



CCS

energie advies



Vermijden van verliezen bij het gebruik van industriële restwarmte

Exergie eenvoudig uitgelegd

**In opdracht van AgentschapNL
Divisie NL Energie en Klimaat**

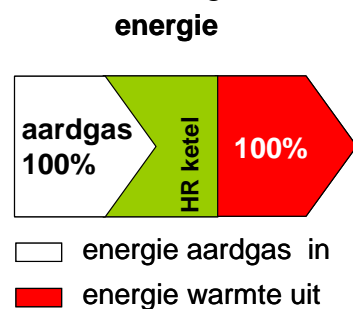
CCS B.V.
Welle 36
7411 CC Deventer
The Netherlands
tel. +31-570-677000
fax +31-570-677001
info@cocos.nl

R.L. Cornelissen
G.L.M.A. van Rens

Het nut van exergie als beoordelingscriterium

Hier zal een nieuwe manier uitgelegd worden om naar apparaten en warmte-uitwisseling te kijken. Hierbij wordt, niet alleen zoals gebruikelijk naar de hoeveelheid energie gekeken, maar ook de kwaliteit van die energie. De kwaliteit van energie gaat namelijk verloren. Als voorbeeld zal gekeken worden naar de opwekking van warm water voor huishoudelijke toepassing. De gekozen voorbeelden zijn louter bedoeld om de meerwaarde van het gebruik van exergie aan te tonen. De getallen zijn te globaal om een waardeoordeel over de verschillende technieken te geven en welke techniek in welke situatie te prefereren is.

Hoe goed een bepaald apparaat werkt wordt vaak uitgedrukt door een rendement op basis van energie, oftewel het gedeelte van de energie, die ergens ingestopt wordt, dat in het gewenste product komt. Een voorbeeld hiervan is een HR-verwarmingsketel. Bijna alle energie die er als aardgas in gaat komt vrij als warmte, die voor verwarming wordt gebruikt of om te douchen, zie Figuur 1.



Figuur 1. Rendement HR-verwarmingsketel

Dit lijkt daarmee een heel goed apparaat. Dat beeld verandert als er gekeken wordt naar wat er is gebeurd met de kwaliteit van de energie.

Aardgas kun je bijvoorbeeld gebruiken in een motor. Deze motor levert zogenaamde arbeid. Maar aardgas kan ook gebruikt worden om hoge of lage temperatuur warmte te maken¹, zoals in het voorbeeld van de HR-verwarmingsketel. Van hoge temperatuur warmte kan gemakkelijk lage temperatuur warmte gemaakt worden. Denk hierbij aan de radiator van de verwarming, waarbij het water van hoge temperatuur de kamer op lagere temperatuur opwarmt. Lage temperatuur warmte kan niet zomaar warmer gemaakt worden. De kamer op lagere temperatuur verwarmt de verwarming niet. Dat is natuurlijk maar goed ook, want anders zouden we het binnen niet warm krijgen. Maar de lucht in de kamer en het water in de verwarming zouden dezelfde hoeveelheid energie kunnen bevatten. Toch kan met de energie in het water van de verwarming de kamer worden verwarmd, maar kan de kamer op de lagere temperatuur de verwarming niet warmer maken. We kunnen dan ook zeggen dat de kwaliteit van warmte op hoge temperatuur hoger is dan de kwaliteit van warmte op lage temperatuur.

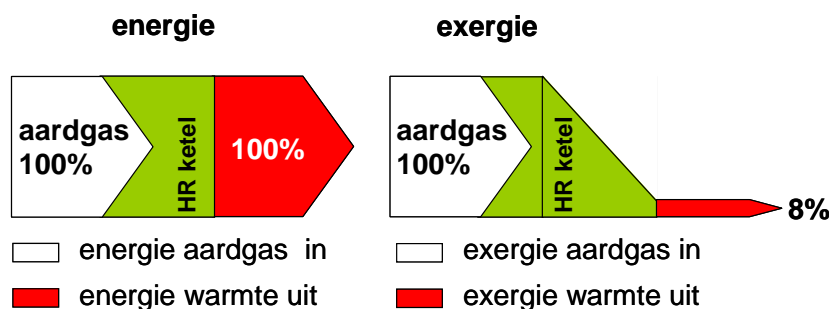
Maar hoe zit het nu als de kwaliteit van warmte vergeleken wordt met de kwaliteit van de bewegende as van een motor, welke arbeid levert? Arbeid kan volledig omgezet worden in warmte, denk hierbij aan remmen in een auto, zij zetten de beweging van de wielen van de auto om in warmte. Dit kun je ook voelen als je veel remt, of als je rem aanloopt. Andersom geldt dit echter niet. Zelfs in het ideale geval kan slechts een gedeelte van de hoeveelheid

¹ Wanneer we het hier hebben over hoge en lage temperatuur warmte hebben, worden daarmee temperaturen bedoeld, die hoger zijn dan de temperatuur van de omgeving. Voor temperaturen lager dan de omgeving geldt precies het omgekeerde. Dan geldt hoe lager de temperatuur hoe hoger de kwaliteit, en hoe hoger de exergie.

energie in warmte omgezet worden in arbeid. Daarom is de kwaliteit van arbeid hoger dan de kwaliteit van warmte op hoge of lage temperatuur. Hoe dichter de temperatuur bij de omgevingstemperatuur ligt, hoe minder energie omgezet kan worden in arbeid.

Het gedeelte van de energie dat in het ideale geval in arbeid omgezet kan worden, wordt ook wel het arbeidspotentieel, of, met andere woorden, exergie genoemd. Voor elektriciteit is de exergie gelijk aan de energie. Uit warmte met dezelfde temperatuur als de omgeving kan geen arbeid worden gewonnen. De exergie is dan nul, maar de energie niet. Net zoals met energie kan er ook een rendement gedefinieerd worden op basis van exergie. Dit is de nuttige uitgaande exergie, gedeeld door de ingaande exergie. In het gebruik wordt dit voor de exergie van warmte een eenvoudige verhouding tussen temperaturen.

Wanneer we nu met dit nieuwe criterium kijken naar diezelfde HR-verwarmingsketel, dan wordt die hoogwaardige energie in aardgas omgezet in warmte van tussen de 65°C en 85°C. Hoewel de energie behouden blijft, wordt hierbij heel veel kwaliteit verloren. In Figuur 2 worden het rendement van de HR-ketel op basis van energie en exergie vergeleken. Hieruit kan worden afgeleid dat maar 8% van de exergie is overgebleven.

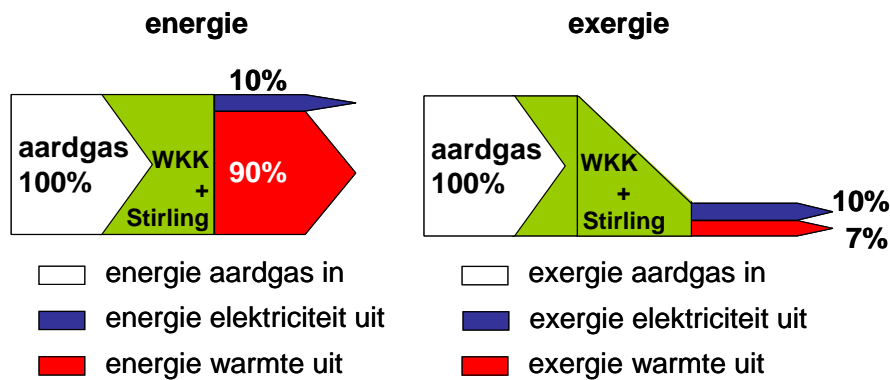


Figuur 2. Rendement op basis van energie en exergie

Een nieuwe ontwikkeling is een zogenaamde μ -WKK ketel (micro Warmte Kracht Koppeling), een apparaat dat zowel elektriciteit als warmte maakt. Het wordt ook wel een HRe-ketel genoemd. De energie wordt dan eerst gebruikt om elektriciteit op te wekken. De niet gebruikte energie wordt dan gebruikt om warm water te maken.

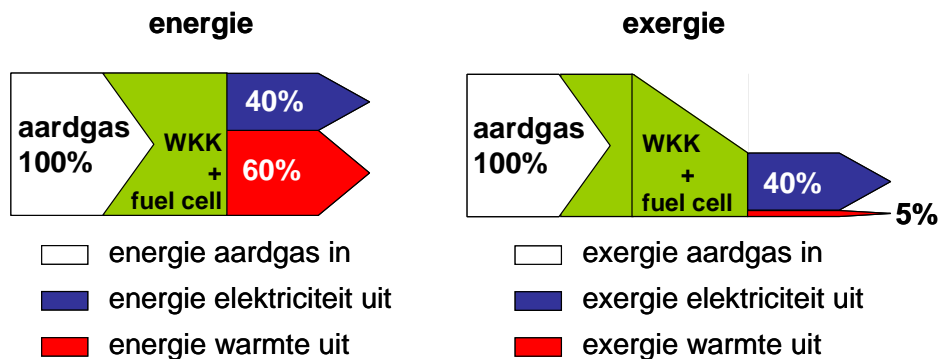
Zo'n micro-WKK wordt ontwikkeld op basis van een brandstofcel en een Stirling motor. Een micro-WKK op basis van een Stirling motor is het dichtste bij commerciële vermarkting. Recent hebben Nederlandse organisaties in een convenant besloten micro-WKK op basis van Stirling motoren op grote schaal te implementeren bij Nederlandse huishoudens.

Energetisch lijkt de μ -WKK op het eerste gezicht op de HR-Ketel, omdat alle energie in het aardgas nog steeds wordt omgezet, weliswaar niet meer alleen in warmte maar in elektriciteit en warmte, zie Figuur 3. Het beeld verandert als de exergie-stromen in kaart worden gebracht. Aardgas met een hoge exergie-inhoud wordt omgezet in elektriciteit (= 100% exergie) en laagwaardige warmte (lage exergie-inhoud). Uit Figuur 3 blijkt dat het exergetische rendement meer dan twee keer hoger is bij de inzet van een micro-WKK op basis van een Stirling motor, dan bij een HR-ketel.



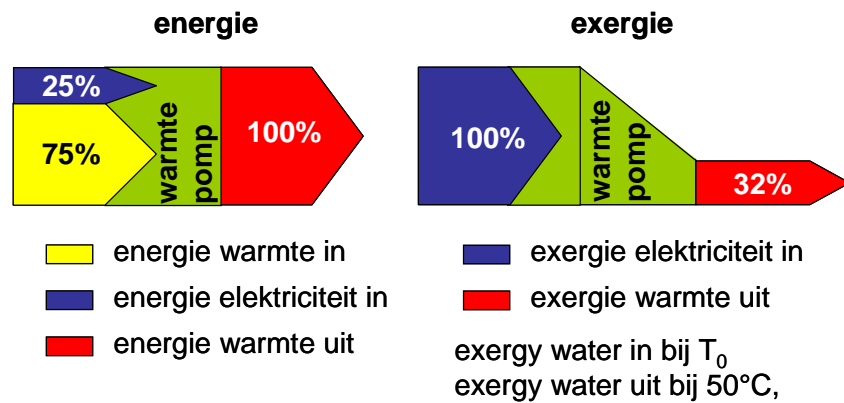
Figuur 3. Rendement op basis van energie en exergie voor een micro-WKK ketel met Stirling motor

Een verdere stijging van het exergetisch rendement is haalbaar als gekozen wordt voor een μ -WKK, die meer elektriciteit kan genereren. Dit zou een micro-WKK kunnen zijn op basis van een brandstofcel. Een brandstofcel zet chemische energie rechtstreeks om in elektriciteit. Hiermee kan een brandstofcel heel efficiënt werken. Het elektrisch rendement kan oplopen tot 30 à 40%, de rest kan worden omgezet in warmte. Nadeel van zo'n systeem is wel, dat als de ketel aanspringt wanneer er warmte nodig is er meer elektriciteit wordt geproduceerd, dan dat er op dat moment gebruikt wordt, ongeveer 3 keer meer. Er moet dus energie worden teruggeleverd aan het net. Dit is op dit moment financieel ongunstig. Daarom wordt er nu ook gekeken naar het volgen van de elektriciteitsvraag. Deze nieuwe techniek is nog niet commercieel beschikbaar.



Figuur 4. Rendement op basis van energie en exergie voor een μ -WKK installatie met brandstofcel

Een andere nieuwe toepassing is het gebruik van warmtepompen. Een warmtepomp gebruikt de energie van de omgeving en geeft deze af bij een hogere temperatuur. Om dat te kunnen doen wordt er arbeid toegevoegd uit elektriciteit of aardgas. Voor het voorbeeld is voor elektriciteit gekozen. Vaak wordt het rendement dan alleen omschreven door te kijken naar de hoeveelheid gas of elektriciteit die de warmtepomp ingaat. Hiermee wordt dan de zogenaamde COP (coefficient of performance) afgeleid. In het voorbeeld, van Figuur 5 is deze 4. Er komt namelijk 4 keer meer energie in de vorm van warmte uit de warmtepomp dan dat er in ging in de vorm van elektriciteit. Voor een goed energetisch plaatje moet gekeken worden naar de totale energiestromen. Ook de energie die opgenomen wordt uit de omgeving wordt dan meegenomen. Dit is weergegeven in Figuur 5. Het energetisch rendement is dan weer ongeveer 100%.



Figuur 5. Rendement op basis van energie en exergie van een elektrische warmtepomp voor ruimteverwarming

Zoals eerder aangegeven is de exergie van warmte uit de omgeving nul, omdat hiermee geen arbeid verricht kan worden. De enige exergie die wordt toegevoegd is de exergie van elektriciteit. De warmte bij een warmtepomp komt op iets lagere temperatuur vrij (ongeveer 50°C), omdat bij warmtepompen gebalanceerd wordt tussen de temperatuur van de warmte en de hoeveelheid energie die moet worden toegevoegd, in dit geval in de vorm van elektriciteit.

Wanneer naar de voorbeelden wordt gekeken op basis van energie, lijkt er niet veel verschil te zijn tussen de verschillende opties. Alle opties hebben een rendement van ongeveer 100%. De echte verschillen ontstaan als er gekeken wordt naar de kwaliteit van gebruikte en geleverde energie. De warmtepomp bijvoorbeeld gebruikt veel laagwaardige warmte en een beetje elektriciteit om iets hoogwaardigere warmte te maken. Terwijl de HR-ketel veel hoogwaardig aardgas gebruikt om ongeveer dezelfde hoeveelheid exergie te produceren. Hiermee is het exergetisch rendement van de HR-ketel veel lager dan van een warmtepomp. Aan de andere kant gebruikt de brandstofcel micro-WKK veel hoogwaardig aardgas om vervolgens hoogwaardige elektriciteit en laagwaardige warmte te maken. Het exergetische rendement is veel hoger dan bij een HR-ketel. Uit de voorbeelden blijkt dat exergie-analyse een krachtig instrument is om bestaande en nieuwe technieken te beoordelen.