3

Opvallend is de grote bijdrage van O&M kosten, met name voor de dehydrogenering. Belangrijkste reden hiervoor zijn de kosten voor het koelwater voor de condensor die bij aanvang 224 kfl/jr bedragen. De prijs van het koelwater zoals die is aangenomen in [14] bedraagt fl 0.10/m^3. In een vervolgverslag, zie [15] is de watergekoelde condensor vervangen door een luchtgekoelde. Daarmee is een grotere warmtewisselaar nodig maar vervallen de koelwaterkosten. De resultaten voor deze berekening staan in Tabel 4.9.

Tabel 4.9: *Annuïteiten voor brandstof-, O&M- en kapitaalskosten voor de CWP met luchtgekoelde condensor.*

Component	Brandstof (kfl/jr)	O&M (kfl/jr)	Kapitaal (kfl/jr)	Totaal (kfl/jr)
Dehydrogenering	0	182.3	148.1	330.5
Compressor	208.7	18.8	15.2	242.7
Warmtewisselaar	0	52.0	42.3	94.3
Hydrogenering	0	57.3	46.6	103.9
Totaal	208.7	310.4	252.2	771.4

Bij een jaarproductie van 12330 ton stoom van 200 °C komt de prijs van de stoom op 990.3 kfl/12330 ton stoom = 80.3 fl/ton stoom met een watergekoelde condensor en op 62.6 fl/ton voor een luchtgekoelde condensor.

Voor beide situaties is ook de Netto Contante Waarde (NCW) uitgerekend. Hierbij is de opbrengst van de besparingen op koelwater (286 kfl/jaar volgens [14]) met het inflatiepercentage ieder jaar verhoogd. De opbrengst van de stoom wordt met de stijging van de brandstofkosten verhoogd. Bij de opbrengsten van de geproduceerde stoom met de chemische warmtepomp is uitgegaan van 30 fl/ton stoom in het jaar 0.

De NCW voor beide gevallen is negatief zodat de investering niet wordt terugverdiend binnen de gestelde termijn van 20 jaar. Voor de watergekoelde condensor bedraagt NCW circa -3 Mfl, terwijl de luchtgekoelde condensor uitkomt op ongeveer -1.4 Mfl.

4.5 ExEco

Gasgestookte boiler
Hoewel het bij een exergo-economische analyse niet noodzakelijk is om een vergelijking uit te voeren, zullen de resultaten voor de boiler hier ook weergegeven worden. De productstroom wordt gegeven door het verschil tussen de stoom en waterstroom, terwijl de brandstofstroom de toegevoerde gashoeveelheid is. De rookgassen representeren verliezen van het systeem. De hieronder vermelde cijfers zijn berekend met behulp van de resultaten uit secties 4.1 en 4.4. De kosten van exergievernietiging zijn gebaseerd op de brandstofkosten c_{Fuel}.

Ex. Fuel	(MW)	1.09
Ex. Product	(MW)	0.37
Ex. Verliezen	(MW)	0.036
Ex. Vernietiging	(MW)	0.684
Ex. Efficiency	(%)	33.9
Kosten kapitaal + O&M	(fl/s)	$7.3 \cdot 10^{-4}$
c_{Fuel}	(fl/MJ)	$1.4 \cdot 10^{-2}$
$c_{Product}$	(fl/MJ)	$4.2 \cdot 10^{-2}$
$C_{destruction}$	(fl/s)	$1 \cdot 10^{-2}$
r	(%)	209
f	(%)	7

Hieruit blijkt dat de gasgestookte boiler uit exergetisch oogpunt een onding is maar wel goedkoop. De kosten worden vrijwel uitsluitend bepaald door de brandstof.

Chemische warmtepomp
Eerst moeten de exergo-economische vergelijkingen die voor de chemische warmtepomp gelden worden opgesteld. Daarvoor worden per component de in Tabel 4.2 benoemde brandstofstromen en productstromen gebruikt. Voor de volledigheid is in Appendix C de relatie tussen de daadwerkelijke fysische stromen en de gedefinieerde brandstofstromen en productstromen nader uitgelegd.

De exergo-economische vergelijkingen worden:

$$c_{P,dehyd}\,\dot{E}x_{P,dehyd} = c_{F,dehyd}\,\dot{E}x_{F,dehyd} + \dot{Z}_{dehyd}$$

$$c_{P,comp}\,\dot{E}x_{P,comp} = c_{F,comp}\,\dot{E}x_{F,comp} + \dot{Z}_{comp}$$

$$c_{P,ww}\,\dot{E}x_{P,ww} = c_{F,ww}\,\dot{E}x_{F,ww} + \dot{Z}_{ww}$$

$$c_{P,hyd}\,\dot{E}x_{P,hyd} = c_{F,hyd}\,\dot{E}x_{F,hyd} + \dot{Z}_{hyd}$$

Ex in deze vergelijkingen slaat op exergiestromen. De subscripts P, F hebben betrekking op product en fuel, terwijl in de subscripts ook de vier componenten benoemd staan. De Z symbolen slaan op de kosten van de diverse componenten (kapitaal plus O&M). De exergiewaarden van de diverse product- en brandstofstromen worden verkregen door de individuele exergiewaarden van elkaar af te trekken. Hetzelfde wordt gedaan voor de kostenstromen. Er vanuit

gaande dat de exergiewaarden van de diverse stromen bekend zijn (zie sectie 4.1), evenals de componentkosten (zie sectie 4.4) zijn er 8 onbekenden in dit probleem: $c_{P,dehyd}$, $c_{F,dehyd}$, $c_{P,comp}$, $c_{F,comp}$, $c_{P,ww}$, $c_{F,ww}$, $c_{P,hyd}$ en $c_{F,hyd}$. Dit betekent dat er 4 additionele vergelijkingen nodig zijn voor het verkrijgen van een oplossing. De brandstofstroom voor de dehydrogenering wordt verondersteld nutteloos te zijn en krijgt een lage fictieve waarde toegekend. Voorts zijn de kosten van elektriciteit ($c_{F,comp}$) bekend. Een derde additionele vergelijking wordt geleverd door een rondje door het systeem te maken en dan weer op hetzelfde punt uit te komen. Het resultaat hiervan moet nul zijn. De laatste extra vergelijking wordt verkregen via de volgende redenatie, welke afkomstig is uit [3].
De functie van de warmtewisselaar is het opwarmen van stroom 3 naar stroom 4. De kosten van de warmtewisselaar moeten dan ook gedragen worden door deze stroom. De kosten per exergie-eenheid voor de afkoelende stroom blijft gelijk. Eenzelfde redenatie kan ook gevolgd worden voor de hydrogeneringsreactor waarbij de kosten volledig drukken op de te genereren warmtestroom op 200 °C.
Dit leidt tot de volgende additionele vergelijkingen.

$$c_{F,dehyd} = 1 \cdot 10^{-3} (fl / MJ)$$

$$c_{F,comp} = 4.989 \cdot 10^{-2} (fl / MJ)$$

$$c_{P,dehyd}\,\dot{E}x_{P,dehyd} + c_{P,comp}\,\dot{E}x_{P,comp} + c_{P,ww}\,\dot{E}x_{P,ww} - c_{F,hyd}\,\dot{E}x_{F,hyd} - c_{F,ww}\,\dot{E}x_{F,ww} = 0$$

$$c_{F,ww} = c_{F,hyd}$$

De Z-termen worden gelijkgesteld aan de berekende annuïteiten voor de warmtepomp met de luchtgekoelde condensor uit de voorgaande sectie. Voor de volledigheid zijn deze termen weergegeven in onderstaande Tabel 4.10. De kosten per seconde zijn gebaseerd op een bedrijfstijd van 8300 uur per jaar.

Tabel 4.10: *Kapitaal en O&M kosten per component voor de CWP.*

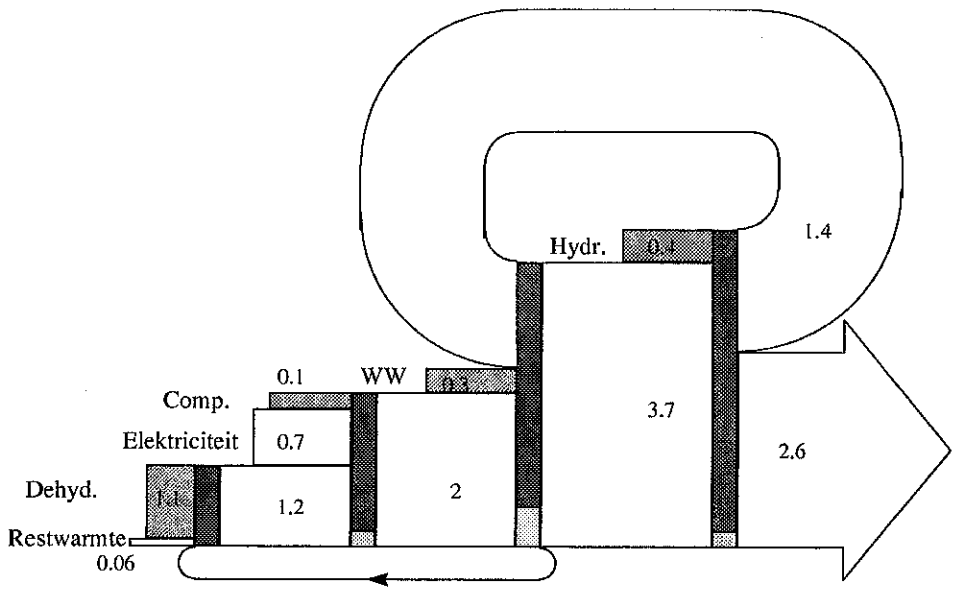
Component	Kosten (kfl/jr)	Kosten (fl/s)
Dehydrogenering	330.5	1.11E-2
Compressor	242.7	8.12E-3
Warmtewisselaar	94.3	3.15E-3
Hydrogenering	103.9	3.48E-3

Het stelsel van 8 vergelijkingen wordt opgelost en levert een resultaat op voor de c_F en c_P van iedere component. In de praktijk is dit stelsel eenvoudig op te lossen door de exergie van stroom 1 $Ex_1 = 0$ te stellen. Beginnend bij component 1 kunnen dan de vergelijkingen één voor één worden opgelost.
In Tabel 4.11 zijn de uitkomsten van deze evaluatie gepresenteerd. Hierbij is $C_{destruction}$ de kostenstroom van de vernietigde exergie gebaseerd op de exergieprijs van de fuel. Verder zijn r en f de in sectie 3.5 uitgelegde exergo-economische parameters. Het is ook mogelijk de exergieverliezen met de exergieprijs van het product te vermenigvuldigen maar dit leidt niet tot een andere rangorde in r en f.

Tabel 4.11: *Exergo-economische resultaten voor de CWP.*

Component	$Z_{CI\&OM}$ (fl/s)	c_{Fuel} (fl/MJ)	$c_{Product}$ (fl/MJ)	$C_{destruction}$ (fl/s)	r (%)	f (%)
Dehydrogenering	$1.106 \cdot 10^{-2}$	$1.000 \cdot 10^{-3}$	$2.841 \cdot 10^{-2}$	$9.400 \cdot 10^{-5}$	2740	99.2
Compressor	$1.138 \cdot 10^{-3}$	$4.989 \cdot 10^{-2}$	$7.663 \cdot 10^{-2}$	$1.696 \cdot 10^{-3}$	53.6	40.2
Warmtewisselaar	$3.155 \cdot 10^{-3}$	$5.517 \cdot 10^{-2}$	$1.094 \cdot 10^{-1}$	$5.462 \cdot 10^{-3}$	98.2	36.6
Hydrogenering	$3.476 \cdot 10^{-3}$	$5.517 \cdot 10^{-2}$	$7.112 \cdot 10^{-2}$	$2.427 \cdot 10^{-3}$	28.9	58.9

Eén en ander kan ook grafisch worden weergegeven in een kostenstroomdiagram. Figuur 4.5 toont een dergelijk diagram.



Figuur 4.5: *Kostenstroomdiagram voor de CWP (ct/s).*

Dit diagram toont de kostenopbouw door het systeem heen. De vier verticale balken representeren de componenten. De lichtgrijze vakjes hierin aan de onderkant stellen de kosten van exergievernietiging in die component voor. De grijze inkomende stromen zijn de apparaatkosten. De witte stromen stellen de brandstof- en productstromen voor.

Discussie

Een vergelijking tussen de gasgestookte boiler en de CWP ten aanzien van exergo-economische analyses is niet zinvol. Daarom wordt hier alleen de CWP beschouwd.

De exergo-economische analyse van de CWP laat zien hoe de kosten stromen binnen het systeem. Daarbij komt ook naar voren of de kosten te wijten zijn aan componentkosten of aan exergieverliezen. De hier uitgevoerde analyse suggereert een lagere investering in de dehydrogenering ten koste van het exergetisch rendement (de brandstof is immers toch vrijwel gratis) en een hogere investering in de warmtewisselaar om het exergetisch rendement te verhogen. Of dit daadwerkelijk mogelijk is en welk ontwerp tot de meest kostenoptimale oplossing leidt, moet blijken uit nadere analyses die niet binnen het bestek van dit project vallen.

5. CONCLUSIES & AANBEVELINGEN

Dit rapport behandelt een vijftal analyses die zijn uitgevoerd voor een chemische warmtepomp en een gasgestookte boiler als alternatief hiervoor. Deze analyses zijn bedoeld als test case om de gehanteerde methodieken te testen. Absolute conclusies ten aanzien van de resultaten zijn niet goed te trekken vanwege het feit dat weinig inspanning is verricht naar het verkrijgen van allerlei goed onderbouwde invoerinformatie. Desalniettemin worden hieronder toch een aantal conclusies getrokken op basis van de resultaten van de uitgevoerde analyses. Daarnaast zal een aantal aanbevelingen worden gedaan.
De conclusies worden verdeeld in conclusies met betrekking tot de gebruikte methodieken en conclusies ten aanzien van de vergelijking tussen de chemische warmtepomp en de gasboiler.

Methodieken

- De kracht van een exergieanalyse ligt in het lokaliseren van exergieverliezen binnen één systeem en daarmee het aangeven waar de verbetering op gericht moet zijn.
- Een LCA is zeer geschikt als een vergelijkende analyse die echter ook gebruikt kan worden om een systeem betreffende milieueffecten te verbeteren. Een belangrijke drempel bij het uitvoeren van een LCA is het verkrijgen van gevalideerde data.
- De ELCA in dit rapport biedt weinig meerwaarde ten opzichte van de afzonderlijk uitgevoerde exergie- en LCA-analyse. Dit wijzigt wellicht indien er sprake is van een groter aandeel van het materiaalgebruik in het grondstoffengebruik.
- De LCC-analyse zoals uitgevoerd in dit rapport dient vooral voor het genereren van de invoer voor de exergo-economische analyse. Aan de absolute uitkomsten moet geen waarde worden gehecht. De methodiek is goed bruikbaar bij het vergelijken van twee systemen en om na te gaan hoe de kostenopbouw is (kapitaal, onderhoud/bedrijf, brandstof).
- Een exergo-economische analyse is vooral bedoeld om tot een kostenoptimaal ontwerp te komen van één systeem. Een vergelijking tussen twee systemen is in dit verband niet relevant.

Vergelijking chemische warmtepomp versus gasboiler

Samenvattend kan gesteld worden dat voor de vergelijkende analyse LCC, de gasgestookte boiler beter scoort op het gebied van economie. De chemische warmtepomp leidt echter tot minder milieueffecten (LCA) en minder gebruik van grondstoffen (ELCA). De overige twee analyses (exergie en exergo-economisch) geven aan in welke richting het ontwerp van de chemische warmtpomp aangepast zou kunnen worden om tot een kostenoptimaler ontwerp te komen. De in dit rapport uitgevoerde analyse voor de CWP suggereert om de investering in de dehydrogenering te verlagen ten koste van het exergetisch rendement en de investering in de wamtewisselaar te verhogen ter verhoging van het exergetisch rendement. Een nadere analyse is noodzakelijk om na te gaan of dit inderdaad mogelijk is.

Aanbevelingen

Op basis van de hier gehanteerde methodieken is het mogelijk om een optimalisatie te maken waarin een afweging wordt gemaakt tussen kosten enerzijds en exergetisch rendement anderzijds. Daarvoor is het echter noodzakelijk om kostenfuncties te ontwikkelen die de componentkosten beschrijven als functie van allerlei grootheden. Dergelijke kennis is momenteel niet aanwezig binnen het programma maar dient wel opgebouwd te worden.

Om meer ervaring te krijgen met de hier gepresenteerde methodieken moeten meer cases doorgerekend worden. In een ARB voorstel voor 1999 wordt voorgesteld om chemische procesroutes en reactoren met elkaar te vergelijken op basis van eco-efficiency. In dit verband is het ook interessant om melding te maken van een Zwitsers initiatief in IEA-verband waarin gepoogd wordt de procesintegratie en LCA-methodieken te integreren bij het ontwerp van een proces.

Zoals in de tekst aangegeven wordt geen duidelijk antwoord gegeven over de mate van uitputting van grondstoffen. Nadere studie zou hier meer duidelijkheid over moeten geven. Worden de huidige (winbare) hoeveelheden genomen of ook de toekomstige mogelijke? Hoe wordt omgegaan met de extra inspanning die nodig is om de nu nog niet winbare grondstoffen te winnen? Wat is de relatie met exergie?

6. REFERENTIES

[1] Soest, J.P.v., H. Sas, and G.d. Wit, *Appels, peren en milieumaatregelen, Afweging van milieumaatregelen op basis van kosteneffectiviteit*, CE, Oktober 1997, Delft.

[2] Szargut, J., D.R. Morris, and F.R. Steward, *Exergy analysis of thermal, chemical en metallurgical processes*. 1988, New York: Hemisphere Publishing Corporation.

[3] Bejan, A., G. Tsatsaronis, and M. Moran, *Thermal design and optimization*. 1996, New York: John Wiley & Sons.

[4] Brodyansky, V.M., M.V. Sorin, and P. Le Goff, *The efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization*. Energy Research. 1994, Amsterdam: Elsevier Science B.V.

[5] Heijungs, R., *et al.*, *Milieugericht levenscyclusanalyses van produkten, Handleiding*, CML, Oktober 1992, Leiden.

[6] Heijungs, R., *et al.*, *Milieugericht levenscyclusanalyses van produkten, Achtergronden*, CML, Oktober 1992, Leiden.

[7] Brummelen, M.v., B.v. Engelenburg, and E. Nieuwlaar, *Methodology for the Life-Cycle Assessment of Energy Technologies*, NW&S 94024. NW&S, November 1994, Utrecht.

[8] Eggels, P.G. and J.P.v.d. Stoel, *Levens Cyclus Analyse Energie Technologie, case studie: warmtepomp*, TNO-MEP 94-218. TNO-MEP, Juni 1994, Apeldoorn.

[9] PRé Consultants B.V., *SimaPro 4 User Manual*, PRé Consultants B.V., November 1997, Amersfoort.

[10] PRé Consultants B.V., *SimaPro 4 Database Manual*, PRé Consultants B.V., November 1997, Amersfoort.

[11] Cornelissen, R.L., *Thermodynamics and sustainable development*, Ph. D Thesis. 1997, University of Twente: Enschede.

[12] Ayres, R.U., L.W. Ayres, and K. Martinas, *Eco-thermodynamics: Exergy and Life Cycle Analysis*, 96/19/EPS. INSEAD, 1996, Fontainebleau.

[13] Wall, G., *Exergy - A useful concept within resource accounting*, Institute of Theoretical Physics, 77-42. Chalmers University of Technology, May 1977, Göteborg.

[14] Werf, E.v.d., *Technische economische evaluatie van een chemisch warmtepomp systeem*, Universiteit Twente, Juni 1997, Enschede.

[15] Werf, E.v.d., *Aanvulling op het verslag 'Technische economische evaluatie van een chemisch warmtepomp systeem'*, 7.6119-GR1. ECN, Augustus 1997, Petten.

[16] Dijkstra, J.W. and A. de Groot, *Resultaten exergieberekening chemische warmtepomp*. Notitie 7.6188/PC1, 8 mei 1998, ECN Petten.

APPENDIX A: Eco-Indicator '95

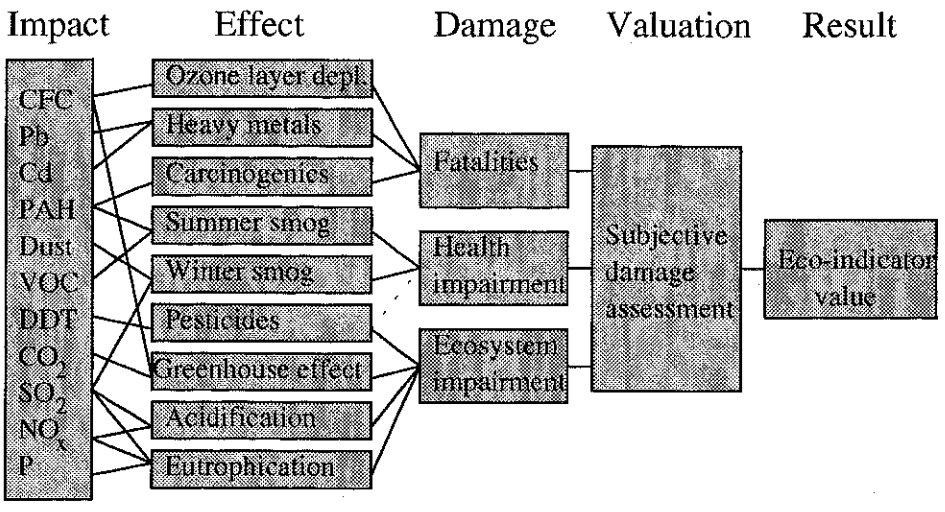
Nadat de inventarisatie en classificatiefase zijn afgerond, ontstaat een effectscore voor ieder van de milieu-effecten. De resultaten hiervan zijn echter moeilijk te interpreteren. Het ene product/proces veroorzaakt bijvoorbeeld meer broeikaseffect en wintersmog terwijl het andere product/proces meer verzuring en vermesting geeft. Hoe moeten nu deze effecten met elkaar vergeleken worden om tot een conclusie omtrent het beste product/proces te komen? Dit wordt nu gedaan in de Eco-indicator '95 methode

De eerste stap bestaat uit het normaliseren van de uitkomsten uit de classificatie. Dit resulteert in informatie over de grootte van een effect (niet over de ernst ervan). Bij de eco-indicator is de jaarlijkse milieubelasting van een Europeaan als normaal genomen.

Daarna vindt de weging plaats. Daarin worden de genormaliseerde effecten vermenigvuldigd met weegfactoren die de ernst van een effect weergeven. Bij de eco-indicator is gekozen voor een weging volgens het zogenoemde Distance-to-Target principe. De basisgedachte hierachter is dat hoe verder de huidige omvang van een milieu-effect is verwijderd van een streefwaarde, hoe ernstiger het effect is. Op basis van RIVM-gegevens is een inventarisatie gemaakt van de schade die negen effecten momenteel aan ecosystemen of de menselijke gezondheid toebrengen. Van elk effect is vastgesteld hoever het moet worden gereduceerd om tot een aantasting van 5 % van de ecosystemen te komen of tot een kans op één extra dode per miljoen inwoners per jaar. Deze reductiefactor is de weegfactor voor het effect. Onderstaande tabel geeft de weegfactoren die aldus bepaald zijn voor de diverse milieu-effecten.

Milieu-effect	Weegfactor	Criterium
Broeikaseffect	2.5	0.1°C stijging iedere 10 jaar, 5% aantasting ecosysteem
Ozonlaag aantasting	100	kans op 1 slachtoffer per jaar per miljoen inwoners
Verzuring	10	5% aantasting ecosysteem
Vermesting	5	5% aantasting van waterige ecosystemen
Zware metalen	5	loodconcentratie in bloed van kinderen, verlaagde levensduur-verwachting, leerproblemen , zware metalen in water
Carcinogeen	10	kans op 1 slachtoffer per jaar per miljoen inwoners
Wintersmog	5	Optreden smog, gezondheidsklachten (astma patienten, ouderen)
Zomersmog	2.5	Optreden smog, gezondheidsklachten (astma patienten, ouderen)
Pesticiden	25	5% aantasting ecosysteem

De gewogen effecten kunnen nu worden opgeteld tot één enkele waarde: de eco-indicator. Onderstaande figuur geeft de weegmethode schematisch weer.



De eco-indicator geeft niet aan hoe het met de uitputting van de gebruikte grondstoffen is gesteld. De verbruikte energie bijvoorbeeld wordt niet verwerkt in de indicator. De reden hiervoor is dat het feit of een grondstof zeldzaam is of niet geen schade toebrengt aan de gezondheid of het ecosysteem. De emissies ten gevolge van het winnen van grondstoffen worden wel meegenomen. Uitputting is moeilijk te definiëren omdat alternatieve materialen ontwikkeld kunnen worden of kan er meer recycling plaatsvinden.

De hoeveelheid vast afval levert geen bijdrage aan de eco-indicator. Het ruimtebeslag van afval is dermate klein vergeleken met de schade die andere milieu-effecten met zich meebrengen dat de bijdrage van vast afval wordt verwaarloosd. Indien echter emissies vrijkomen uit gestort afval, dan wordt dit wel meegenomen.

APPENDIX B: KOSTENBEREKENINGEN

Dehydrogenatie reactor (reboiler,kolom,condensor,refluxvat)

kapitaalsinvestering	2160000	Hfl
afschrijvingstermijn	20	jaar
belasting/verzekering	1	%
brandstofkosten jaar 0	0	Hfl
O&M kosten jaar 0	332000	Hfl
inflatie	3	%
disconto	10	%
escalatie brandstofprijs	4	%

(5 % van de investeringskosten + koelwater condensor)

jaar	afschrijving	belasting/verzekering	brandstof	O&M	Totaal (gangbaar fl)	discontofactor	Huidige fl	CRF	annuiteit
1	108000	21600	0	341960	471560	0,909	428691		
2	108000	21600	0	352219	481819	0,826	398197		
3	108000	21600	0	362785	492385	0,751	369936		
4	108000	21600	0	373669	503269	0,683	343739		
5	108000	21600	0	384879	514479	0,621	319451		
6	108000	21600	0	396425	526025	0,564	296928		
7	108000	21600	0	408318	537918	0,513	276037		
8	108000	21600	0	420568	550168	0,467	256657		
9	108000	21600	0	433185	562785	0,424	238676		
10	108000	21600	0	446180	575780	0,386	221988		
11	108000	21600	0	459566	589166	0,350	206499		
12	108000	21600	0	473353	602953	0,319	192119		
13	108000	21600	0	487553	617153	0,290	178767		
14	108000	21600	0	502180	631780	0,263	166367		
15	108000	21600	0	517245	646845	0,239	154850		
16	108000	21600	0	532763	662363	0,218	144149		
17	108000	21600	0	548745	678345	0,198	134207		
18	108000	21600	0	565208	694808	0,180	124967		
19	108000	21600	0	582164	711764	0,164	116379		
20	108000	21600	0	599629	729229	0,149	108395		
			0	9188593	11780593		4677001	0,1175	549359

Kf	0,945
CRF	0,1175

annuiteit brandstof	0
annuiteit O&M	451407
annuiteit kapitaalslasten	97952

Dehydrogenatie reactor (reboiler,kolom,condensor (luchtkoeling),refluxvat)

kapitaalsinvestering	2682000	Hfl							
afschrijvingstermijn	20	jaar							
belasting/verzekering	1	%							
brandstofkosten jaar 0	0	Hfl							
O&M kosten jaar 0	134100	Hfl	(5 % van de investeringskosten)						
inflatie	3	%							
disconto	10	%							
escalatie brandstofprijs	4	%							
jaar	afschrijving	belasting/verzekering	brandstof	O&M	Totaal (gangbaar fl)	discontofactor	Huidige fl	CRF	annuiteit
1	134100	26820	0	138123	299043	0,909	271857		
2	134100	26820	0	142267	303187	0,826	250568		
3	134100	26820	0	146535	307455	0,751	230995		
4	134100	26820	0	150931	311851	0,683	212998		
5	134100	26820	0	155459	316379	0,621	196446		
6	134100	26820	0	160122	321042	0,564	181220		
7	134100	26820	0	164926	325846	0,513	167211		
8	134100	26820	0	169874	330794	0,467	154318		
9	134100	26820	0	174970	335890	0,424	142450		
10	134100	26820	0	180219	341139	0,386	131524		
11	134100	26820	0	185626	346546	0,350	121462		
12	134100	26820	0	191195	352115	0,319	112195		
13	134100	26820	0	196930	357850	0,290	103657		
14	134100	26820	0	202838	363758	0,263	95789		
15	134100	26820	0	208923	369843	0,239	88538		
16	134100	26820	0	215191	376111	0,218	81853		
17	134100	26820	0	221647	382567	0,198	75689		
18	134100	26820	0	228296	389216	0,180	70004		
19	134100	26820	0	235145	396065	0,164	64760		
20	134100	26820	0	242200	403120	0,149	59921		
			0	3711417	6929817		2813453	0,1175	330467
Kf	0,945								
CRF	0,1175								
annuiteit brandstof	0								
annuiteit O&M	182330								
annuiteit kapitaalslasten	148137								

Blower									
kapitaalsinvestering	276000	Hfl							
afschrijvingstermijn	20	jaar							
belasting/verzekering	1	%							
brandstofkosten jaar 0	152000	Hfl							
O&M kosten jaar 0	13800	Hfl	(5 % van de investeringskosten)						
inflatie	3	%							
disconto	10	%							
escalatie brandstofprijs	4	%							
jaar	afschrijving	belasting/verzekering	brandstof	O&M	Totaal (gangbaar fl)	discontofactor	Huidige fl	CRF	annuiteit
1	13800	2760	158080	14214	188854	0,909	171685		
2	13800	2760	164403	14640	195604	0,826	161656		
3	13800	2760	170979	15080	202619	0,751	152231		
4	13800	2760	177819	15532	209911	0,683	143372		
5	13800	2760	184931	15998	217489	0,621	135044		
6	13800	2760	192328	16478	225366	0,564	127213		
7	13800	2760	200022	16972	233554	0,513	119850		
8	13800	2760	208022	17481	242064	0,467	112925		
9	13800	2760	216343	18006	250909	0,424	106410		
10	13800	2760	224997	18546	260103	0,386	100281		
11	13800	2760	233997	19102	269659	0,350	94514		
12	13800	2760	243357	19676	279592	0,319	89087		
13	13800	2760	253091	20266	289917	0,290	83979		
14	13800	2760	263215	20874	300649	0,263	79170		
15	13800	2760	273743	21500	311803	0,239	74643		
16	13800	2760	284693	22145	323398	0,218	70381		
17	13800	2760	296081	22809	335450	0,198	66367		
18	13800	2760	307924	23494	347978	0,180	62587		
19	13800	2760	320241	24198	360999	0,164	59026		
20	13800	2760	333051	24924	374535	0,149	55672		
			4707319	381936	5420454		2066093	0,1175	242682
Kf	0,945								
CRF	0,1175								
annuiteit brandstof	208675								
annuiteit O&M	18763								
annuiteit kapitaalslasten	15245								

Warmtewisselaar									
kapitaalsinvestering	765000	Hfl							
afschrijvingstermijn	20	jaar							
belasting/verzekering	1	%							
brandstofkosten jaar 0	0	Hfl							
O&M kosten jaar 0	38250	Hfl	(5 % van de investeringskosten)						
inflatie	3	%							
disconto	10	%							
escalatie brandstofprijs	4	%							
jaar	afschrijving	belasting/verzekering	brandstof	O&M	Totaal (gangbaar fl)	discontofactor	Huidige fl	CRF	annuiteit
1	38250	7650	0,000	39398	85298	0,909	77543		
2	38250	7650	0,000	40579	86479	0,826	71471		
3	38250	7650	0,000	41797	87697	0,751	65888		
4	38250	7650	0,000	43051	88951	0,683	60755		
5	38250	7650	0,000	44342	90242	0,621	56033		
6	38250	7650	0,000	45673	91573	0,564	51690		
7	38250	7650	0,000	47043	92943	0,513	47694		
8	38250	7650	0,000	48454	94354	0,467	44017		
9	38250	7650	0,000	49908	95808	0,424	40632		
10	38250	7650	0,000	51405	97305	0,386	37515		
11	38250	7650	0,000	52947	98847	0,350	34645		
12	38250	7650	0,000	54535	100435	0,319	32002		
13	38250	7650	0,000	56171	102071	0,290	29566		
14	38250	7650	0,000	57857	103757	0,263	27322		
15	38250	7650	0,000	59592	105492	0,239	25254		
16	38250	7650	0,000	61380	107280	0,218	23347		
17	38250	7650	0,000	63221	109121	0,198	21589		
18	38250	7650	0,000	65118	111018	0,180	19968		
19	38250	7650	0,000	67072	112972	0,164	18472		
20	38250	7650	0,000	69084	114984	0,149	17092		
			0,000	1058626	1976626		802495	0,1175	94261
Kf	0,945								
CRF	0,1175								
annuiteit brandstof	0								
annuiteit O&M	52007								
annuiteit kapitaalslasten	42254								

Hydrogenatie reactor

kapitaalsinvestering	843000	Hfl
afschrijvingstermijn	20	jaar
belasting/verzekering	1	%
brandstofkosten jaar 0	0	Hfl
O&M kosten jaar 0	42150	Hfl
inflatie	3	%
disconto	10	%
escalatie brandstofprijs	4	%

(5 % van de investeringskosten)

jaar	afschrijving	belasting/verzekering	brandstof	O&M	Totaal (gangbaar fl)	discontofactor	Huidige fl	CRF	annuiteit
1	42150	8430	0	43415	93995	0,909	85450		
2	42150	8430	0	44717	95297	0,826	78758		
3	42150	8430	0	46058	96638	0,751	72606		
4	42150	8430	0	47440	98020	0,683	66949		
5	42150	8430	0	48863	99443	0,621	61747		
6	42150	8430	0	50329	100909	0,564	56961		
7	42150	8430	0	51839	102419	0,513	52557		
8	42150	8430	0	53394	103974	0,467	48505		
9	42150	8430	0	54996	105576	0,424	44775		
10	42150	8430	0	56646	107226	0,386	41340		
11	42150	8430	0	58345	108925	0,350	38178		
12	42150	8430	0	60096	110676	0,319	35265		
13	42150	8430	0	61899	112479	0,290	32581		
14	42150	8430	0	63756	114336	0,263	30108		
15	42150	8430	0	65668	116248	0,239	27829		
16	42150	8430	0	67638	118218	0,218	25728		
17	42150	8430	0	69668	120248	0,198	23790		
18	42150	8430	0	71758	122338	0,180	22003		
19	42150	8430	0	73910	124490	0,164	20355		
20	42150	8430	0	76128	126708	0,149	18834		
			0	1166564	2178164		884318	0,1175	103872

Kf	0,945
CRF	0,1175
annuiteit brandstof	0
annuiteit O&M	57310
annuiteit kapitaalslasten	46562

Totale systeem met watergekoelde condensor

kapitaalsinvestering	4044000	Hfl
afschrijvingstermijn	20	jaar
belasting/verzekering	1	%
brandstofkosten jaar 0	152000	Hfl
O&M kosten jaar 0	426200	Hfl
inflatie	3	%
disconto	10	%
escalatie brandstofprijs	4	%
opbrengst stoom jaar 0	370000	Hfl
opbrengst besparing jaar 0	286000	Hfl

(5 % van de investeringskosten + koelwater condensor)

jaar	afschrijving	belasting/verzekering	brandstof	O&M	Totaal (gangbaar fl)	discontofactor	Huidige fl	CRF	annuiteit	opbrengst stoom	opbrengst besp.	Tot. opbrengst	Uitgaven	Cash Flow	DCF	NPV
1	202200	40440	158080	438986	839706	0,909	763369			384800	294580	679380	597066	82314	74831	
2	202200	40440	164403	452156	859199	0,826	710082			400192	303417	703609	616559	87051	71943	
3	202200	40440	170979	465720	879340	0,751	660661			416200	312520	728720	636700	92020	69136	
4	202200	40440	177819	479692	900150	0,683	614815			432848	321896	754743	657510	97233	66411	
5	*202200*	*40440*	*184931*	*494083*	*921654*	*0,621*	*572275*			*450162*	*331552*	*781714*	*679014*	*102700*	*63769*	
6	202200	40440	192328	508905	943874	0,564	532792			468168	341499	809667	701234	108433	61208	
7	202200	40440	200022	524172	966834	0,513	496139			486895	351744	838639	724194	114445	58728	
8	202200	40440	208022	539897	990560	0,467	462104			506371	362296	868667	747920	120747	56329	
9	202200	40440	216343	556094	1015078	0,424	430492			526625	373165	899791	772438	127353	54010	
10	202200	40440	224997	572777	1040414	0,386	401125			547690	384360	932050	797774	134276	51769	
11	202200	40440	233997	589960	1066597	0,350	373836			569598	395891	965489	823957	141531	49606	
12	202200	40440	243357	607659	1093656	0,319	348473			592382	407768	1000150	851016	149133	47518	
13	202200	40440	253091	625889	1121620	0,290	324893			616077	420001	1036078	878980	157098	45506	
14	202200	40440	263215	644666	1150521	0,263	302968			640720	432601	1073321	907881	165440	43566	
15	202200	40440	273743	664006	1180389	0,239	282576			666349	445579	1111928	937749	174179	41697	
16	*202200*	*40440*	*284693*	*683926*	*1211259*	*0,218*	*263605*			*693003*	*458946*	*1151949*	*968619*	*183330*	*39898*	
17	202200	40440	296081	704444	1243165	0,198	245953			720723	472714	1193438	1000525	192913	38167	
18	202200	40440	307924	725577	1276141	0,180	229525			749552	486896	1236448	1033501	202947	36502	
19	202200	40440	320241	747344	1310225	0,164	214232			779534	501503	1281037	1067585	213452	34901	
20	202200	40440	333051	769765	1345455	0,149	199993			810716	516548	1327263	1102815	224448	33363	
			4707319	11795718	21355837		8429907	0,1175	990174						1038857	-3005143

Kf	0,945
CRF	0,1175
annuiteit brandstof	208675
annuiteit O&M	579487
annuiteit kapitaalslasten	202012

Totale systeem met luchtgekoelde condensor

kapitaalsinvestering	4566000	Hfl
afschrijvingstermijn	20	jaar
belasting/verzekering	1	%
brandstofkosten jaar 0	152000	Hfl
O&M kosten jaar 0	228300	Hfl (5 % van de investeringskosten)
inflatie	3	%
disconto	10	%
escalatie brandstofprijs	4	%
opbrengst stoom jaar 0	370000	Hfl
opbrengst besparing jaar 0	286000	Hfl

jaar	afschrijving	belasting/verzekering	brandstof	O&M	Totaal (gangbaar fl)	discontofactor	Huidige fl	CRF	annuiteit	opbrengst stoom	opbrengst besp.	Tot. opbrengst	Uitgaven	Cash Flow	DCF	NPV
1	228300	45660	158080	235149	667189	0,909	606535			384800	294580	679380	393229	286151	260137	
2	228300	45660	164403	242203	680567	0,826	562452			400192	303417	703609	406607	297003	245457	
3	228300	45660	170979	249470	694409	0,751	521720			416200	312520	728720	420449	308271	231608	
4	228300	45660	177819	256954	708732	0,683	484074			432848	321896	754743	434772	319971	218545	
5	228300	45660	184931	264662	723554	0,621	449270			450162	331552	781714	449594	332120	206221	
6	228300	45660	192328	272602	738891	0,564	417084			468168	341499	809667	464931	344736	194595	
7	228300	45660	200022	280780	754762	0,513	387312			486895	351744	838639	480802	357837	183627	
8	228300	45660	208022	289204	771186	0,467	359764			506371	362296	868667	497226	371441	173280	
9	228300	45660	216343	297880	788183	0,424	334267			526625	373165	899791	514223	385567	163518	
10	228300	45660	224997	306816	805773	0,386	310660			547690	384360	932050	531813	400237	154309	
11	228300	45660	233997	316021	823978	0,350	288799			569598	395891	965489	550018	415471	145620	
12	228300	45660	243357	325501	842818	0,319	268548			592382	407768	1000150	568858	431291	137423	
13	228300	45660	253091	335266	862317	0,290	249783			616077	420001	1036078	588357	447720	129689	
14	228300	45660	263215	345324	882499	0,263	232390			640720	432601	1073321	608539	464782	122392	
15	228300	45660	273743	355684	903387	0,239	216264			666349	445579	1111928	629427	482500	115507	
16	228300	45660	284693	366354	925008	0,218	201309			693003	458946	1151949	651048	500901	109011	
17	228300	45660	296081	377345	947386	0,198	187435			720723	472714	1193438	673426	520012	102882	
18	228300	45660	307924	388665	970550	0,180	174562			749552	486896	1236448	696590	539858	97096	
19	228300	45660	320241	400325	994527	0,164	162613			779534	501503	1281037	720567	560470	91641	
20	228300	45660	333051	412335	1019346	0,149	151519			810716	516548	1327263	745386	581877	86492	
			4707319	6318542	16505060		6566359	0,1175	771282						3169050	-1396950

XI	0,945
CRF	0,1175
annuiteit brandstof	208675
annuiteit O&M	310410
annuiteit kapitaalslasten	252197

Gasgestookte stoomketel

kapitaalsinvestering	300000	Hfl
afschrijvingstermijn	20	jaar
belasting/verzekering	1	%
brandstofkosten jaar 0	332000	Hfl
O&M kosten jaar 0	3000	Hfl
inflatie	3	%
disconto	10	%
escalatie brandstofprijs	4	%
opbrengst stoom jaar 0	370000	Hfl

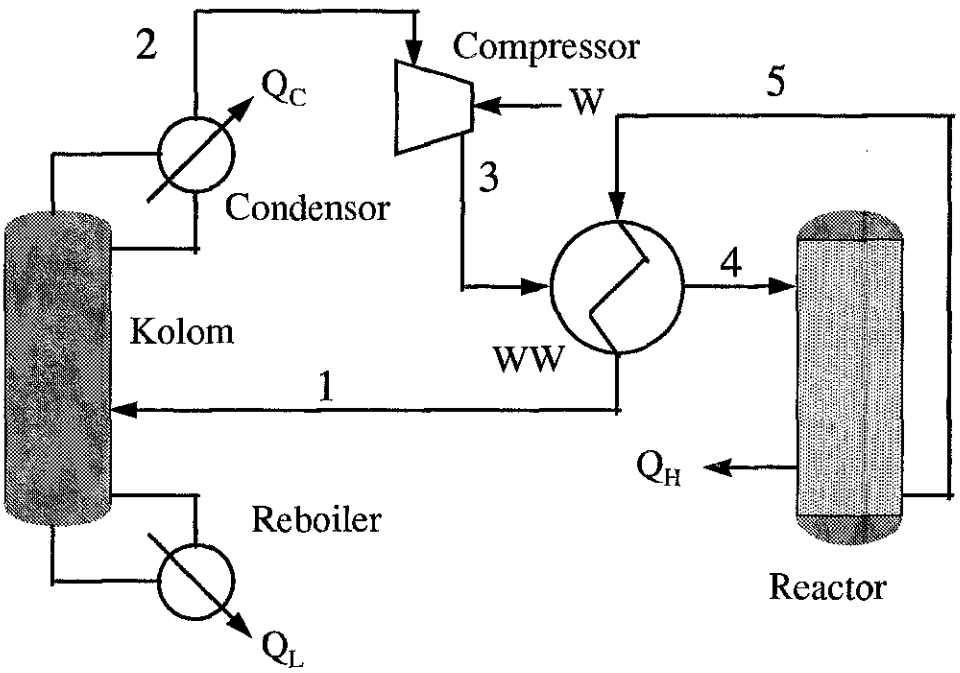
(1 % van de investeringskosten)

jaar	afschrijving	belasting/verzekering	brandstof	O&M	Totaal (gangbaar fl)	discontofactor	Huidige fl	CRF	annuiteit	opbrengst stoom	opbrengst besp.	Tot. opbrengst	Uitgaven	Cash Flow	DCF	NPV -300000
1	15000	3000	345280	3090	366370	0,909	333064			384800	0	384800	348370	36430	33118	-266882
2	15000	3000	359091	3183	380274	0,826	314276			400192	0	400192	362274	37918	31337	-235545
3	15000	3000	373455	3278	394733	0,751	296569			416200	0	416200	376733	39467	29652	-205893
4	15000	3000	388393	3377	409770	0,683	279878			432848	0	432848	391770	41078	28057	-177836
5	15000	3000	403929	3478	425407	0,621	264144			450162	0	450162	407407	42755	26547	-151288
6	15000	3000	420086	3582	441668	0,564	249310			468168	0	468168	423668	44500	25119	-126169
7	15000	3000	436889	3690	458579	0,513	235324			486895	0	486895	440579	46316	23767	-102402
8	15000	3000	454365	3800	476165	0,467	222135			506371	0	506371	458165	48205	22488	-79914
9	15000	3000	472540	3914	494454	0,424	209697			526625	0	526625	476454	50172	21278	-58636
10	15000	3000	491441	4032	513473	0,386	197966			547690	0	547690	495473	52218	20132	-38504
11	15000	3000	511099	4153	533251	0,350	186901			569598	0	569598	515251	54347	19048	-19456
12	15000	3000	531543	4277	553820	0,319	176464			592382	0	592382	535820	56562	18022	-1434
13	15000	3000	552804	4406	575210	0,290	166618			616077	0	616077	557210	58867	17052	15618
14	15000	3000	574917	4538	597454	0,263	157328			640720	0	640720	579454	61266	16133	31751
15	15000	3000	597913	4674	620587	0,239	148564			666349	0	666349	602587	63762	15264	47016
16	15000	3000	621830	4814	644644	0,218	140293			693003	0	693003	626644	66359	14442	61457
17	15000	3000	646703	4959	669662	0,198	132489			720723	0	720723	651662	69062	13663	75121
18	15000	3000	672571	5107	695678	0,180	125124			749552	0	749552	677678	71874	12927	88048
19	15000	3000	699474	5261	722734	0,164	118173			779534	0	779534	704734	74800	12230	100278
20	15000	3000	727453	5418	750871	0,149	111612			810716	0	810716	732871	77844	11571	111849
			10281775	83029	10724804		4065928	0,1175	477582						411849	111849

Kf	0,945
CRF	0,1175
annuiteit brandstof	455789
annuiteit O&M	4079
annuiteit kapitaalslasten	17714

APPENDIX C: RELATIE TUSSEN DIVERSE STROMEN

Hieronder is nogmaals het stroomschema van de chemische warmtepomp weergegeven.



Per component wordt nu een relatie gelegd tussen de daadwerkelijke fysische stromen en de gedefinieerd brandstof- en productstromen. De notatie is in het hoofdrapport aangegeven.

Dehydrogenering (reboiler,kolom,condensor)
De brandstofstroom wordt gegeven door Q_L-Q_C, terwijl de productstroom gelijk is aan stroom 2 - stroom 1. Dit levert de volgende vergelijkingen:

$$\dot{E}x_{F,dehyd} = \dot{E}x_{QL} - \dot{E}x_{QC}$$

$$\dot{C}_{F,dehyd} = \dot{C}_{QL} - \dot{C}_{QC} = c_{QL}\,\dot{E}x_{QL} - c_{QC}\,\dot{E}x_{QC} = c_{F,dehyd}\,\dot{E}x_{F,dehyd}$$

$$\dot{E}x_{P,dehyd} = \dot{E}x_2 - \dot{E}x_1$$

$$\dot{C}_{P,dehyd} = \dot{C}_2 - \dot{C}_1 = c_2\,\dot{E}x_2 - c_1\,\dot{E}x_1 = c_{P,dehyd}\,\dot{E}x_{P,dehyd}$$

Compressor

Voor de compressor is de productstroom gelijk aan stroom 3 - stroom 2 en de brandstofstroom is W. Dit zijn de vergelijkingen:

$$\dot{E}x_{F,comp} = \dot{E}x_W$$

$$\dot{C}_{F,comp} = \dot{C}_W = c_W \dot{E}x_W = c_{F,comp} \dot{E}x_{F,comp}$$

$$\dot{E}x_{P,comp} = \dot{E}x_3 - \dot{E}x_2$$

$$\dot{C}_{P,comp} = \dot{C}_3 - \dot{C}_2 = c_3 \dot{E}x_3 - c_2 \dot{E}x_2 = c_{P,comp} \dot{E}x_{P,comp}$$

Warmtewisselaar

De functie van de warmtewisselaar is het opwarmen van stroom 3. De productstroom wordt daarom gedefinieerd als stroom 4 - stroom 3. De brandstof wordt geleverd door stroom 5 -stroom 1. De vergelijkingen zijn:

$$\dot{E}x_{F,WW} = \dot{E}x_5 - \dot{E}x_1$$

$$\dot{C}_{F,WW} = \dot{C}_5 - \dot{C}_1 = c_5 \dot{E}x_5 - c_1 \dot{E}x_1 = c_{F,WW} \dot{E}x_{F,WW}$$

$$\dot{E}x_{P,WW} = \dot{E}x_4 - \dot{E}x_3$$

$$\dot{C}_{P,WW} = \dot{C}_4 - \dot{C}_3 = c_4 \dot{E}x_4 - c_3 \dot{E}x_3 = c_{P,WW} \dot{E}x_{P,WW}$$

Hydrogenering

De hydrogeneringsreactor levert warmte op een hoog temperatuurniveau als product. De brandstof die hiervoor wordt geleverd is gelijk aan stroom 4 - stroom 5. Dit levert de volgende vergelijkingen op.

$$\dot{E}x_{F,hyd} = \dot{E}x_4 - \dot{E}x_5$$

$$\dot{C}_{F,hyd} = \dot{C}_4 - \dot{C}_5 = c_4 \dot{E}x_4 - c_5 \dot{E}x_5 = c_{F,hyd} \dot{E}x_{F,hyd}$$

$$\dot{E}x_{P,hyd} = \dot{E}x_{QH}$$

$$\dot{C}_{P,hyd} = \dot{C}_{QH} = c_{QH} \dot{E}x_{QH} = c_{P,hyd} \dot{E}x_{P,hyd}$$