

**MICRO-WARMTEKRACHTSYSTEMEN
VOOR DE ENERGIEVOORZIENING
VAN NEDERLANDSE HUISHOUDENS**

P.C. van der Laag, G.J. Ruijg

Revisies		
A		
B	Definitieve versie	
Opgesteld door: P.C. van der Laag, G.J. Ruijg	Goedgekeurd door: D. Jansen	ECN Schoon Fossiel Systeemaspecten
Geverifieerd door: M. Weeda	Vrijgegeven door: C.A.M. van der Klein	

Verantwoording

Deze systeemstudie vormt een onderdeel van het micro-warmtekracht cluster, waarin ECN bijdraagt aan de ontwikkeling van drie technologieën: op basis van een vrije-zuiger Stirlingmotor, een lage-temperatuur PEM en een hoge-temperatuur SOFC brandstofcel, als alternatief voor de hoog-rendements verwarmingsketel. Het micro-WK systeem voorziet in de behoefte aan elektriciteit en warmte voor ruimteverwarming en tapwater in individuele Nederlandse huishoudens. Dankzij de benutting van restwarmte die ontstaat bij de opwekking van elektriciteit, kan een besparing gerealiseerd worden van het primaire energiegebruik en van de emissies van kooldioxide en stikstof- en zwaveloxiden. Hiermee draagt deze ontwikkeling bij aan de overeengekomen terugdringing van de emissie van broeikasgassen, zoals vastgelegd in het Kyoto accord.

Door het uitvoeren van systeemstudies wordt vorm en inhoud gegeven aan de kennisfunctie “ μ -WK”, die gewenst is om de slaagkans op een succesvolle implementatie van de nieuwe μ -WK technologieën te verhogen. De doelstelling van het μ WK-cluster is om tenminste één systeemvariant te ontwikkelen met een elektrisch vermogen van 1 kilowatt, dat bovendien maximaal 1350 € duurder is dan een HR ketel. Daartoe worden drie uitvoeringsvormen met verschillende warmte/krachtverhoudingen, op basis van het Stirling- en het brandstofcelprincipe, parallel ontwikkeld, waardoor de slaagkans dat tenminste één variant tot een technisch succes leidt geraamd wordt op 95 %.

Deze studie is uitgevoerd met EZ-basisfinanciering, onder projectnummer 7.2912.

Abstract

Within the framework of the technology development program for residential micro-cogeneration applications in the Netherlands, system assessment studies are conducted. This report describes typical residential electricity and heat demand levels and patterns for individual households in the Netherlands. By installing natural gas fuelled co-generation equipment, based on Stirling, gas engine or fuel cell technologies, to fulfill the residential energy demands, a savings potential for primary energy and emissions reduction is created.

An overview is given of the micro-scale, natural gas fuelled technology options that are currently under development, and design considerations in order to utilize the savings potential to a high degree. A SWOT analysis describes the strengths, weaknesses, as well as opportunities and threats.

Trefwoorden

Energiebesparing, emissiereductie, warmte-krachtkoppeling, Stirlingmotor, brandstofcellen, gasmotoren, energievraagpatronen, rentabiliteit.

SAMENVATTING

Dit rapport geeft inzicht in de huishoudelijke energievragen voor elektriciteit, ruimteverwarming en voor tapwater. Niet alleen de jaargemiddelde hoeveelheden worden gegeven, afhankelijk van het type woning en het aantal bewoners. Maar tevens worden dynamische patronen, waarmee de energievragen fluctueren gegeven. Dit is van belang om micro-WK systemen en energiebuffers juist te kunnen dimensioneren en om de gevolgen van ongelijktijdigheid tussen vraag en aanbod te kunnen evalueren.

Voorts geeft het rapport een inzicht in kengetallen (rendementen en emissies) voor diverse alternatieven voor het huidige energieverzorgingssysteem en wordt aangegeven welke typen systemen er momenteel in ontwikkeling zijn.

De inzet van micro-warmtekracht eenheden, als alternatief voor de bestaande HR-ketel, in individuele nederlandse huishoudens, leidt tot een afname van het primaire energiegebruik en tot emissiereductie van CO₂ en van NO_x. Deze afnamen zijn evenwel afhankelijk van het toegepaste type systeem (Stirlinggenerator, gasmotor of brandstofcelsysteem), van de dimensionering (circa 1 kW_{elektrisch}), van de regelstrategie (elektriciteitsvraag- of warmtevraagvolgend) en van de toegepaste buffercapaciteit (bijvoorbeeld voor tapwater). Er worden primaire energiebesparingen verwacht van 12 % (Stirling) tot 24 % (brandstofcel) bij toepassing in een gemiddelde nederlandse woning. De CO₂ emissiereductie is nog sterker door een verandering in de samenstelling van de brandstofmix, ten gunste van aardgas. De reductie loopt voor een gemiddelde woning uiteen van 1,0 tot 2,7 ton vermeden CO₂ per jaar, voor respectievelijk Stirling- en SOFC-systemen. De jaarlijkse NO_x reductie bedraagt naar verwachting 1,3 tot 2,2 kg per gemiddelde woning.

Met name de rentabiliteit van brandstofcellen systemen is onzeker, vanwege onduidelijkheid omtrent de (toekomstige) hoogte van de terugleververgoeding voor momentaan teveel geproduceerde elektriciteit. Voor een rendabel bedrijf dient deze vergoeding hoger te zijn dan de marginale brandstofkosten van circa 16 €/kWh.

Aanbevolen wordt om in een vervolgstudie meer informatie te verkrijgen omtrent de variaties in met name de huishoudelijke elektriciteitsvraagpatronen. Die informatie kan vervolgens gebruikt worden voor systeemoptimalisaties met betrekking tot ontwerpcapaciteit en regelbaarheid, toegespitst op de diverse woningtypen (marktsegmenten).

INHOUD

1.	INLEIDING	9
1.1	Huidige situatie	9
1.2	Overheidsdoelstelling	10
1.3	De uitdaging	11
1.4	Doelstellingen van de studie	13
1.5	Leeswijzer	14
2.	ENERGIEVRAAG VAN HUISHOUDENS	15
2.1	Woningenbestand	15
2.2	Elektriciteitsvraag	15
2.3	Elektriciteitsvraagpatronen	16
2.3.1	Gemeten elektriciteitsvraagpatronen	16
2.3.2	Regelbaarheidseis voor vraagvolgende micro-WK generatoren	18
2.3.3	Gesimuleerde elektriciteitsvraagpatronen	19
2.4	Warmtevraag	23
2.5	Warmtevraagpatronen	25
2.5.1	Ruimteverwarming	25
2.5.2	Tapwater	27
2.6	Gezamenlijke dynamische energievraag	27
3.	ENERGIEVOORZIENING VAN HUISHOUDENS	29
3.1	Referentiesituatie	29
3.2	Micro-WK Concepten	30
3.2.1	Definitie	30
3.2.2	Inpassing in individuele woningen	31
3.2.3	Bedrijfsstrategieën en optimalisatiemogelijkheden	33
3.2.4	Optimalisatie	35
3.3	Kengetallen voor μ WK systeemvarianten	36
3.4	Ramingen voor energiebesparing en emissiereductie	37
4.	SWOT ANALYSE	45
4.1	Strengths	45
4.2	Weaknesses	47
4.3	Opportunities	48
4.4	Threats	49
5.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	51
6.	REFERENTIES EN LITERATUUR	55
7.	BIJLAGEN	59
7.1	Warmtevoorziening	59
7.2	Micro-WK systeemvarianten	62
7.2.1	Het Stirling type	62
7.2.2	Hoge-temperatuur, vast-oxide brandstofcel (SOFC)	66
7.2.3	Lage-temperatuur PEMFC systemen	75
7.2.4	Gasmotoren	83

FIGUREN

Figure 1-1 <i>De Trias Energetica [www.IVAMbv.UvA.nl]</i>	10
Figure 1-2 <i>De Kyoto afspraak voor Nederland [www.minvrom.nl]</i>	11
Figure 2-1 <i>Een gemeten tijdssignaal van het opgenomen elektrisch vermogen van een huishouden, gedurende 34 uur met een tijdsresolutie van 1 minuut</i>	17
Figure 2-2 <i>Gemeten belastingduurkromme voor het elektriciteitsgebruik uit figuur 2.1. Het maximum-, gemiddeld- en minimumvermogen is respectievelijk: 4110, 553 en 147 Watt</i>	17
Figure 2-3 <i>Fourier getransformeerde en cumulatieve frequentiespectrum van het tijdssignaal uit figuur 2.1</i>	18
Figure 2-4 <i>Impuls- en stapresponsies van een ideale micro-WK generator die met een vraagvolgende regeling 95 % van het gevraagde elektrisch vermogen kan leveren (mits niet in capaciteit gelimiteerd)</i>	19
Figure 2-5 <i>Een gesimuleerd elektriciteitsvraagpatroon, door sommatie van zeven huishoudelijke eindfuncties</i>	20
Figure 2-6 <i>Vermogens-frequentiespectrum corresponderend met het gesimuleerde vermogenspatroon van figuur 2.5</i>	21
Figure 2-7 <i>De verdeling van de relatieve inschakelkans van een eindfunctie, afhankelijk van het dagdeel (gewichtsfactoren)</i>	22
Figure 2-8 <i>De cumulatieve verdelingsfunctie van de verhouding van de jaargemiddelde elektriciteits- en warmtevraag van Nederlandse woningen</i>	24
Figure 2-9 <i>Voornaamste bronnen voor de variatie in de kracht/warmteverhouding van Nederlandse woningen aan de vraagzijde</i>	24
Figure 2-10 <i>Een ruimteverwarmingsvraagpatroon voor een twee-onder-één kapwoning, in de periode 1 januari t/m 13 februari (TrnSys simulatie)</i> ...	25
Figure 2-11 <i>Het verloop van de cumulatieve energievraag voor ruimteverwarming, in de periode 1 januari t/m 31 december</i>	26
Figure 2-12 <i>Het frequentiespectrum van het vraagpatroon voor ruimteverwarming, in de periode 1 januari t/m 13 februari</i>	26
Figure 2-13 <i>Gestandaardiseerd warm-tapwatervraagpatroon, volgens NEN 5182</i>	27
Figure 2-14 <i>Gezamenlijke energievraag van een tussenwoning, gedurende een etmaal in januari</i>	28
Figure 3-1 <i>Micro-WK systeemconfiguratie voor de huishoudelijke energievoorziening</i>	31
Figure 3-2 <i>Cumulatieve waarschijnlijkheidsverdelingen van de relatieve, primaire energiebesparing bij toepassing in de Nederlandse markt (1 kWe systemen met tapwaterbuffer)</i>	40
Figure 3-3 <i>Relatieve waarschijnlijkheidsverdeling van de jaarlijkse NO_x emissiereductie per huishouden, bij toepassing van de vier typen</i>	

<i>netgekoppelde 1 kWe, μWK systeem, die voorzien zijn van een tapwaterboiler.</i>	41
Figure 3-4 <i>Cumulatieve waarschijnlijkheidsverdelingen voor de netto jaarlijkse elektriciteitsexport door huishoudens met een 1 kWe, μWK-systeem met tapwaterbuffer.</i>	42
Figure 7-1 <i>Principeschema Stirling Micro W/K systeem.</i>	63
Figure 7-2 <i>Inwendige van een Stirling μ-WK systeem.</i>	63
Figure 7-3 <i>Schematische weergave van de Stirlingcyclus in 4 stappen (Figuur: NASA).</i>	63
Figure 7-4 <i>Principeschema van een SOFC μ-WK systeem.</i>	66
Figure 7-5 <i>Sulzer Hexis μ-WK (veldtest)systeem.</i>	66
Figure 7-6 <i>Brandstofcelprincipe [Sulzer Hexis].</i>	67
Figure 7-7 <i>Brandstofcel met twee separatorplaten [Sulzer Hexis].</i>	68
Figure 7-8 <i>Deellastgrafieken voor SR en CPO SOFC μ-WK systemen, bij een rookgastemperatuur van 45 °C.</i>	69
Figure 7-9 <i>Kostendaling brandstofcelssystemen</i>	73
Figure 7-10 <i>Principeschema van een PEMFC μ-WK systeem.</i>	75
Figure 7-11 <i>Vaillant Plug Power μ-WK systeem.</i>	75
Figure 7-12 <i>PEM Brandstofcelprincipe</i>	76
Figure 7-13 <i>PEM Brandstofcelstack</i>	77
Figure 7-14 <i>Kostendaling brandstofcelssystemen</i>	81
Figure 7-15 <i>Honda Micro Cogeneration System [Gastec]</i>	86
Figure 7-16 <i>Minotaur Remote Power System</i>	86
Figure 7-17 <i>Senertec mini-WKK</i>	87

TABELLEN

Table 1-1	<i>Het jaarlijkse energie- en exergiegebruik van de gemiddelde Nederlandse woning (1998).</i>	12
Table 1-2	<i>Exergieverliezen bij gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte, voor de gemiddelde Nederlandse woning.</i>	13
Table 2-1	<i>Samenstelling van het Nederlandse woningenbestand in duizendtallen [3].</i>	15
Table 2-2	<i>Gemiddeld elektriciteitsgebruik per huishouden in 1998.</i>	16
Table 2-3	<i>Verdeling van de gemiddelde elektriciteitsvraag naar huishoudelijke eindfuncties [1].</i>	20
Table 2-4	<i>Onderverdeling van een etmaal, ter benadering van gedragsaspecten.</i>	21
Table 2-5	<i>Aangenomen gemiddelde en standaardafwijking voor de lognormaal-verdeelde inschakelduur van eindfuncties, in uren.</i>	22
Table 2-6	<i>Het gemiddelde jaarlijkse gasverbruik en thermisch opgenomen vermogen voor ruimteverwarming per woningtype [2].</i>	23
Table 3-1	<i>Bestaande situatie voor de centrale elektriciteitsvoorziening van Nederlandse huishoudens [SEP, 1998].</i>	29
Table 3-2	<i>Warmteproductie voor ruimteverwarming [2].</i>	29
Table 3-3	<i>Apparatuur voor de bereiding van warm tapwater [2].</i>	30
Table 3-4	<i>Waarden van kengetallen voor de prestaties van 1 kWe micro-warmtekrachtsystemen, inclusief hun onzekerheidsmarges.</i>	37
Table 3-5	<i>Energievraag in huishoudens en het referentiesysteem.</i>	38
Table 3-6	<i>Jaargemiddelde aandeel van de piekbrander in de vraag naar ruimteverwarming, voor 1 kWe μWK systemen die voorzien zijn van een warmtebuffer voor de tapwatervoorziening (simulaties van seizoensinvloeden, op basis van energie-vraagpatronen, mbv. TOPICS) [R.P. de Smidt, 9].</i>	39
Table 3-7	<i>Relatieve brandstofbesparing voor netgekoppelde 1 kWe μWK systemen, voorzien van een tapwaterbuffer [%].</i>	39
Table 3-8	<i>CO₂-emissiereductie per huishouden, voor netgekoppelde 1 kWe μWK-systemen, voorzien van een tapwaterbuffer.</i>	40
Table 3-9	<i>NO_x-emissiereductie per huishouden, voor netgekoppelde 1 kWe μWK-systemen, voorzien van een tapwaterbuffer.</i>	41
Table 3-10	<i>Netto, jaarlijkse elektriciteitsexport per huishouden, voor netgekoppelde 1 kWe μWK-systemen, voorzien van een tapwaterbuffer.</i>	42
Table 7-1	<i>Rendementen en penetratie van verschillende typen ketels.</i>	60
Table 7-2	<i>Referentie rendementen voor HR-ketels bij aangenomen jaargemiddelde rookgastemperaturen van μ-WK systemen.</i>	60
Table 7-3	<i>Afhankelijkheid van het totaalrendement van de rookgastemperatuur.</i>	69
Table 7-4	<i>Investeringskosten van delen van een SOFC systeem met verwachte kostendaling.</i>	72

Table 7-5 <i>Onderhoudspercentages en afschrijftermijnen van verschillende delen van een SOFC systeem.</i>	73
Table 7-6 <i>Orde van grootte van toegestane kostenniveaus brandstofcellen voor verschillende toepassingen [EVN 1998].</i>	74
Table 7-7 <i>Investeringskosten van delen van een PEMFC systeem met verwachte kostendaling</i>	80
Table 7-8 <i>Onderhoudspercentages en afschrijftermijnen van verschillende delen van een PEMFC systeem.</i>	81
Table 7-9 <i>Orde van grootte van toegestane kostenniveaus brandstofcellen voor verschillende toepassingen [EVN 1998].</i>	81
Table 7-10 <i>Kengetallen mechanische varianten zuigermotoren [VHK].</i>	84

1. INLEIDING

1.1 Huidige situatie

Het energiegebruik om aan de vraag naar elektriciteit en warmte van 6 miljoen Nederlandse huishoudens te voldoen, bedraagt in 1999 circa 77 PJ elektriciteit en 344 PJ aardgas. Dit komt overeen met 25 % van het totale elektriciteitsgebruik en met 17 % van het totale gasgebruik in Nederland, ofwel 23 % van het totale Nederlandse energiegebruik. De woningen kennen daarbij een gemiddelde elektriciteitsvraag van 3300 kWh/jaar, een gasverbruik van 1940 m³/jaar en een gemiddelde warmtekrachtverhouding van 5,2 [1, 2, 3, 4].

Bij het streven om tot reducties van broeikasgasemissies (CO₂, NO_x, ..) en van primair energiegebruik te komen, wordt vaak de Trias Energetica als leidraad gehanteerd. Deze geeft aan welke stappen, in onderlinge samenhang genomen, ervoor zorgen dat de nadelige effecten van het gebruik van fossiele energiebronnen (emissies en uitputting van voorraden) op een zo effectief mogelijke wijze verminderd kunnen worden.

Allereerst door vermindering van de eindvraag naar energie, middels het nemen van energiebesparingsmaatregelen. In de afgelopen jaren is in Nederland reeds een aanzienlijke reductie bereikt van het jaarlijkse aardgasverbruik van individuele woningen. In de periode van 1980 tot 1999 is dit gedaald van 3200 naar 1940 m³. Deze daling is voornamelijk te danken aan een verminderde vraag naar ruimteverwarming, door het nemen van isolatiemaatregelen en het verhogen van het ketelrendement door de introductie van de HR ketel [1].

Vervolgens kan het fossiele brandstofgebruik worden verminderd door een zo groot mogelijke invulling van deze eindvraag met duurzame energiebronnen, zoals met stromingsbronnen (waterkracht, windenergie, zon-PV, zon-thermisch, zon-passief), benutting van de omgevingswarmte met behulp van warmtepompen en –opslagsystemen en met energie uit afval en biomassa. Het resterende deel van de energievraag, dat niet uit duurzame bronnen voorzien kan worden, zal door gebruik te maken van schone, efficiënte conversiesystemen voor fossiele energiebronnen ingevuld moeten worden. Dit wordt weergegeven in onderstaande figuur.

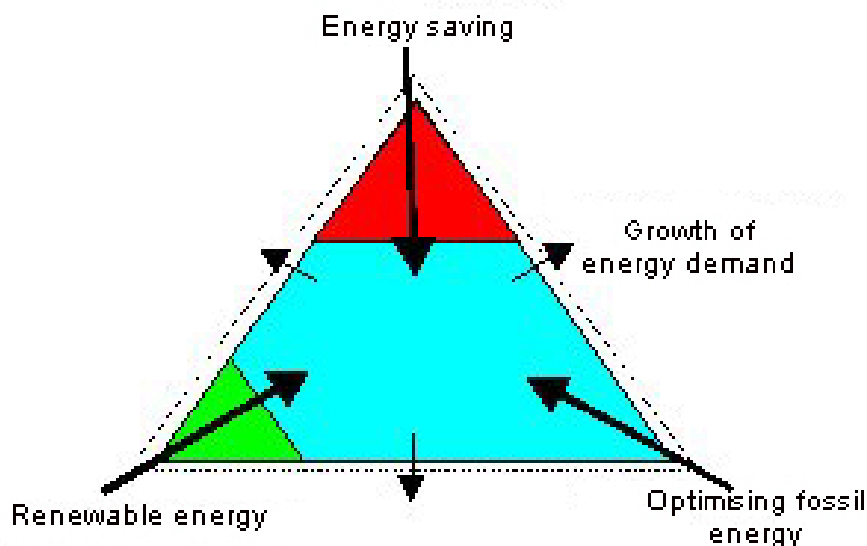


Figure 1-1 *De Trias Energetica* [www.IVAMbv.UvA.nl].

1.2 Overheidsdoelstelling

Het Actieprogramma Energiebesparing 1999|2002 van het ministerie van Economische Zaken, richt zich op de korte termijn. Hierbij worden nieuwe beleidsinstrumenten ingezet, die gericht zijn op een vermindering van de CO₂ emissie, waarbij als criterium geldt dat de jaarlijkse meerkosten maximaal 70 € per ton jaarlijks vermeden CO₂ mogen bedragen. Voor de sector huishoudens worden hierbij de volgende beleidsinstrumenten gehanteerd:

- verhoging van de regulerende energiebelasting (REB)
- REB vrijstelling voor duurzame energie
- energie-etikettering en energiepremies voor aanschaf van energiezuinige apparatuur
- invoering van energie prestatieadvies voor bestaande woningen (EPA), in combinatie met subsidies voor uitvoering van de aanbevolen besparingsmaatregelen.
- de EPN normering voor nieuwbouwwoningen

Het langere-termijn doel, zoals vastgelegd in de Derde Energienota van 1996, is een verhoging van de energie-efficiency met 33 % en een aandeel voor duurzame energie van 10 % in 2020. De Kyoto afspraken betekenen voor Nederland een reductiedoelstelling van 6 % CO₂-equivalenten¹ ten opzichte van 1990, te bereiken in de periode tussen 2008 en 2012. Vanwege de volgens het Global Competition scenario verwachte sterke groei van het primaire energiegebruik, betekent dit een concrete reductiedoelstelling ('beleidstekort') van 50 Mton CO₂-equivalenten per jaar. Hiervan mag de helft in het buitenland gerealiseerd worden. Zie ook figuur 1.2.

Voor de sector bestaande woningen, gebouwd vóór 1995, geldt een reductiedoelstelling van 5,5 Mton CO₂-eq. per jaar. Hierbij wordt een autonome reductie van 3,5 Mton per jaar verwacht. Het EPA beleid is gericht op een aanvullende reductie van 2 Mton per jaar, om de reductiedoelstelling voor 2010 te realiseren [5].

¹ Emissies van CO₂, N₂O, CH₄ en een aantal fluorverbindingen.

Voor het ontwerp van nieuwbouwwoningen, waarvan er jaarlijks circa 80.000 gerealiseerd worden, geldt een normstelling voor het totale toegestane energiegebruik [4].

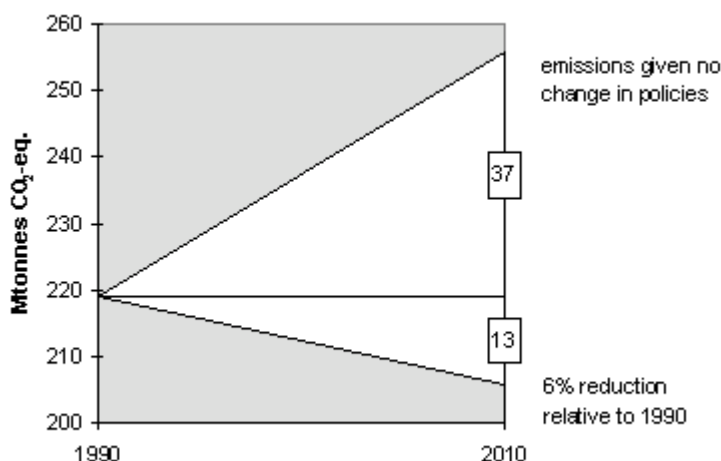


Figure 1-2 De Kyoto afspraak voor Nederland [www.minvrom.nl].

1.3 De uitdaging

Een eenvoudige exergieanalyse laat zien dat de manier waarop vandaag de dag de energievraag van Nederlandse huishoudens voorzien wordt, hoofdzakelijk met behulp van aardgasgestookte centrale verwarmingsketels voor ruimteverwarming en warm tapwater en met elektriciteit afkomstig van kolen- en aardgasgevoede grootschalige elektriciteitscentrales, nog een aanzienlijk verbeteringspotentieel bezit.

De uitdaging is om dit verbeteringspotentieel te benutten, door alternatieve energiesystemen te ontwikkelen die op een meer efficiënte en schonere wijze de energievraag vervullen. Zoals met de inzet van aardgasgevoede, netgekoppelde micro-warmtekrachtsystemen om in de gecombineerde vraag naar elektriciteit en warmte van individuele Nederlandse woningen te voorzien. Dit zijn systemen met een elektrische capaciteit van minder dan 10 kilowatt [21].

Een exergieanalyse houdt rekening met de kwaliteit van de energiestromen, en biedt daarmee inzicht in de wijze waarop kwaliteitsafname tijdens de omzetting en gebruik van primaire energie plaats vindt.

$$\text{Exergieinhoud} = \text{kwaliteitsfactor}^2 \times \text{Energieinhoud}^3$$

Hoewel kwaliteitsafname onvermijdelijk is op grond van de tweede hoofdwet van de thermodynamica⁴, blijkt de omzetting vaak met een aanzienlijk exergieverlies (i.c. entropieproductie) te gebeuren, waardoor er een overmaat

² Elektriciteit en arbeid hebben een kwaliteit die maximaal (= 1) is. Warmte van temperatuur T [Kelvin] heeft een kwaliteit die gelijk aan de Carnotfactor = $(T - T_{\text{omgeving}})/T$ is, met $T_{\text{omgeving}} = 283 \text{ K}$.

³ In dit rapport wordt als energieinhoud van brandstoffen steeds de onderste verbrandingswaarde gehanteerd.

⁴ Elk omzettingsproces blijkt gepaard te gaan met een *onomkeerbare* entropieproductie.

aan primaire energie (als bron van exergie) gebruikt wordt! Energie blijft behouden, maar exergie gaat verloren. Dit wordt geïllustreerd met onderstaand rekenvoorbeeld.

De gemiddelde Nederlandse woning kent een jaarlijkse elektriciteitsvraag van 3300 kWh elektriciteit. Daarnaast wordt jaarlijks 1575 m³ aardgas gebruikt voor ruimteverwarming met behulp van een hoge-temperatuursverwarmingssysteem en wordt jaarlijks 375 m³ aardgas voor warm tap- en douche of badwater gevraagd [2, 3].

We zien in onderstaande tabel 1.1 dat de jaarlijkse exergievraag van de gemiddelde woning van 22 GJ momenteel voorzien wordt met een *viervoudige* inzet van fossiele brandstoffen, van 92 GJ. Alhoewel ieder conversieproces gepaard gaat met exergieverliezen waardoor de ondergrens van 22 GJ primair exergieverbruik niet bereikbaar is, is er vanwege het lage exergierendement van slechts 24 %, toch een aanzienlijk verbeteringspotentieel en dito emissiereductiepotentieel aanwezig!

Table 1-1 *Het jaarlijkse energie- en exergiegebruik van de gemiddelde Nederlandse woning (1998).*

	Energieinhoud [GJ]	Exergieinhoud [GJ]
<i>Elektriciteit:</i>		
3300 kWh Gevraagd	11,9	11,9
Brandstofgebruik centrale ⁵	28,8	28,8
<i>Warmte:</i>		
Ruimteverwarming (85 °C) ⁶	44,0	9,2
Tapwater (65 °C) ⁷	5,4	0,88
Brandstofgebruik ketel ⁸	61,7	63,1
<i>Totaal:</i>		
Gevraagd	61,3	22,0
Brandstofgebruik	90,5	91,9
Absoluut verlies	29,2	69,9
Relatief verlies	32 %	76 %

Exergieverliezen vinden zowel bij de productie van elektriciteit als van warmte plaats. Het verbeteringspotentieel bij de warmteproductie is echter dominant, zoals blijkt uit een bepaling volgens de definitie van van Gool [6]:

⁵ Het landelijk gemiddelde omzettingsrendement inclusief transmissie- en distributieverliezen is 41,3 % [bron: SEP 1998]. Hierbij wordt een mix van hoofdzakelijk kolen- en aardgas gebruikt met een (veronderstelde) kwaliteitsfactor van 1,00 en een specifieke CO₂ emissie van 674 g/kWh.

⁶ Kwaliteitsfactor bij 85 °C is 0,210; het gemiddelde verwarmingsrendement is 88,2 % [3].

⁷ Kwaliteitsfactor bij 65 °C is 0,163; het gemiddelde tapwaterrendement is 45,2 % [3].

⁸ Nederlands aardgas heeft een verbrandingswaarde van 31,65 MJ_{LHV}/m³, een kwaliteitsfactor van 1,023 en een specifieke CO₂ emissie van 56,2 kg/GJ_{LHV, primair}.

$$\text{Verbeteringspotentieel} = \text{exergieverlies} \times (1 - \text{exergierendement}).$$

Table 1-2 *Exergieverliezen bij gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte, voor de gemiddelde Nederlandse woning.*

	Elektriciteit	Warmte	
Exergieverlies	16,9	53,0	GJ
Exergierendement	41,3 %	16,0 %	
Verbeteringspotentieel	9,9	44,5	GJ

Dan blijkt de warmteproductie een 4,5 maal zo groot verbeteringspotentieel te bezitten als de (gescheiden) elektriciteitsproductie. Dit komt door de inzet van hoogwaardig aardgas voor de productie van laagwaardige warmte, waarbij 84 % van de exergieinhoud onbenut blijft (vernietigd wordt). Het loont dus alleszins de moeite om de warmte-opwekking met co-productie van (hoogwaardige) elektriciteit uit te voeren. Een gunstig gevolg van co-productie is dat het elektrisch rendement daarbij niet erg hoog hoeft te zijn, om toch al een verbetering te laten zien!

Op grond van de term ‘hoog rendements’ voor het moderne type ketel, die met een omzettingsrendement van tenminste 90 %, in de warmtevraag (dit is 81 % van de totale gemiddelde huishoudelijke energievraag) voorziet, zou dan ook ten onrechte geconcludeerd kunnen worden dat het maximaal haalbare al vrijwel bereikt is!

Bij de vermindering van de inzet van primaire energie om op een efficiëntere wijze aan de gegeven totale energievraag te voldoen, zal de situatie kunnen ontstaan dat een rendement van 100 % bereikt wordt. In die situatie wordt evenveel primaire energie toegevoerd als er gevraagd wordt, waarbij echter nog steeds sprake is van een flink exergieverlies van 64 %, voor de gemiddelde Nederlandse woning. Het primaire energiegebruik is dan echter al met 32 % afgenomen.

Een verdere verlaging is alleen mogelijk, door een gedeelte van de energievraag niet uit fossiele brandstoffen (“primaire energie”), maar bijvoorbeeld met (exergievrije) omgevingswarmte in te vullen. Hiervoor zijn zonnecollectoren, warmtepompen en –opslagsystemen noodzakelijk. Derhalve kan alléén met de gecombineerde inzet van deze duurzame energiebronnen het verbeteringspotentieel maximaal benut worden! [18, 19, 20].

1.4 Doelstellingen van de studie

Deze studie beoogt na te gaan in hoeverre de diverse uitvoeringsvormen van decentrale, micro-warmtekrachtsystemen, als elektriciteitsproducerende-HR ketel, voor het ‘gasland’ Nederland aantrekkelijk zijn uit het oogpunt van primaire energiebesparing en emissiereductie, maar ook uit kostenbesparings- of rentabiliteitsoogpunt. Dit betreft uitvoeringsvormen die gebaseerd zijn op de Stirling cyclus en op hoge-, en lage-temperatuur brandstofcellen: SOFC en PEMFC. ECN is actief betrokken bij deze technologieontwikkelingen, binnen het prioriteitsgebied Schoon Fossiel. Als concurrerende technologie wordt ook

de gasmotor in de beschouwingen meegenomen. Deze assessment maakt dan ook onderdeel uit van het projectencluster micro-warmtekracht [7, 8].

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk twee wordt ingegaan op diverse kenmerken van de energievraag van huishoudens. De omgeving waarin het systeem moet opereren is zeer dynamisch, met sterk fluctuerende vraagpatronen. Waar de vraagpatronen op wijkniveau enigermate afgevlakt zijn, wordt het dynamische karakter ervan, onder invloed van seizoenen en met name van bewonersgedrag, juist zichtbaar bij individuele woningen. Met name op het punt van de dynamiek van de elektriciteitsvraag onderscheidt deze studie zich van de eerder in samenwerking met Cogen Projects uitgevoerde Locogen studie [9].

In hoofdstuk drie gaan we in op de diverse micro-WK alternatieven die, ten opzichte van de referentiesituatie, tot efficiencyverbetering en emissiereductie kunnen leiden. Voor een overzicht van de verschillende uitvoeringsvormen, werkingsprincipes en ontwikkelaars van micro-WK systemen wordt verwezen naar de bijlage.

Vervolgens wordt het energiebesparings- en emissiereductiepotentieel geraamd, bij toepassing van μ WK systemen met een elektrisch vermogen van 1 kilowatt in Nederlands huishoudens. Met computersimulaties brengen we besparingspotentiëlen in kaart, waarbij ook de invloed van variabiliteit en onzekerheid op de voorspellingen meegenomen wordt. Dit helpt om de belangrijkste invloedsfactoren te bepalen [13, 14, 15].

Daarbij wordt ook ingegaan op de proceseconomie. Doorslaggevend voor de vraag of micro-warmtekrachtsystemen op een succesvolle wijze toepassing vinden, is immers de bereidheid om ook tot aanschaf over te willen gaan. Met andere woorden: is er naast de primaire energiebesparing, ook in voldoende mate sprake van een economisch te behalen voordeel? Daarnaast spelen ook andere criteria een rol, zoals leveringszekerheid, ruimtebeslag, minimale geluidsproductie, aantal aanbieders en bedienings- en onderhoudsgemak.

In hoofdstuk vier wordt, middels een SWOT- (strengths, weaknesses, opportunities and threats) analyse de kansen en bedreigingen voor μ WK systemen samengevat.

Tenslotte worden conclusies en aanbevelingen gegeven.

2. ENERGIEVRAAG VAN HUISHOUDENS

In dit hoofdstuk wordt de huishoudelijke vraag naar diverse energievormen in Nederland beschreven. Achtereenvolgens wordt naar aantallen en naar karakteristieke energievraagpatronen van individuele woningen gekeken.

2.1 Woningenbestand

Het Nederlandse woningenbestand bestaat uit individuele woningen, van de typen: vrijstaand, twee onder één kap, tussenwoning en hoekwoningen, naast flatgebouwen. Het type woning is vanwege de geometrie, sterk bepalend voor de gemiddelde warmtevraag. Momenteel is het woningenbestand als volgt samengesteld.

Table 2-1 *Samenstelling van het Nederlandse woningenbestand in duizendtallen [3].*

Totaal	Flats	Tussen	Hoek	2/1 Kap	Vrijstaand
6363	1958	1835	868	754	947

Uit bovenstaande tabel blijkt dat er momenteel 4,4 miljoen individuele woningen zijn (flats uitgezonderd), die als doelmarkt voor de installatie van individuele micro-WK systemen gelden. Immers, het beslismoment waarop de aanschaf van een micro-WK installatie zal worden overwogen, is wanneer de bestaande CV ketel aan vervanging toe is. De gemiddelde levensduur van deze installaties is 15 jaar, waardoor de totale Nederlandse vervangingsmarkt geraamd wordt op circa 300.000 installaties per jaar.

Daarnaast worden er jaarlijks gemiddeld 80.000 nieuwe woningen bijgebouwd, die in principe eveneens met een μ WK systeem toegerust kunnen worden. Het overheidsstreven is om jaarlijks 100.000 woningen te bouwen. Desondanks zijn er recentelijk slechts 60.000 gerealiseerd. Hiermee bedraagt de Nederlandse marktomvang voor CV-installaties circa 380.000 installaties per jaar. HR ketels hebben in 1999 een aandeel van 75 % bereikt in deze markt [1].

2.2 Elektriciteitsvraag

De vraag naar elektriciteit hangt van vele situatiefactoren af, maar het meest onderscheidend is wel het aantal bewoners per huishouden, zoals blijkt uit het Basisonderzoek Elektriciteitsverbruik Kleinverbruikers, BEK 1998.

Table 2-2 *Gemiddeld elektriciteitsgebruik per huishouden in 1998.*

Gezinsgrootte	kWh/jaar	Watt _{continu}	Aandeel
1	2210	252	33 %
2	3050	348	34 %
3	3795	433	13 %
4	4335	495	14 %
5	4820	550	3 %
6 en meer	5270	602	3 %
Landelijk gemiddeld	3305	377	100 %

Het landelijk gemiddelde elektriciteitsgebruik is 3305 ± 80 kWh (90 % betrouwbaarheidsinterval). Het gemiddelde verbruik komt overeen met een gemiddelde gezinsgrootte van 2,4 personen. Andere factoren die van invloed zijn op het jaarlijkse elektriciteitsgebruik zijn de sociale klasse en het netto maandinkomen. Het gemiddelde elektriciteitsverbruik komt ook overeen met een gemiddeld netto gezinsinkomen van 1600 € per maand. Hierbij ligt de relatie met het aantal aangeschafte elektrische apparaten voor de hand.

Het gemiddelde elektriciteitsgebruik vertoont in de periode 1990-1998 een stijgende tendens, met gemiddeld 2 % per jaar [1].

2.3 Elektriciteitsvraagpatronen

Inzicht in de vraagpatronen voor elektriciteit en warmte is van groot belang om betrouwbare uitspraken te kunnen doen over de effecten van het gebruik van μ WK systemen in individuele huishoudens. Immers, het verschil tussen energievraag en -aanbod uit de μ WK generator zal moeten worden vereffend met behulp van opslag- en piekvraagvoorzieningen, zoals elektriciteits-uitwisseling met het distributienet, met elektriciteits- of warmteopslag en met behulp van een piekbrander. De mate waarin gebruik gemaakt wordt van deze aanvullende voorzieningen is uiteindelijk bepalend voor de voordelen met betrekking tot energiebesparing, emissiereductie en kostenbesparingen. Bovendien kan worden geoptimaliseerd, door de keuze van de capaciteiten van de μ WK generator en opslagsystemen te variëren, om ofwel de emissiereductie of de kostenbesparing per marktsegment te maximaliseren (tailor-made oplossingen).

2.3.1 Gemeten elektriciteitsvraagpatronen

Gedocumenteerde, gemeten elektriciteitsvraagpatronen van individuele huishoudens blijken niet voorhanden te zijn. Om een indruk te krijgen van *realistische*, huishoudelijke elektriciteitsvraagpatronen is daarom een datalogger (Elcontrol-Nanovip Plus-kit) aangeschaft, waarmee in de meterkast per individuele woning de momentane spanning, totale stroomsterkte, faseverdraaiing “ $\cos(\varphi)$ ” en harmonische vervormingen gemeten en opgeslagen

kunnen worden. In onderstaande figuur staat ter illustratie een gemeten patroon weergegeven, met een hoge tijdsresolutie.

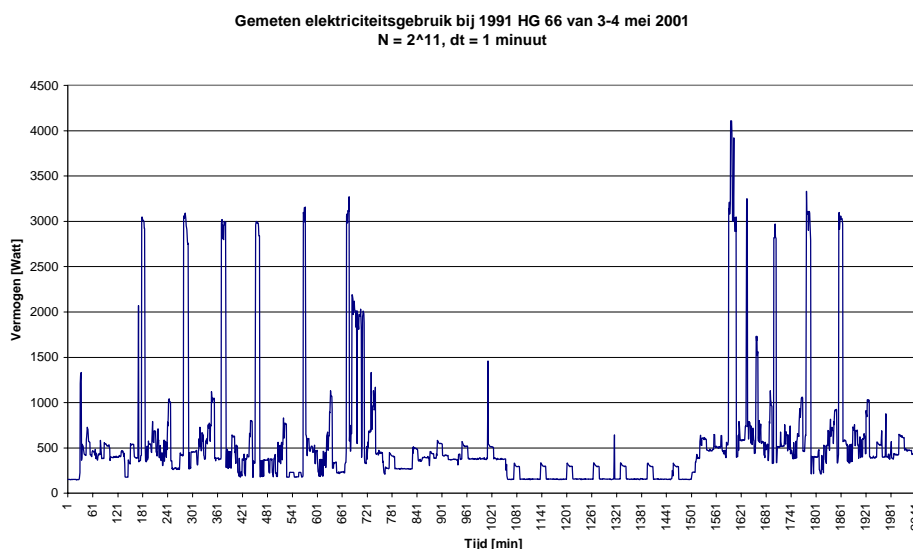


Figure 2-1 Een gemeten tijdssignaal van het opgenomen elektrisch vermogen van een huishouden, gedurende 34 uur met een tijdsresolutie van 1 minuut.

De opvallende pieken in de vermogensvraag worden veroorzaakt door wasmachine, magnetron, koffiezetapparaat en elektrische oven. Het periodieke signaal dat 's-nachts goed zichtbaar is wordt veroorzaakt door de koel/vriestkast, waarvan de compressor eens per uur inschakelt.

In onderstaande figuur staat de belastingduurkromme weergegeven voor het gemeten signaal uit bovenstaande figuur. Hieruit blijkt dat gedurende 90 % van de tijd het gevraagde vermogen minder dan 1 kilowatt bedraagt en gedurende 67 % van de tijd zelfs minder dan 500 Watt bedraagt. Het dynamisch bereik (= max/min vraag) is hoog en kan een factor honderd of meer bedragen!

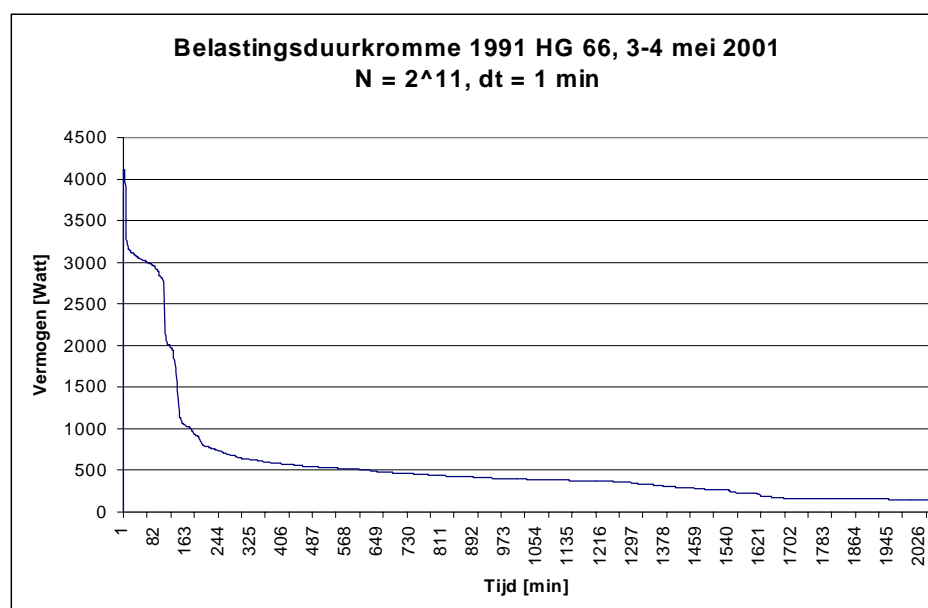


Figure 2-2 Gemeten belastingduurkromme voor het elektriciteitsgebruik uit figuur 2-1. Het maximum-, gemiddeld- en minimumvermogen is respectievelijk: 4110, 553 en 147 Watt.

Voor de netuitwisseling is het van belang om naast het gemiddelde opgenomen elektrisch vermogen ook het dynamisch gedrag van de elektriciteitsvraag te beschrijven. Bij registratie van de momentane elektriciteitsvraag moet evenwel de samplingfrequentie voldoende hoog zijn. Het Nyquist/Shannon criterium stelt dat, om een zuivere weergave van het frequentiespectrum te krijgen, de bemonsteringsfrequentie ten minste twee maal de hoogst-voorkomende frequentie in het tijdssignaal moet bedragen. Om te controleren of met een sampling interval van 1 minuut aan deze voorwaarde is voldaan, staat in onderstaande figuur het berekende frequentiespectrum weergegeven.

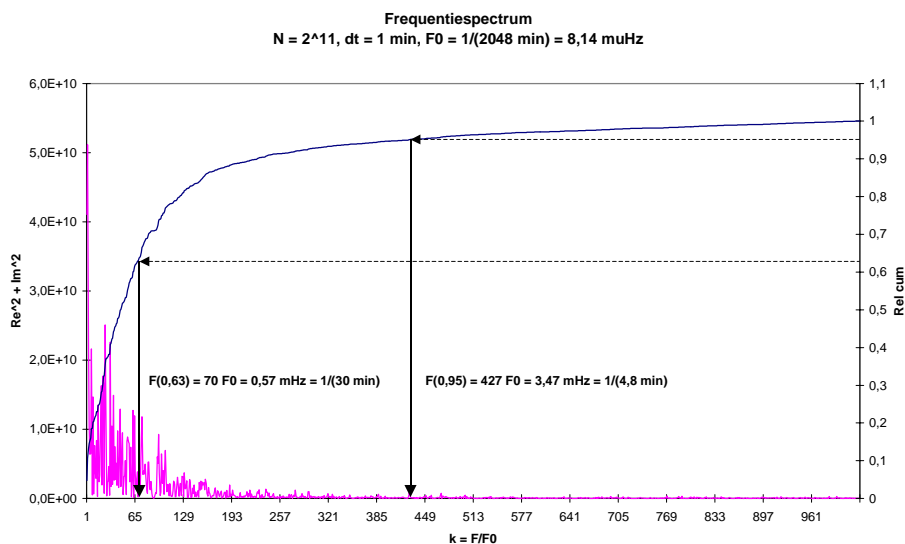


Figure 2-3 *Fourier getransformeerde en cumulatieve frequentiespectrum van het tijdssignaal uit figuur 2-1.*

We zien dat 95 % van het vermogen voorkomt bij frequenties lager dan 3,47 mHz ($k = 427$) en 63 % ($=1-1/e$) van het vermogen voorkomt bij frequenties lager dan 0,57 mHz ($k = 70$). Met andere woorden, indien met een sampling interval van ten hoogste 2,4 min wordt gemeten, wordt een 95 %-zuivere weergave gegeven van het frequentiespectrum: spiegeling (aliasing) rond de bemonsteringsfrequentie wordt dan vrijwel vermeden. Vanwege het gehanteerde samplinginterval van 1 minuut is ruimschoots aan deze eis voldaan.

2.3.2 Regelbaarheidseis voor vraagvolgende micro-WK generatoren

Om het dynamische vraagpatroon met een vraagvolgende μ WK-generator te kunnen leveren, kan uit het frequentiespectrum tevens een belangrijke regelbaarheidseis voor de generator worden afgeleid. Deze wordt uitgedrukt als minimaal impuls- of stapresponsietempo voor een lineair systeem. Immers, door toe te staan dat de generator een (klein) deel van het dynamische vraaggedrag niet hoeft te kunnen volgen, zal (op grond van de Parsevalrelatie voor vermogensbehoud in het tijds- en het frequentiedomein) de bandbreedte van de μ WK generator beperkt kunnen zijn tot frequenties die hooguit gelijk zijn aan een maximumfrequentie, F_{\max} .

Met andere woorden er wordt een (ideaal) laagdoorlaatfilter aangenomen, met als overdrachtsfunctie in het frequentiedomein, $H(\omega)$:

$$H(\omega) = 1, \quad \omega \leq \omega_{\max} = 2\pi F_{\max} = 21,8 \text{ mrad/s}$$

$$H(\omega) = 0, \quad \omega > \omega_{\max} = 2\pi F_{\max}$$

Dit ideale, stapvormige filter heeft een impulsresponsie die gegeven wordt door het oplossen van de inverse Fouriertransformatie:

$$h(t) = 1/(2\pi) \int H(\omega) e^{j\omega t} d\omega = \sin(\omega_{\max} t)/(\pi t).$$

De hiermee corresponderende stapresponsie is gelijk aan de tijdsintegraal van de impulsresponsie. Beide staan weergegeven in onderstaande figuur.

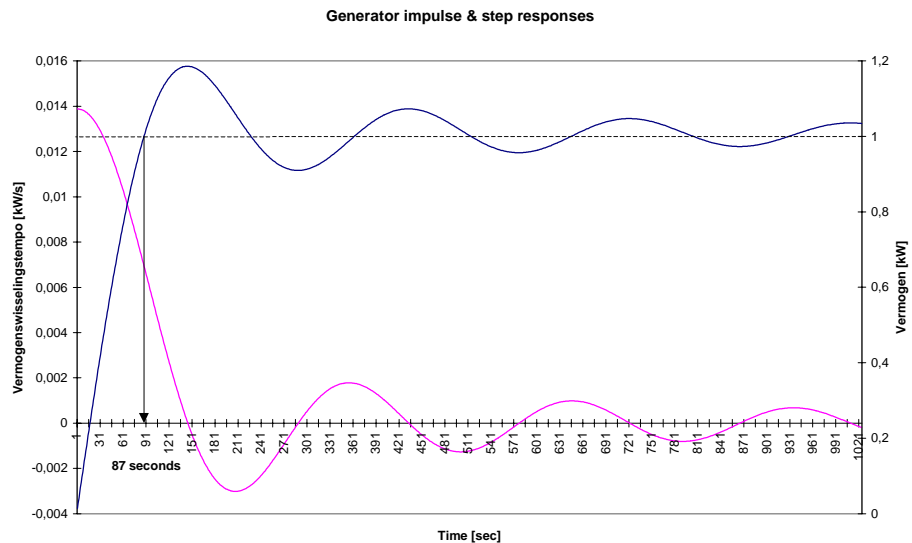


Figure 2-4 *Impuls- en stapresponsies van een ideale micro-WK generator die met een vraagvolgende regeling 95 % van het gevraagde elektrisch vermogen kan leveren (mits niet in capaciteit gelimiteerd).*

We zien dat een laag-doorlaatfilter met een bandbreedte van 0 - 3,47 mHz (21,8 mrad/s) correspondeert met een tijdsconstante van 87 seconden (ca 1,5 minuut). Het μ WK systeem moet dus binnen 87 seconden een stapsgewijze sprong in de vermogensvraag kunnen volgen om tenminste 95 % van de vermogensvraag te kunnen leveren. Vanwege de aangenomen beperkte bandbreedte zien we tevens dat het systeem (oneindig) lang na-ijlt.

2.3.3 Gesimuleerde elektriciteitsvraagpatronen

2.3.3.1 Proof of Principle versie

Elektriciteitsvraagpatronen vertonen een hoge graad van variabiliteit. Dit wordt door een aantal factoren veroorzaakt, zoals door bewonersgedrag en de aanwezigheid van diverse typen en aantallen apparatuur, waarmee een scala aan eindfuncties wordt vervuld. Voorbeelden van eindfuncties en hun landelijk-gemiddelde aandeel in het totale elektriciteitsgebruik zijn [1, 2]:

Table 2-3 *Verdeling van de gemiddelde elektriciteitsvraag naar huishoudelijke eindfuncties [1].*

Functie	Relatief aandeel
Verlichting	16 %
Reiniging	21 %
Beeld en geluid	14,5 %
Koelen	17,5 %
Centrale verwarming	6,5 %
Overige	24,5 %

Het is mogelijk gebleken om een vraagpatronengenerator te ontwerpen, die voor elk van deze eindfuncties afzonderlijk de inschakelmomenten voor de desbetreffende apparatuurklasse op een stochastische wijze bepaalt. Het totale momentane gevraagde elektrische vermogen bedraagt dan de som van de momentane vermogensvraag van de eindfuncties. Een dergelijk type, eerste-generatie, generator is ontworpen en geïmplementeerd in @Risk. Hiermee worden bijvoorbeeld voor een periode van 34 uur met een tijdsresolutie van 1 minuut (2^{11} datapunten), patronen voor de elektriciteitsvraag van een huishouden gesimuleerd. Een voorbeeld staat in onderstaande figuur weergegeven.

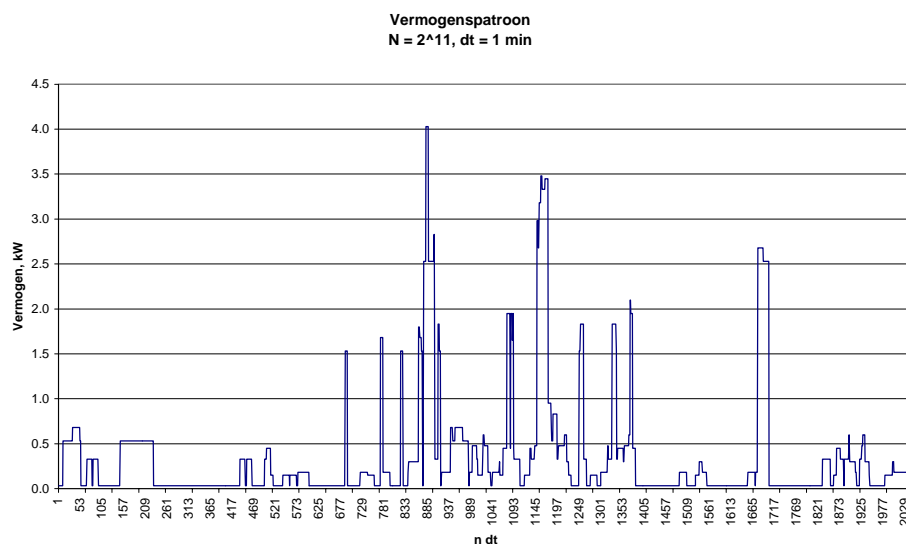


Figure 2-5 *Een gesimuleerd elektriciteitsvraagpatroon, door sommatie van zeven huishoudelijke eindfuncties.*

Doordat binnen de eindfuncties geen structuur is aangenomen (geen individuele apparatuur die afzonderlijk in- of uitgeschakeld wordt), zijn de pieken breder dan in het gemeten patroon. In onderstaande figuur staat het corresponderende frequentie-vermogensspectrum weergegeven.

Vermogenspectrum elektriciteitsvraag
 dt = 1 min, N = 2¹¹, 1/F0 = 2048 min

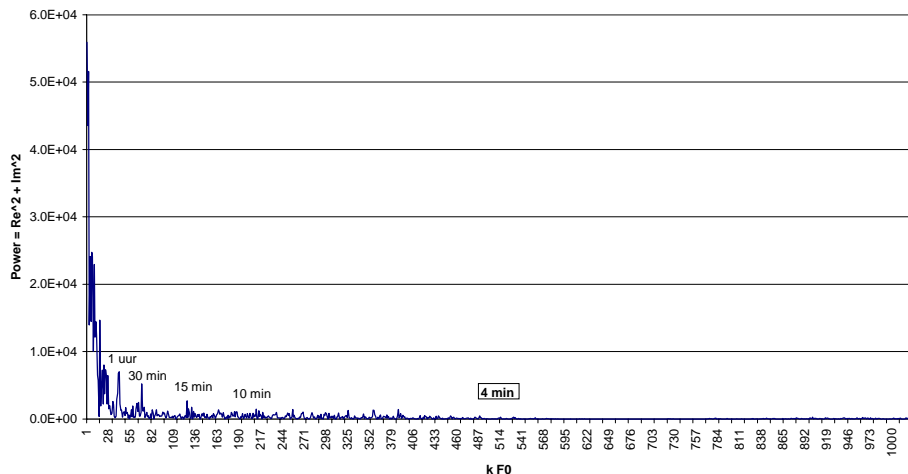


Figure 2-6 *Vermogens-frequentiespectrum corresponderend met het gesimuleerde vermogenspatroon van figuur 2.5.*

In bovenstaande grafiek zijn als gevolg van modelaannamen enkele periodieke verschijnselen zichtbaar, namelijk met een periode van eens per uur, half uur en eens per kwartier. Deze periodiciteit is, uitgezonderd de koel/vrieskast, niet zichtbaar in het gemeten frequentiepatroon (figuur 2.3): in werkelijkheid gedragen personen zich zeer onregelmatig!

Er is in het stochastische model een onderverdeling gemaakt van het etmaal in een achttal dagdelen die een afzonderlijke waarschijnlijkheid (gemiddelde kans) hebben waarmee gedurende een willekeurige minuut een eindfunctie ingeschakeld wordt. Deze indeling is volgens onderstaande tabel.

Table 2-4 *Onderverdeling van een etmaal, ter benadering van gedragsaspecten.*

Nanacht	vanaf	0:00 uur
Ochtend	vanaf	6:30 uur
Voormiddag	vanaf	8:30 uur
Middaguur	vanaf	12:00 uur
Namiddag	vanaf	13:30 uur
Vooravond	vanaf	16:00 uur
Avond	vanaf	19:00 uur
Voornacht	vanaf	23:00 uur

De bijbehorende veronderstelde waarschijnlijkheden zijn weergegeven in onderstaande figuur.

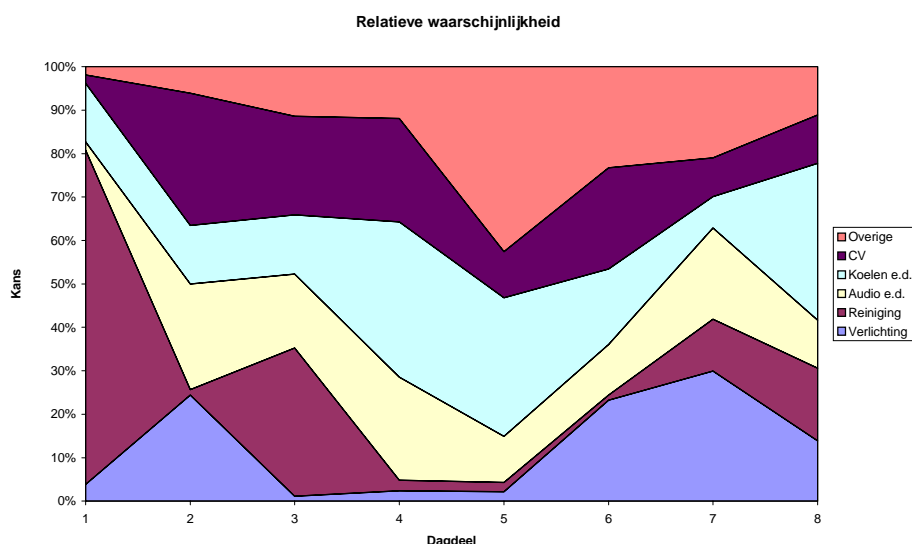


Figure 2-7 De verdeling van de relatieve inschakelkans van een eindfunctie, afhankelijk van het dagdeel (gewichtsfactoren).

Tevens is aangenomen dat het inschakelproces in een goede benadering beschreven kan worden met een Poissonproces. Met andere woorden: er wordt verondersteld dat het inschakelmoment binnen een dagdeel *onafhankelijk* en *identiek verdeeld* plaatsvindt (independently, identically distributed, i.i.d.). De enige relevante parameter hiervoor is λ , de gemiddelde kans dat er per minuut een eindfunctie ingeschakeld wordt. Hiermee is λ een functie van het dagdeel. De waarde van λ wordt gegeven door:

$$\lambda = \frac{\text{(genormeerde gewichtsfactor)} \times \text{(aantal keren inschakelen per dagdeel)}}{\text{(aantal minuten per dagdeel)}}$$

Voorts wordt verondersteld dat de tijdsduur waarmee een eindfunctie, na het moment van inschakelen ingeschakeld blijft, lognormaal verdeeld is volgens onderstaande tabel.

Table 2-5 Aangenomen gemiddelde en standaardafwijking voor de lognormaal-verdeelde inschakelduur van eindfuncties, in uren.

	Gemiddelde (μ)	Stand.afw. (σ)
Verlichting	0,25	0,05
Reiniging	0,50	0,10
Audio e.d.	1,00	0,25
Koelen	0,30	0,05
CV	0,25	0,05
Overige	0,10	0,05

2.3.3.2 Proof of Concept versie

Reeds is er een grote vooruitgang geboekt bij het terugdringen van de huishoudelijke vraag naar warmte voor ruimteverwarming. Het huishoudelijk gasgebruik daalde ten opzichte van 1980 met liefst 39 % [1]. Tegelijkertijd stijgt echter de elektriciteitsvraag, waarbij het opgenomen elektrisch vermogen omgezet wordt in warmte. Hierdoor wordt het elektriciteitsgebruik een significante warmtebron voor ruimteverwarming!

Als gevolg hiervan is bij de ECN onderzoeksgroep Duurzame Energie in de Gebouwde Omgeving 'DEGO', behoefte ontstaan om een gedetailleerde elektriciteitsvraagpatronengenerator te bouwen, waarmee de dynamische warmteproductie door elektriciteitsgebruik, in relatie tot bewonersgedrag, beschreven kan worden [10].

Er is van een aantal apparatuurtypen het karakteristieke elektriciteitsvraagpatroon geregistreerd. Dit is onder meer het geval voor een magnetron, koel/vriescombinatie, elektrische oven, stofzuiger, vaatwasser, wasmachine, strijkijzer, koffiezetapparaat en PC. Deze patronen worden geïmplementeerd in de Proof of Concept versie van de in @Risk geïmplementeerde stochastische vraagpatronengenerator.

2.4 Warmtevraag

De thermische energievraag komt voort uit de behoefte aan ruimteverwarming en aan warm tapwater. De vraag naar ruimteverwarming domineert hierbij vooralsnog. In onderstaande tabel wordt het gasverbruik voor ruimteverwarming weergegeven voor het bestaande woningenbestand in Nederland.

Table 2-6 *Het gemiddelde jaarlijkse gasverbruik en thermisch opgenomen vermogen voor ruimteverwarming per woningtype [2].*

Woningtype	Gasverbruik [m ³ /jaar]	Vermogen [kW _{LHV}]
Vrijstaand	2415	2,42
Twee-onder-één kap	1785	1,79
Hoekwoning	1665	1,67
Tussenwoning	1370	1,37
Flat	960	0,96
Landelijk gemiddeld	1575	1,58

Daarnaast wordt jaarlijks gemiddeld 375 m³ aardgas per woning gebruikt voor de bereiding van warm tapwater. Het opgenomen vermogen bedraagt gemiddeld 376 Watt_{LHV}.

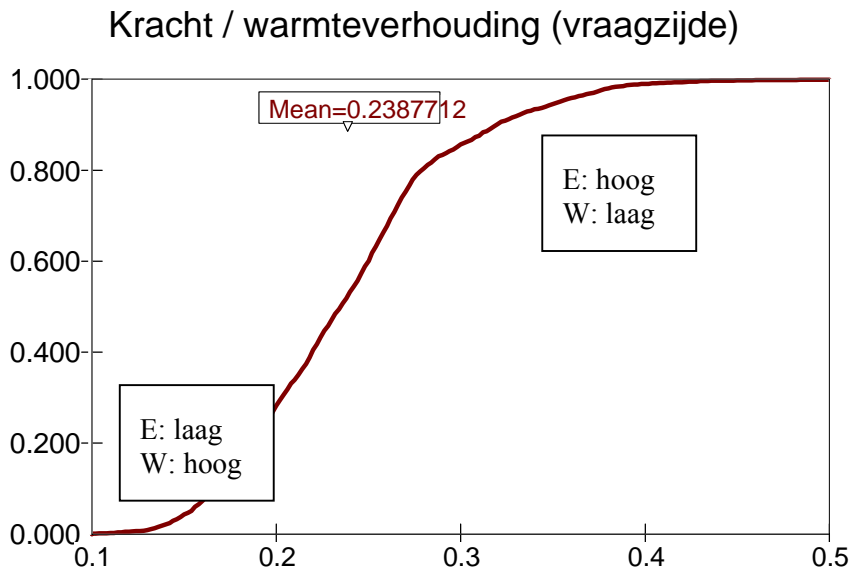


Figure 2-8 De cumulatieve verdelingsfunctie van de verhouding van de jaar-gemiddelde elektriciteits- en warmtevraag van Nederlandse woningen.

Uit bovenstaande figuur blijkt dat de verhouding van de gemiddelde elektriciteits- en warmtevraag van Nederlandse woningen met 90 % waarschijnlijkheid varieert tussen 0,15 en 0,35. Gemiddeld bedraagt deze 0,24. Hierbij is verondersteld dat de vraag naar elektriciteit en warmte zwak positief gecorreleerd zijn ($r = 0,65$).

Deze, grote mate van variatie wordt voornamelijk bepaald door de variatie in de elektriciteitsvraag. Minder invloed hebben de variatie in de vraag voor ruimteverwarming of de variatie van het ketelrendement (HR, VR of CR ketel), zoals blijkt uit onderstaande figuur.

Correlaties voor kracht/warmteverhouding

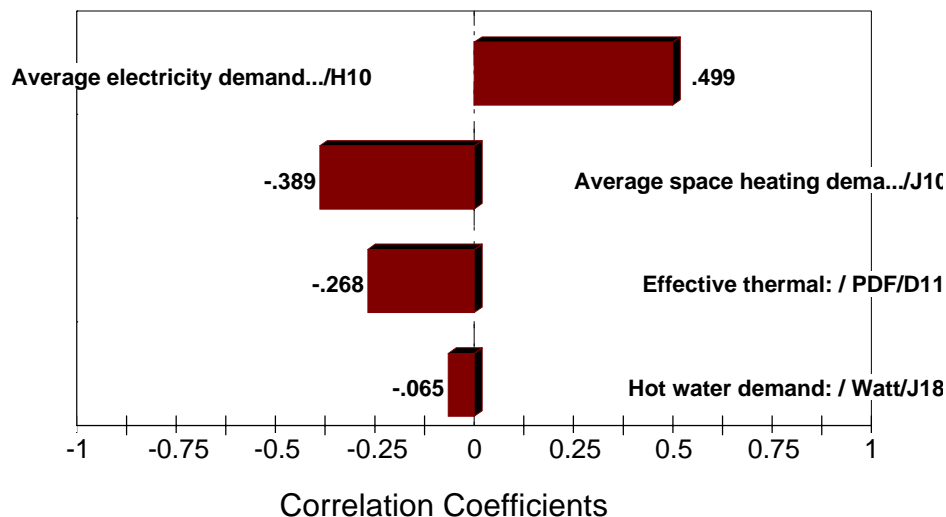


Figure 2-9 Voornaamste bronnen voor de variatie in de kracht/warmte-verhouding van Nederlandse woningen aan de vraagzijde.

2.5 Warmtevraagpatronen

2.5.1 Ruimteverwarming

Door de unit DEGO zijn warmtevraagpatronen voor ruimteverwarming voorspeld met behulp van TrnSys simulaties van het warmteverlies door de woningschil naar de omgeving en bij veronderstelde comfortniveaus (gewenste binnentemperatuur op gegeven momenten), voor de diverse typen bestaande woningen. Om seizoensinvloeden op de warmtevraag te kunnen zien is een geheel jaar gesimuleerd, met een tijdsresolutie van 15 minuten [11].

Ter illustratie wordt in onderstaande figuur het warmtevraagpatroon voor een twee-onder-één kapwoning getoond in de winter.

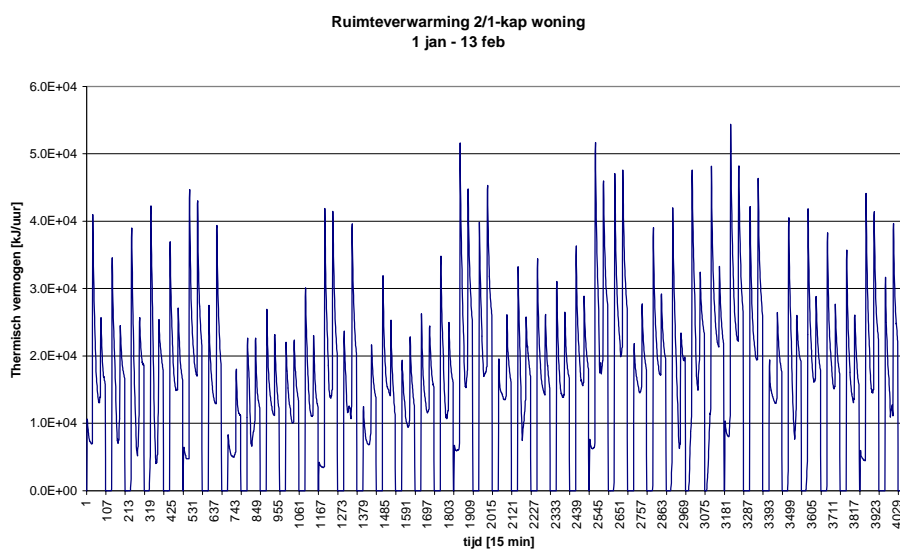


Figure 2-10 Een ruimteverwarmingsvraagpatroon voor een twee-onder-één kapwoning, in de periode 1 januari t/m 13 februari (TrnSys simulatie).

De vraag naar ruimteverwarming is seizoensbepaald, zoals blijkt uit onderstaande grafiek van het verloop van het cumulatieve gasgebruik voor ruimteverwarming over het jaar.

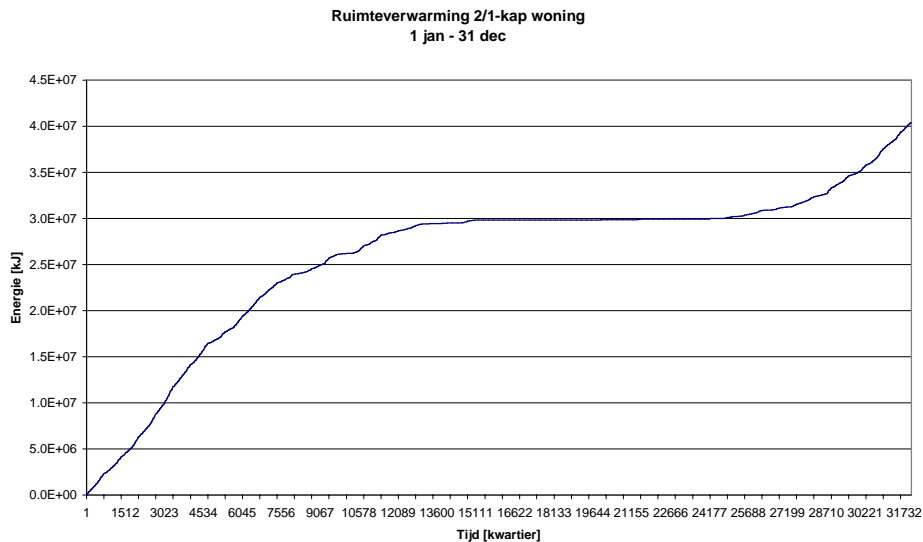


Figure 2-11 *Het verloop van de cumulatieve energievraag voor ruimteverwarming, in de periode 1 januari t/m 31 december.*

De gesimuleerde tijdsreeks voor de vraag naar ruimteverwarming vertoont periodieke fluctuaties. Een fouriertransformatie toont aan met welke frequenties het thermische vermogen opgewekt wordt. Zie ook onderstaande figuur.

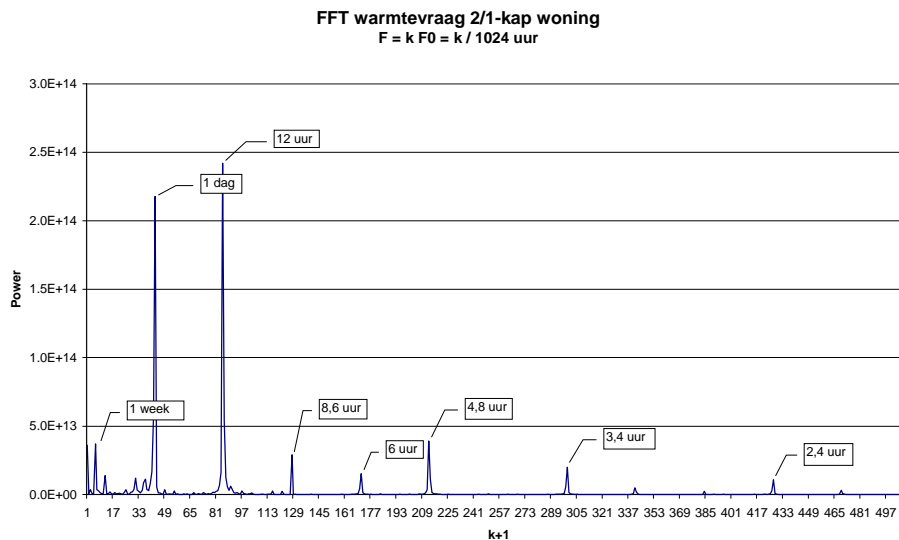


Figure 2-12 *Het frequentiespectrum van het vraagpatroon voor ruimteverwarming, in de periode 1 januari t/m 13 februari.*

De dominante frequentie waarmee de warmtevraag fluctueert is twee maal per etmaal, met andere woorden de ochtend- en avondperiode in het tijdspatroon van figuur 2.8. Gedurende de winterperiode is vervolgens het etmaalritme het sterkst aanwezig (rotatiesnelheid van de aarde). Echter over het jaar gemiddeld is dit aandeel slechts 60 % van het 12-uursritme. Andere dominante frequenties zijn het weekritme en perioden van eens per 8,6, 6, 4,8 en 3,4 uur. Met deze (veronderstelde) regelmaat wordt het bewonersgedrag gesimuleerd.

2.5.2 Tapwater

Volgens de norm NEN 5128 [4], moet apparatuur die voorziet in de vraag naar warm tapwater in staat zijn om onderstaand vraagpatroon te kunnen volgen. Er is een vraag ten behoeve van douchen (of een bad nemen), spoelen, na spoelen, wastafel, handen wassen, vaatwassen, korte tap en dergelijke. De temperaturniveaus hierbij zijn 40 en 55 °C. Echter, om legionellagroei in het leidingstelsel te voorkomen, wordt pas op het tappunt zelf deze temperatuur ingesteld door warm water van 65 °C te mengen met koud water van 10 °C. De tijdsduur van de tapmomenten is doorgaans erg kort: in 80 % van de gevallen minder dan een halve minuut. De μ WK generator moet derhalve in staat zijn om warm water van 65 °C te kunnen leveren, met een vermogen dat bepaald wordt door het thermische vermogen waarmee gedouched wordt, respectievelijk een bad gevuld wordt. Voor deze voorziening wordt het μ WK systeem doorgaans uitgebreid met een tapwaterbuffer (vanwege de dynamiek van het vraagpatroon) en een piekbrander. Het gevraagde, gemiddelde, continue thermische vermogen is 368 Watt. De totale tijdsduur van deze normvraag is 34 minuten per etmaal.

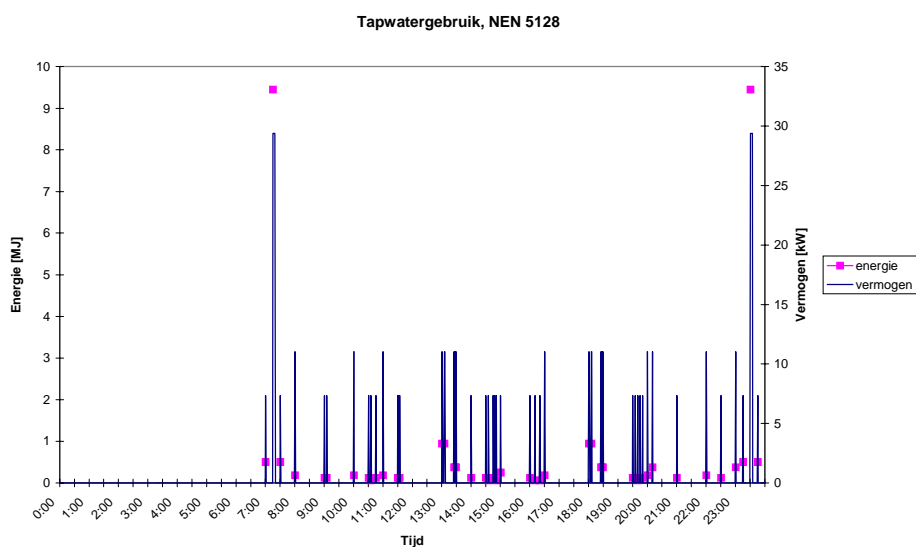


Figure 2-13 *Gestandaardiseerd warm-tapwatervraagpatroon, volgens NEN 5182.*

2.6 Gezamenlijke dynamische energievraag

Tenslotte wordt in onderstaande figuur een realistische energievraagpatroon weergegeven, dat voortkomt uit de behoeften aan elektriciteit, ruimteverwarming en tapwater. We zien dat het tapwaterpatroon gekenmerkt wordt door de hoogste vermogens en tevens door de kortste tijdsduur van het vraagmoment. Dit dynamische karakter wordt ondervangen door toepassing van buffering, waardoor de generator gelijkmatig bedreven kan worden en niet op het piekvermogen gedimensioneerd hoeft te worden. Daarentegen laat het vraagpatroon voor ruimteverwarming de minste dynamiek zien.

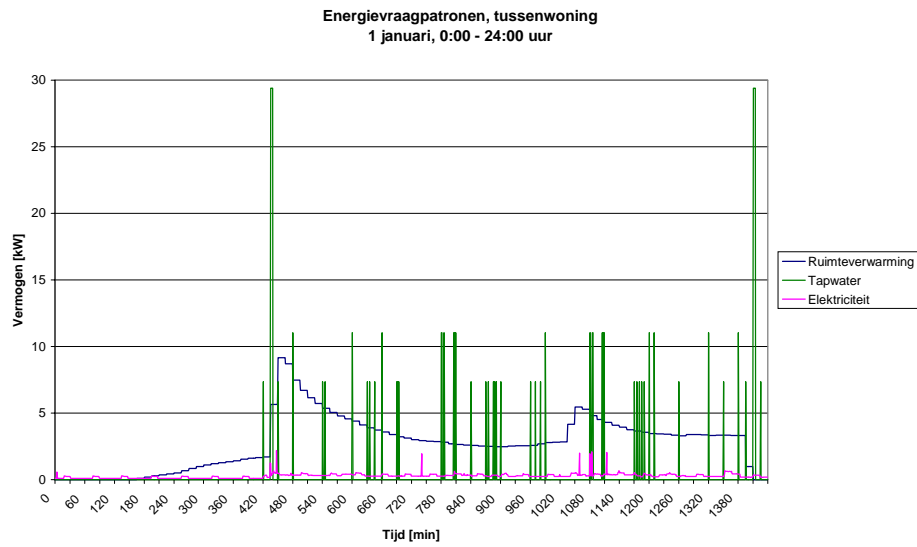


Figure 2-14 *Gezamenlijke energievraag van een tussenwoning, gedurende een etmaal in januari.*

3. ENERGIEVOORZIENING VAN HUISHOUDENS

3.1 Referentiesituatie

De te bereiken emissiereductie en primaire energiebesparing bij toepassing van micro-WK systemen in Nederlandse huishoudens, wordt bepaald ten opzichte van een gekozen referentiesituatie. Deze referentie bestaat uit centraal opgewekte elektriciteit afkomstig van kolen en gas gestookte centrales, zonder restwarmtebenutting. Elektriciteit wordt vervolgens met behulp van het landelijke transport- en distributienet naar de eindverbruiker getransporteerd. Hierbij vindt spanningsaanpassing plaats, waarbij een zo groot mogelijke afstand met hoge spanning afgelegd worden, om de transmissieverliezen ($\sim I^2$) te beperken. In de huidige situatie gelden hiervoor de volgende kengetallen voor omzettingsrendement en specifieke emissies.

Table 3-1 *Bestaande situatie voor de centrale elektriciteitsvoorziening van Nederlandse huishoudens [SEP, 1998].*

Elektrisch rendement, incl T&D verliezen	41,2	%, LHV
CO ₂ emissie	187	kg/GJ _{elektriciteit}
NO _x emissie	25	g/GJ _{primaire}

Naar verwachting zal het parkrendement zich in de zichtperiode tot en met 2020 kunnen variëren tussen 39 % bij een toename van het aandeel kolencentrales (goedkopere productie bij liberalisering) tot maximaal 58 % voor moderne, nieuwe gasgestookte centrales. Ook de specifieke CO₂ en NO_x emissies zullen hierdoor variëren, van respectievelijk 56 tot 80 kg/GJ_{primaire} en 16 tot 44 g/GJ_{primaire}.

Voor de warmteproductie wordt momenteel een mix van aardgasgestookte centrale-verwarmingsketels gebruikt, volgens onderstaande tabel.

Table 3-2 *Warmteproductie voor ruimteverwarming [2].*

Type	Rendement			Marktaandeel
	Min	ML	Max	
HR ⁹	90 %	100 %	107 %	21 %
VR	80 %	89 %	95 %	42 %
CR	75 %	83 %	88 %	37 %
<i>Effectief rendement:</i>	88,2 %			

Onderstaande tabel geeft de apparatuur weer voor de bereiding van warm tapwater.

⁹ Er is sprake van een HR-type ketel, wanneer het rendement hoger is dan 90 % op onderwaarde.

Table 3-3 *Apparatuur voor de bereiding van warm tapwater [2].*

Type	Rendement			Marktaandeel
	Min	ML	Max	
Gasboiler	36 %	40 %	45 %	3 %
Combiketel voorraad	36 %	40 %	45 %	13 %
Combiketel doorstroom	41 %	45 %	50 %	45 %
Keukengeiser	42 %	45 %	50 %	22 %
Badgeiser	45 %	50 %	55 %	17 %
<i>Effectief rendement:</i>	45,2 %			

De rendementen voor de bereiding van warm tapwater zijn significant lager dan die voor ruimteverwarming. De reden is voornamelijk gelegen in het warmteverlies tijdens het transport naar het tappunt, in relatie tot de korte duur van de tapmomenten (stilstands- en leidingverliezen). Overigens komt dit warmteverlies weer deels ten goede aan de opwarming van de ruimte.

Bovenstaande tabellen geven de huidige situatie weer, waarbij het effectief rendement bepaald is door weging met het marktaandeel van betreffend apparaattype.

Als referentie voor de warmteproductie, wordt het micro-WK systeem echter vergeleken met een HR ketel, omdat dit in het merendeel van de gevallen het keuze-alternatief is bij aanschaf van een nieuwe verwarmingsinstallatie.

3.2 Micro-WK Concepten

3.2.1 Definitie

Warmtekrachtsystemen zijn systemen voor elektriciteitsproductie, waarbij de geproduceerde warmte wordt benut om in een warmtevraag te voorzien. Het voorvoegsel micro duidt aan dat hier gaat om warmtekrachtsystemen op de kleinst nuttige schaal. Dit betekent dat micro warmtekrachtsystemen zijn uitgelegd voor toepassing op het niveau van individuele woningen en andere gebouwen met vergelijkbare warmtevraag. Een micro-WK systeem kan gezien worden als een nieuw type aardgasgevoede hoog-rendementsketel, dat naast warmte voor ruimteverwarming en tapwatervoorziening tevens elektriciteit voor huishoudelijk gebruik en voor levering aan het energiebedrijf, produceert.

Er is sprake van besparing van primair energiegebruik, doordat alle elektriciteit die opgewekt wordt door middel van het WK-systeem leidt tot vermeden lozing van restwarmte bij de elektriciteitscentrale. Dit zorgt tevens voor vermeden emissie van CO₂. Aangezien er tevens sprake is van een verschuiving in de samenstelling van primaire energie, waarbij de kolen/aardgas mix vervangen wordt door aardgas, is het effect van vermeden CO₂ emissie nog sterker dan het besparingseffect op primaire energie.

3.2.2 Inpassing in individuele woningen

In onderstaande figuur wordt schematisch de systeemconfiguratie voor een huishoudelijk toepassing van een micro-WK systeem weergegeven.

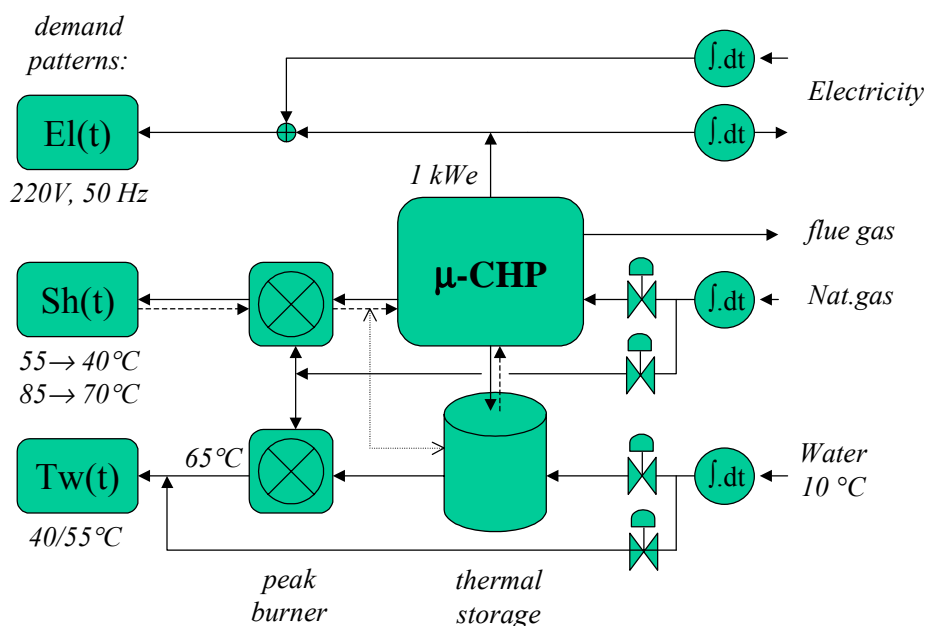


Figure 3-1 *Micro-WK systeemconfiguratie voor de huishoudelijke energievoorziening, bij plaatsing “achter de meter”, voor rekening van de particulier.*

Uitgaande van de tijdsafhankelijke energievragen voor elektriciteit, $El(t)$, warmte voor ruimteverwarming, $Sh(t)$ en warm tapwater, $Tw(t)$, worden deze behoeften als volgt door het micro-WK systeem en zijn randapparatuur voorzien¹⁰.

Door netkoppeling wordt de mismatch in elektriciteitsvraag en -aanbod vereffend (electriciteits-bufferwerking). Hiertoe is het systeem niet alleen gekoppeld met het aardgas- en waterdistributienetwerk, maar tevens met het elektriciteitsnet.

Vooralsnog is gekozen voor een elektrische systeemcapaciteit van 1 kilowatt, wat ruim 2,5 maal het gemiddelde afgenomen elektrische vermogen van het gemiddelde Nederlandse huishouden bedraagt (3300 kWh/jaar \cong 375 Watt_{continu}).

Door de keuze van de nominale elektrische capaciteit van het micro-WK systeem, wordt tevens de nominale thermische capaciteit vastgelegd. Voor systemen met een nominaal elektrisch vermogen van 1 kilowatt, zal het thermisch vermogen niet ten alle tijden voldoende zijn om in een piekvraag naar warmte te kunnen voldoen. Hierdoor wordt (in het bijzonder bij brandstofcellen) het systeem tevens uitgerust met een piekbrander met een hoog thermisch rendement (HR-ketel). Deze wordt met name gebruikt bij douchen, wanneer het maximale thermische vermogen gevraagd wordt.

¹⁰ In de toekomst zal tevens een vraag naar koeling ontstaan, naar analogie van de opkomst van air-conditioning systemen in personenvoertuigen. Dit leidt tot een extra toename van de elektriciteits- of warmtevraag, afhankelijk van het toegepaste principe van koude-opwekking.

Door het toepassen van tijdelijke warmteopslag wordt het vraagpatroon afgevlakt¹¹ en kan de capaciteit van het micro-WK systeem kleiner zijn dan de piekvraag en zal bovendien de bedrijfstijd (equivalente vollasturen) toenemen.

Het micro-WK systeem moet bovendien in staat zijn om de gevraagde kwaliteitsniveaus voor elektriciteit en warmte te kunnen leveren. Voor elektriciteit betekent dit transformatie naar 220 V en 50 Hz binnen nauwe bandbreedtes, waarbij de faseverdraaiing tussen stroom en spanning voor netgekoppelde opwekkers, beperkt moet blijven: $|\cos(\varphi)| > 0,9$. Dit vereist voor een brandstofcel dat de geproduceerde gelijkstroom met behulp van een inverter omgezet wordt in wisselstroom. Bovendien wordt de lage spanning van circa 40 V getransformeerd naar 220 V. Het biedt evenwel voordeel om de brandstofcel te ontwerpen voor een hogere gelijkspanning (meer cellen, minder actieve oppervlakte per cel), om de inverterverliezen (invloed van spanningsvallen over halfgeleider p-n overgangen) te beperken. Dergelijke typen inverter worden ook ontwikkeld voor toepassing van netgekoppelde PV systemen. De regelstrategie verschilt echter. Bij PV systemen vindt 'maximum-power-point tracking' plaats, waarbij het dynamische werkpunt steeds overeenkomt met de maximumwaarde voor spanning maal stroomsterkte. Voor een brandstofcel betekent dit een te lage werkspanning (circa de helft van de open-celspanning) en tevens een te laag elektrisch rendement en een te hoge warmteproductie, wat ten koste kan gaan van de levensduur. De regelstrategie als onderdeel van de inverter moet dus tevens aangepast worden. Bovendien is een verdere kostprijsreductie nodig vanwege het ontwikkeldoel van maximaal 1350 €/kWe meerkosten voor het totale micro-WK systeem, ten opzichte van een standaard HR ketel. Voor het Stirlingtype bewaakt de 'grid box' de netaanpassing, waarbij de Stirlingmotor zelf al, als een massa-veer-demper-systeem, afgestemd is op een resonantiefrequentie van 50 Hz.

Het kwaliteitsniveau van de warmtevraag wordt bepaald door de temperatuur van het transportmedium water. Bij ruimteverwarming is dit afhankelijk van het type verwarmingssysteem dat in de woning wordt toegepast. Van oudsher zijn dit 'hoge-temperatuur' systemen, waarbij de aanvoertemperatuur ca 85 °C en de retourtemperatuur ca 70 °C bedraagt. Deze relatief hoge temperaturen zijn noodzakelijk om, bij een relatief hoge warmtevraag (grotere, matig-geïsoleerde woningen), de benodigde radiatoroppervlakte te beperken. Daarentegen is bij nieuwere woningen de warmtevraag voor ruimteverwarming sterk verminderd, waardoor steeds vaker 'lage-temperatuur' verwarmingssystemen worden toegepast, waarbij de aanvoer- en retourtemperatuur respectievelijk 55 en 40 °C bedraagt. Dit heeft als niet-onbelangrijk neveneffect dat het thermische rendement van de verwarmingsketel toeneemt! De HR ketel kan nu deels condenserend bedreven worden, waardoor de latente warmte van de bij de verbranding geproduceerde en gecondenseerde waterdamp overgedragen kan worden. Deze latente warmte maakt liefst 10,7 % uit van de (onderste) verbrandingswaarde van het gebruikte aardgas. Vooral bij toepassing van een micro-WK systeem op basis van PEM technologie is het van belang welk type verwarmingssysteem toegepast is in de woning. Immers, deze lage-temperatuur atmosferische brandstofcel produceert zelf warmte van (slechts) circa 70 °C. Bij warmteoverdracht naar het afnamecircuit treedt exergieverlies op waardoor de maximale aanvoertemperatuur circa 60 °C bedraagt, wat te laag is voor een 'hoge-temperatuur' verwarmingssysteem (de retourtemperatuur is reeds 70 °C).

¹¹ Laag-doorlaat filterwerking van een energiebuffer op de dynamiek van de betreffende energiestroom: door in een file voldoende afstand te bewaren tot je voorganger, kun je gelijkmatiger doorrijden.

In die gevallen moet worden overwogen om de piekbrander de temperatuur te laten toenemen tot de vereiste 85 °C, wat evenwel ten koste gaat van het elektriciteitsproductie- en energiebesparingspotentieel. PEM-type μ WK systemen lijken hierdoor meer geschikt te zijn voor nieuwbouwwoningen met een lage-temperatuur verwarmingssysteem. Ook de warmtekrachtverhoudingen aan vraag- en aanbodzijde stemmen dan beter overeen (n.b.: dit geldt ook voor SOFC μ WK systemen). De afzetmogelijkheid voor warmte is echter beperkt in nieuwbouwwoningen, waardoor de thermische capaciteit van het μ WK systeem te hoog en de equivalente-vollasstbedrijfstijd te kort kan zijn. Dit vraagt om nog kleinere systemen dan met een nominaal elektrisch vermogen van 1 kWe.

Bij de tapwaterbereiding moet ook rekening worden gehouden met de potentiële groei van de Legionella bacterie, zeker wanneer er een opslagvat wordt toegepast. Hierdoor wordt als eis gesteld dat het water een temperatuurniveau van 65 °C moet bereiken, alvorens het gebruikt mag worden bij 40 en 55 °C. Opnieuw betekent dit voor het PEM systeem dat de piekbrander extra moet naverwarmen.

De jaarlijkse kosten worden met het energiebedrijf verrekend, op basis van de afgenomen hoeveelheden elektriciteit, aardgas en water, waarbij de particuliere investeerder een vergoeding ontvangt voor de hoeveelheid teruggeleverde elektriciteit. Dit wordt in bovenstaande figuur symbolisch weergegeven met integratoren ($\int \cdot dt$). Deze kosten en baten zijn in principe belast met BTW en REB (ecotax).

3.2.3 Bedrijfsstrategieën en optimalisatiemogelijkheden

Elektriciteit wordt bij voorkeur geleverd vanuit het micro-WK systeem omdat de daarbij geproduceerde warmte nuttig gebruikt kan worden, waardoor er primaire energie bespaard wordt en er sprake is van vermeden inkoop van elektriciteit. Beperkende factoren hierbij zijn enerzijds het gevraagde vermogen, dat op sommige momenten hoger kan zijn dan de nominale capaciteit van het micro-WK systeem (ca 1 kWe) en anderzijds de opslagmogelijkheid voor de restwarmte die vrijkomt bij de lokale elektriciteitsproductie wanneer niet gelijktijdig in een warmtevraag voorzien kan worden. Daarnaast kan de regelbaarheid van het micro-WK systeem een beperkende factor zijn, doch hierop kan bij het ontwerp geanticipeerd worden door de responsietijd voldoende kort te maken (circa 90 seconden, zoals eerder aangetoond is). In alle gevallen waarin het gevraagde elektrische vermogen niet geleverd kan worden door het micro-WK systeem, wordt dit aangevuld door inkoop vanuit het distributienet.

Aangezien de investeringsruimte hoofdzakelijk gecreëerd wordt door vermeden inkoop van elektriciteit (het gasverbruik neemt immers toe), zal een optimale procesregeling prioriteit geven aan het volgen van het elektriciteitsvraagpatroon. Niet alleen is dit gunstig voor de rentabiliteit van de meerinvestering voor het micro-WK systeem, doch is deze strategie ook gunstig vanuit een energiebesparings- en emissiereductieoogpunt.

Een voorwaarde is evenwel dat alle geproduceerde restwarmte in dat geval ook nuttig aangewend wordt: ofwel momentaan danwel op een later moment door middel van tijdelijke opslag. Met andere woorden: lozing van restwarmte wordt niet toegestaan vanwege de doelstelling van primaire energiebesparing en emissiereductie. Dit uitgangspunt wordt gehanteerd, ondanks dat de rentabiliteit gebaat kan zijn bij restwarmtelozing. Namelijk in het geval dat een

elektriciteitsvraag voorzien kan worden uit het micro-WK systeem, waarbij de marginale kosten minder bedragen dan de elektriciteitsprijs, maar waarbij er geen afzetmogelijkheid is voor de geproduceerde restwarmte (momentaan of op een later tijdstip, doordat de warmtebuffer reeds volgeladen is). Om in alle gevallen bij relatief geringe elektrische rendementen, primaire energie te kunnen besparen is het van belang om steeds te streven naar een hoge waarde voor het totaalrendement van het micro-WK systeem.

Voor de particulier als eindgebruiker kan het om economische redenen voorts ongunstig zijn om terug te leveren aan het net. Dit is met name het geval indien REB (ecotax) betaald wordt over het aardgasgebruik en waarbij een relatief lage terugleververgoeding ontvangen wordt van het energiebedrijf. Dan kan gemakkelijk een situatie ontstaan waarin de marginale elektriciteitsproductiekosten hoger zijn dan de terugleververgoeding. Deze productiekosten worden gegeven door onderstaande relatie.

$$\text{COE} = 3,6 \text{ FP}/(\text{LHV} \cdot \eta_{\text{el}})$$

Met COE de cost of electricity [€/kWh], FP de fuel price [€/m³], LHV de onderste verbrandingswaarde van aardgas [31,65 MJ_{th}/m³], η_{el} het netto elektrische rendement van het μ WK-systeem en met 3,6 MJ_{el}/kWh. We zien dat de huidige consumenten-aardgasprijs van 0,414 €/m³ (incl BTW en REB), bij een elektrisch rendement van 30 % leidt tot een marginale elektriciteitskostprijs van 0,157 €/kWh. Deze is reeds vergelijkbaar met de huidige consumentenprijs van 0,161 €/kWh. In de situatie waarbij de elektriciteitsmeter terugdraait bij teruglevering aan het net, geldt het consumententarief tevens als terugleververgoeding. Deze situatie is kostenneutraal voor een (brandstofcel) μ WK systeem met een elektrisch rendement van 30 %. Echter, wanneer ofwel de terugleververgoeding lager is dan de verkoopprijs, ofwel het elektrisch rendement van het μ WK systeem (beduidend) lager is dan 30 %, en zeker wanneer beide situaties gelden, is teruglevering aan het net nadelig voor de rentabiliteit van de investering in het μ WK systeem. De marginale kosten zijn dan hoger dan de baten. In dergelijke gevallen ontstaat er een investeringsruimte voor (ontwikkeling en) toepassing van lokale elektriciteitsopslagvoorzieningen.

Daarnaast is er sprake van een inconsistentie in de huidige tariefstelling. Namelijk over de elektriciteit die door het micro-WK systeem is opgewekt, maar waarvoor geen momentane vraag bestaat, waardoor deze elektriciteit verkocht wordt aan het energiebedrijf en waarvoor op een later tijdstip deze elektriciteit wordt (terug)gekocht van het energiebedrijf, wordt opnieuw (dubbel) ecotax betaald: in eerste instantie over het gebruikte aardgas en in tweede instantie bij terugkoop van het energiebedrijf. Hiervan is sprake wanneer het elektriciteitsnet als 'opslagcapaciteit' wordt gebruikt, en niet als distributienet, waarvoor het oorspronkelijk bedoeld is.

De regelstrategie zal dus binnen de randvoorwaarden van hergebruik van de door het micro-WK systeem geproduceerde restwarmte, preferentieel erop gericht zijn om het elektriciteitsvraagpatroon zo goed mogelijk te volgen, teneinde de investeringsruimte te maximaliseren. Dit kan echter een grote warmteopslagcapaciteit (etmaal-, week-, of zelfs seizoensbuffering) impliceren.

Echter, de regelstrategie zal erop gebaseerd zijn om de warmteproductie zo veel mogelijk door het micro-WK systeem te laten gebeuren, vanwege de co-productie van elektriciteit. Dit komt ten goede aan het besparings- en emissiereductiepotentieel en verbetert de rentabiliteit (immers kans op vermeden inkoop van elektriciteit).

Tenslotte is het systeem toegerust met één of meerdere energie-opslagvoorzieningen. Dit heeft zowel energetische als ook economische voordelen. Het belangrijkste economische voordeel bestaat wanneer er gebruik gemaakt kan worden van een elektriciteitsbuffer, omdat daarmee zowel voorkomen wordt dat een onrendabele terugleververgoeding ontvangen wordt over de met het micro-WK systeem opgewekte elektriciteit, maar waarvoor momentaan geen afzetmogelijkheid bestaat binnen het huishouden, als wordt voorkomen dat elektriciteit op een later moment tegen een hoog (consumenten-)tarief moet worden teruggekocht van het energiebedrijf. Hierbij is dus sprake van een tweeledig economisch voordeel, waardoor een investeringsruimte gecreëerd wordt voor een lokale elektriciteitsopslagvoorziening.

Daarnaast is er sprake van een energetisch voordeel dat zijn oorsprong vindt in de beperkte regelbaarheid van de micro-WK generator. Namelijk, met name het tapwatervraagpatroon is sterk dynamisch van karakter. Hier worden flinke thermische vermogens gevraagd gedurende korte tapmomenten. Dit vraagpatroon is 'hoogfrequent', terwijl de micro-WK generator een beperkte bandbreedte (frequentiespectrum) heeft, zoals eerder besproken is bij de analyse van de dynamiek van het elektriciteitsvraagpatroon. Door een warmtebuffer toe te passen voor de warmte die met de micro-WK generator wordt opgewekt kan toch de tapwatervraag door het micro-WK systeem geleverd worden, terwijl er co-productie van elektriciteit plaatsvindt. De buffer werkt als 'laag-doorlaat filter', waarbij de effectiviteit bepaald wordt door de opslagcapaciteit. Het alternatief is om de tapwatervraag geheel door de piekbrander te laten voorzien. Maar dan vindt geen coproductie van elektriciteit plaats en wordt niet optimaal gebruik gemaakt van het besparingspotentieel. Voor het 'laag-frequente' ruimteverwarmingsvraagpatroon zal de micro-WK generator voldoende snel regelbaar zijn, waardoor een opslagcapaciteit 'strikt genomen' niet noodzakelijk is. De reden om toch een warmtebuffer voor ruimteverwarming toe te passen is om de productie van warmte en elektriciteit in de tijd te ontkoppelen, om daarmee het micro-WK systeem zoveel mogelijk elektriciteitsvraagvolgend te kunnen bedienen. Immers, vermeden inkoop van elektriciteit is, naast de (onzekere) terugleververgoeding, de belangrijkste financieringsbron waarmee de meerinvestering rendabel gemaakt wordt. Dit vereist een in de tijd gezien flexibele, regelbare warmtekrachtverhouding van de micro-WK generator. In het extreme geval van seizoensopslag van warmte kan 's-zomers restwarmte van het micro-WK systeem opgeslagen worden, terwijl daar geen vraag naar bestaat. Het alternatief is dat het micro-WK systeem 's-zomers niet bedreven wordt, wat noch de rentabiliteit van de meerinvestering, noch de energiebesparing ten goede komt.

3.2.4 Optimalisatie

Een vrijheidsgraad in het ontwerpproces is voorts de keuze voor de systeemcapaciteit (elektrisch vermogen en buffercapaciteit). Deze kan uit energiebesparings-¹² of uit rentabiliteitsoogpunt¹³ geoptimaliseerd worden. In het laatste geval wordt het optimum bepaald door de balans tussen verhoogde investeringskosten voor een groter systeem, versus de mogelijkheid om een groter deel van de elektriciteitsvraag te laten leveren vanuit het micro-WK

¹² Bijvoorbeeld: minimalisatie van primair energiegebruik.

¹³ Bijvoorbeeld: maximalisatie van netto contante waarde.

systeem. Ook vindt een trade-off plaats tussen een extra investering voor opslagvoorzieningen versus vermeden-inkoop van energie.

Vanwege de inherente onzekerheden (bijv. rendementen, levensduur, kostenontwikkeling aardgas, elektriciteit en rente) en variabiliteit (bijv. energievragen, correlatie) van de systeemp parameters, kan hiervoor RiskOptimizer gebruikt worden (genetisch algoritme in combinatie met MonteCarlo simulatie voor optimalisatie onder onzekerheid). Dit is echter een behoorlijk rekenintensieve taak, maar garandeert wel een globaal optimum. Een alternatief voor de oplossing van dit wiskundige probleem, is het door ons ontwikkelde numerieke analysegereedschap ProDesign, dat gebaseerd is op een combinatie van mixed-integer linear en dynamisch programmeren (deterministisch) [den Ouden]. Deze optimalisatiestudies zijn voorzien als onderdeel van een vervolgstudie in 2002.

3.3 Kengetallen voor μ WK systeemvarianten

Voor de diverse typen micro-WK systemen komen we aldus tot de volgende kengetallen voor de prestaties bij nominaal bedrijf, waarbij de elektrische capaciteit 1 kWe bedraagt. Het betreft toekomstige systemen, waardoor naast variabiliteit vanwege de verschillende toegepaste werkingsprincipes, ook rekening gehouden wordt met onzekerheid omtrent de parameterwaarden [13, 14, 15].

Voor elk van de beide brandstofcelvarianten staan drie opties open om waterstof te produceren uit de primaire brandstof aardgas. Dit kan door middel van endotherme stoom-reforming, exotherme partiële oxidatie (aardgas-vergassing met een ondermaat aan lucht) of via een mengvorm: autotherme reforming met zowel water als lucht als reagentia. Stoomreforming vertoont de hoogste waterstofopbrengst, omdat de daarbij opgenomen warmte omgezet wordt in additionele waterstof. Er is echter een warmtebron op hoge temperatuur (ca 800 °C) voor nodig, die gevormd wordt door een deel van de brandstof te verbranden. Bij hoge-temperatuur SOFC kan de productwarmte van de stack (grotendeels) rechtstreeks gebruikt worden voor de reformreactie, zonder daarvoor extra brandstof te hoeven verbranden. Dit levert het hoogste elektrisch rendement op. Systemen met stoomreforming vertonen evenwel het hoogste elektrisch rendement, maar ook het laagste totaalrendement. Dit laatste komt door de relatief grote hoeveelheid waterdamp in het systeem, die gecondenseerd moet worden tegen een lage-temperatuur warmteput om de latente warmte te kunnen benutten. De verschillende performances worden als variabiliteit meegenomen in de bandbreedte voor de omzettingsrendementen in onderstaande tabel.

Table 3-4 Waarden van kengetallen voor de prestaties van 1 kWe micro-warmtekrachtsystemen, inclusief hun onzekerheidsmarges.

	Verwacht ¹⁴	Min	MW	Max	Eenh.
Stirling					
Elektrisch rendement	10,0	8	10	12	%
Totaalrendement	95,0	90	95	100	%
NO _x emissie	8				g/GJ _p
Gasmotor					
Elektrisch rendement	20,5	18	20	25	%
Totaalrendement	93,7	85	95	97	%
NO _x emissie	33	20	25	80	g/GJ _p
PEMFC-POX					
Elektrisch rendement	31,7	27	32	35	%
Totaalrendement	96,5	95	96	100	%
NO _x emissie	1				g/GJ _p
SOFC-SR					
Elektrisch rendement	39,0	33	39	45	%
Totaalrendement	89,5	80	90	97	%
NO _x emissie	1				g/GJ _p

3.4 Ramingen voor energiebesparing en emissiereductie

In deze paragraaf worden verwachtingen gegeven voor de jaarlijkse emissiereductie en primaire energiebesparing die bij toepassing van diverse typen micro-warmtekrachtsystemen in Nederlandse huishoudens, bereikt kan worden. Daarbij wordt een warmtebuffer voor de tapwatervoorziening toegepast, die gevuld wordt met restwarmte afkomstig van het micro-WK systeem. Voor de ruimteverwarmingsvraag wordt geen buffer toegepast, waardoor het systeem *ruimteverwarmings-vraagvolgend* bedreven wordt, teneinde de coproductie van elektriciteit te maximaliseren.

¹⁴ De verwachingswaarde komt overeen met een (uniforme- of Pert-) kansdichtheidsverdeling (PDF) op basis van de opgegeven minimale, meest-waarschijnlijke en maximale waarden. Voor een asymmetrische kansverdeling verschilt de verwachtingswaarde μ ($= \int x \cdot pdf(x) \cdot dx$) van de meest-waarschijnlijke waarde MW.

Table 3-5 *Energievraag in huishoudens en het referentiesysteem.*

	Verwacht	Min	MW ¹⁵	Max	Eenh.
Jaarlijkse vraag					
Elektriciteit	3133	2000	3200	4000	kWh
Ruimteverwarming	1867	500	1800	3500	m ³
Tapwater	388	330	375	500	m ³
Referentie					
Parkrendement	43,7	39	42	55	%
Parkemissie CO ₂ ¹⁶	71,8	56,2	74,7	75,8	kg/GJ _p
Parkemissie NO _x ¹⁷	27	16	25	44	g/GJ _p
HR ruimteverwarming	99,2	90	100	105	%
HR tapwater	71,7	50	70	100	%
HR NO _x	20				g/GJ _p

Afhankelijk van de warmtevraag zullen de verschillende 1 kWe μ WK systemen in meer of mindere mate de piekbrander moeten gebruiken om gevraagde thermische vermogenspieken te kunnen leveren. In de berekeningen is verondersteld dat er een opslagvoorziening aanwezig is, die rechtstreeks gevuld wordt door het μ WK systeem waarbij zoveel mogelijk co-productie van elektriciteit plaatsvindt (ruimteverwarmings-vraagvolgende regelstrategie). In onderstaande tabel staat weergegeven welk deel van de vraag naar ruimteverwarming afkomstig is van de piekbrander, waarbij dus geen co-productie van elektriciteit heeft plaatsgevonden. Dit aandeel is sterk gecorreleerd met de grootte van de veronderstelde warmtevraag.

¹⁵ Meest waarschijnlijke waarde.

¹⁶ Negatief gecorreleerd met het parkrendement, vanwege de samenstelling van de brandstofmix: $r = -1$.

¹⁷ Positief gecorreleerd met het parkrendement: $r = 0,8$.

Table 3-6 *Jaargemiddelde aandeel van de piekbrander in de vraag naar ruimteverwarming, voor 1 kWe μ WK systemen die voorzien zijn van een warmtebuffer voor de tapwatervoorziening (simulaties van seizoensinvloeden, op basis van energie-vraagpatronen, mbv. TOPICS) [R.P. de Smidt, 9].*

	Verwacht	Min	MW	Max	Eenheid
Energievraag					
Ruimteverwarming	1867	500	1800	3500	m ³ /jaar
Aandeel piekbrander					
Stirling	5,0	0	3	18	%
SOFC-SR	36,0	6	38	58	%
PEMFC-CPO	32,3	2	34	56	%
Gasmotor	20,3	0	19	46	%

Voor een gemiddelde, Nederlandse woning levert toepassing van deze vier typen 1 kWe, μ WK systemen de volgende relatieve energiebesparingen en emissiereducties op, ten opzichte van het referentiesysteem.

Table 3-7 *Relatieve brandstofbesparing voor netgekoppelde 1 kWe μ WK systemen, voorzien van een tapwaterbuffer [%].*

	Verwacht	Standaardafwijking
SOFC-SR	23,8	3,8
PEMFC-CPO	23,5	3,9
Gasmotor	18,2	3,3
Stirling	11,6	2,8

We zien dat de 1 kWe brandstofcellsystemen op het punt van relatieve primaire-energiebesparing vrijwel identiek scoren, ondanks de significante verschillen in elektrisch rendement. Dit wordt verklaard doordat een hoger elektrisch rendement weliswaar leidt tot meer vermeden centraal opgewekte elektriciteit en restwarmtelozing, maar dit wordt gecompenseerd door een groter aandeel van de piekbrander om in de warmtevraag te voorzien, waardoor de exergie verliezen weer toenemen. De warmteproductie van het μ WK systeem zelf neemt immers af wanneer het elektrisch rendement toeneemt.

Onderstaande figuur toont de cumulatieve waarschijnlijkheidsverdeling van de relatieve primaire energiebesparingen voor de vier micro-WK technologieën.

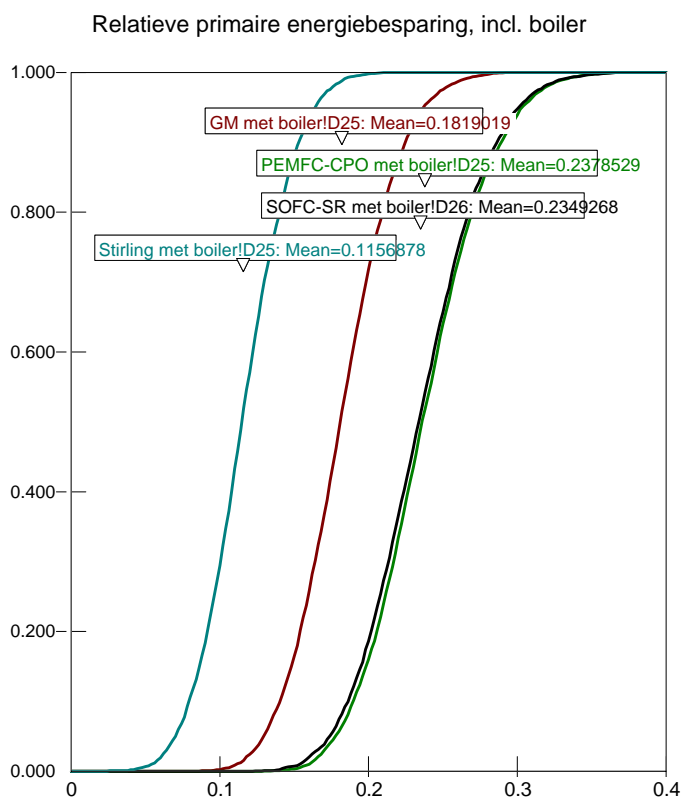


Figure 3-2 *Cumulative waarschijnlijkheidsverdelingen van de relatieve, primaire energiebesparing bij toepassing in de Nederlandse markt (1 kWe systemen met tapwaterbuffer).*

De relatieve CO₂ emissiereducties zijn steeds hoger dan de relatieve besparingen van primaire energie. Dit wordt veroorzaakt door een verschuiving van de brandstofmix, ten gunste van aardgas waarmee het μ WK systeem gevoed wordt.

Table 3-8 *CO₂-emissiereductie per huishouden, voor netgekoppelde 1 kWe μ WK-systemen, voorzien van een tapwaterbuffer.*

	Verwacht	Standaardafwijking	Eenheid
SOFC-SR	2,67	0,50	ton/jaar
PEMFC-CPO	2,30	0,40	ton/jaar
Gasmotor	1,64	0,34	ton/jaar
Stirling	0,95	0,26	ton/jaar

Table 3-9 NO_x -emissiereductie per huishouden, voor netgekoppelde 1 kWe μ WK-systemen, voorzien van een tapwaterbuffer.

	Verwacht	Standaardafwijking	Eenheid
SOFC-SR	2,23	0,29	kg/jaar
PEMFC-CPO	2,01	0,24	kg/jaar
Stirling	1,30	0,27	kg/jaar
Gasmotor	-0,33	0,68	kg/jaar

Ten aanzien van de NO_x emissie wordt verwacht dat toepassing van gasmotoren in circa 60 % van de gevallen leidt tot een *toename* van deze uitstoot (elektriciteitscentrale produceert minder NO_x), ondanks de reducties van CO_2 emissie en van primair energiegebruik. Dit effect wordt met onderstaand figuur voor de relatieve waarschijnlijkheidsverdeling geïllustreerd.

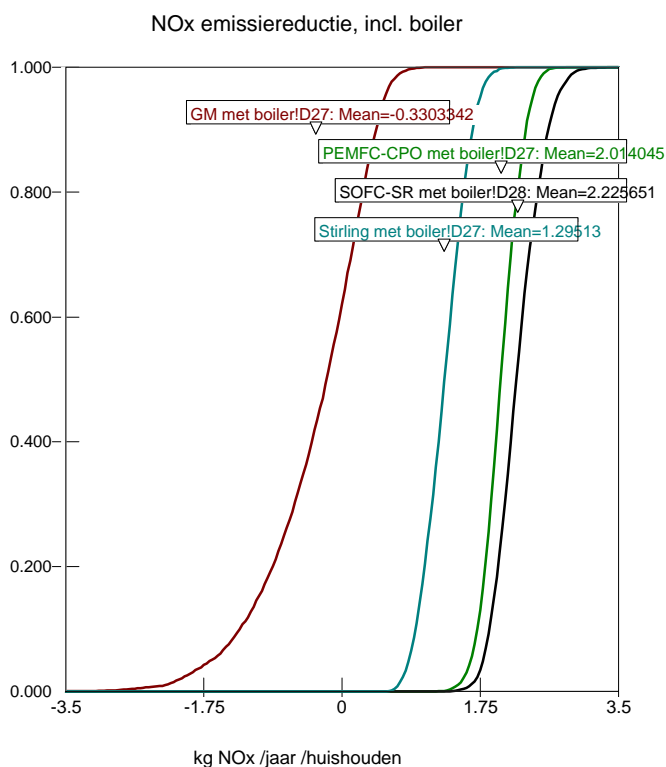


Figure 3-3 *Relatieve waarschijnlijkheidsverdeling van de jaarlijkse NO_x emissiereductie per huishouden, bij toepassing van de vier typen netgekoppelde 1 kWe, μ WK systeem, die voorzien zijn van een tapwaterboiler.*

In onderstaande tabel staat de netto, jaarlijkse elektriciteitsexport per huishouden weergegeven, bij de ruimteverwarmingsvraag-volgende regelstrategie.

Table 3-10 *Netto, jaarlijkse elektriciteitsexport per huishouden, voor netgekoppelde 1 kWe μ WK-systemen, voorzien van een tapwaterbuffer.*

	Verwacht	Standaardafwijking	Eenheid
SOFC-SR	3883	894	kWh/jaar
PEMFC-CPO	2244	637	kWh/jaar
Gasmotor	883	718	kWh/jaar
Stirling	-950	637	kWh/jaar

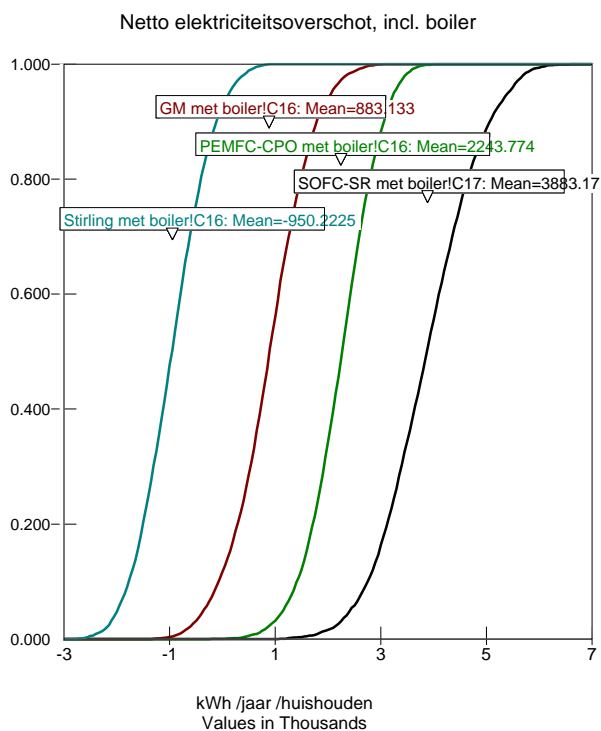


Figure 3-4 *Cumulatieve waarschijnlijkheidsverdelingen voor de netto jaarlijkse elektriciteitsexport door huishoudens met een 1 kWe, μ WK-systeem met tapwaterbuffer.*

We zien dat in alle typen woningen, de Stirling minder elektriciteit levert dan er jaarlijks gevraagd wordt, terwijl het omgekeerde het geval is voor de beide brandstofceltypen. Die kunnen jaarlijks meer elektriciteit maken dan een willekeurig huishouden vraagt.

Hier is duidelijk het effect van het elektrisch en daarmee thermisch rendement van de μ WK generator te zien. Een hoog elektrisch rendement betekent een laag thermisch rendement en daarmee hogere bedrijfstijd om in de

warmtevraag te voorzien. Hierdoor kan flink meer elektriciteit opgewekt worden dan het individuele huishouden vraagt. Weliswaar is dit gunstig voor de besparing op primair energiegebruik en voor de emissiereducties van CO₂ en NO_x, het is echter alleszins de vraag of dit ook economisch aantrekkelijk is. Dit hangt sterk samen met de onderlinge verhoudingen tussen de prijzen voor gasgebruik, elektriciteitsgebruik en teruggeleverde (verkochte) elektriciteit, nog afgezien van de toegepaste belastingen, respectievelijk vrijstellingen hiervan.

4. SWOT ANALYSE

In dit hoofdstuk beschrijven we voor kleinschalige micro-warmtekracht systemen, de sterkere maar ook (de vooralsnog) zwakkere aspecten van de diverse technologieën die momenteel ontwikkeld worden. Vervolgens worden hiervan de kansen en bedreigingen voor toepassing in Nederlandse huishoudens afgeleid [15, 16, 17].

Door diverse ontwikkelaars worden μ WK systemen ontwikkeld om in de huishoudelijke vraag naar elektriciteit en warmte voor ruimteverwarming en de bereiding van warm tapwater te voorzien. Alhoewel deze systemen momenteel nog niet beschikbaar zijn, is de verwachting dat de eerste systemen met een capaciteit van 1-5 kilowatt elektriciteit, na circa twee jaar (vanaf 2004) beschikbaar komen. Dit betreft bijvoorbeeld 1 kilowatt Stirling systemen van het Nederlandse EnAtEc micro-cogen B.V., waarvoor ECN de Stirling-technologie ontwikkelt, in samenwerking met ATAG Verwarming B.V. en ENECO Energie. Maar ook het Duits-amerikaans-Engelse Vaillant/GE/Plug-Power consortium en het Zwitserse SULZER Hexis, zijn vergevorderd in hun ontwikkeling van brandstofcellen systemen, respectievelijk op basis van lage-temperatuur PEMFC en hoge-temperatuur SOFC technologie. Daarbij maakt Sulzer gebruik van elektro-keramische componenten van InDEC B.V., een volle dochter van ECN: volgens het 'InDEC inside' principe. Prototypen van deze systemen ondergaan momenteel of binnenkort veldtesten, waarbij zij onder realistische omstandigheden beproefd worden.

Andere ontwikkelaars voor Stirling zijn onder andere het Duitse Solo Kleinmotoren, het Zwitserse SIG, het Noorse Sigma Elektroteknisk, het Engelse British Gas/Advantica/Sunpower en het Nieuw-Zeelandse Whisper Tech. Voor interne verbrandingsmotoren (gasmotoren) zijn dit onder andere: het Duitse SenerTec Dachs, het Zwitserse EcoPower, en het Japanse Honda. Voor brandstofcellen tenslotte, zijn dit onder andere: het Duits-amerikaanse Hamburg Gas Consult/DAIS Analytic en het Duitse Viessmann/DMC2/SGL/-SEG consortium.

4.1 Strengths

Een inherent sterk punt van het concept van de gecombineerde opwekking van warmte en kracht is dat er primaire energie bespaard wordt ten opzichte van de bestaande situatie met gescheiden opwekking. Dit komt door de benutting van restwarmte die vrij komt bij de elektriciteitsproductie. Door de introductie van micro-WK systemen in individuele huishoudens, wordt bereikt dat er aanzienlijk minder restwarmte wordt geloosd bij grootschalige elektriciteitscentrales, die immers niet gebaseerd zijn op het warmtekracht principe.

Een voorwaarde voor besparing op primaire energie is evenwel dat het micro-WK systeem een hoog totaalrendement heeft, vergelijkbaar met dat van een HR ketel. Dit heeft als nevenvoordeel dat er minder broeikasgassen (met name CO₂, NO_x en SO₂) worden uitgestoten. Dit besparingseffect is het grootst bij de brandstofcelvarianten, vanwege hun relatief hoge elektrisch rendement. Ten opzichte van de warmtevraag wordt met brandstofcellen de meeste elektriciteit opgewekt, in sommige gevallen zelfs meer dan het huishouden vraagt. De 1 kWe Stirlingmotor bespaart weliswaar het minst, maar altijd nog circa 12 % aan primaire energie en jaarlijks 0,95 ton CO₂ in het gemiddelde Nederlandse

huishouden. Voor de PEMFC- en SOFC- type μ WK systeem worden besparingen van 24 % verwacht van primair-energiegebruik en van jaarlijks 2,3-2,7 ton CO₂ verwacht, bij toepassing van 1 kWe systemen in een gemiddeld Nederlands huishouden. Vanwege enerzijds de variatie in warmte- en elektriciteitsvragen van huishoudens en anderzijds de verschillende warmtekrachtverhoudingen van deze technologieën, kunnen de besparingen nog hoger zijn, bij toepassing in daartoe geëigende marktsegmenten. Voor de Stirling zijn dit woningen met een relatief hoge warmtevraag, zoals grotere bestaande woningen. Voor de brandstofceltypen zijn dit woningen met een relatief geringe warmtevraag, danwel relatief hoge elektriciteitsvraag. Deze eigenschap van brandstofceltypen stemt overeen met de wijzigingstrend van het huishoudelijk energiegebruik, in de richting van zowel verminderde vraag naar warmte voor ruimteverwarming als ook een toenemende vraag naar elektriciteit! Daarbij zijn de brandstofcelvarianten bovendien een effectief middel ter voorkoming van NO_x emissie, dank zij de elektrochemische 'verbranding' van de brandstof, waarbij hoge temperatuurpieken voorkomen worden.

Het besparingseffect op de CO₂ emissie is sterker dan van primaire energie. Dit komt doordat er substitutie plaatsvindt, waarbij de brandstofmix (aardgas en kolen) van de elektriciteitscentrales vervangen wordt door aardgasgebruik van het micro-WK systeem, met een lagere specifieke CO₂ emissie: 56 in plaats van 75 kg CO₂ per GJ_{primair}.

Door plaatsing van de elektriciteitsopwekking binnen het huishouden van de eindgebruiker worden de energieverliezen voor transmissie en distributie, die momenteel gepaard gaan bij centraal-opgewekte elektriciteit, (merendeels) vermeden.

Door de mogelijkheid om zelf elektriciteit op te wekken, zal de bewoner en eigenaar van het μ WK systeem, minder last ondervinden wanneer er een onverwachte storing optreedt in de elektriciteitsvoorziening. Een onderbreking van de elektriciteitstoevoer betekent ook dat de CV ketel niet langer functioneert. Het μ WK systeem zal tenminste de basislast van de woning kunnen blijven voorzien van elektriciteit. Men wordt minder afhankelijk van het energiebedrijf om in zijn elektriciteitsbehoefte te blijven voorzien.

Nederland heeft dankzij de natuurlijke aardgasreserves een ongeëvenaarde goede infrastructuur waarbij nagenoeg¹⁸ alle bestaande woningen voorzien zijn van een aardgas aansluiting. Hierdoor kunnen μ WK systemen in principe in elke woning toegepast worden en zijn zij beter te integreren dan warmtepompen. Deze laatste vergen een verzwaarde elektriciteitsaansluiting (kostenverhogend) en extra gebouwgebonden voorzieningen om warmte aan de omgeving te kunnen onttrekken, namelijk buitenlucht- en/of bodemwarmtewisselaars. Bovendien kunnen μ WK systemen compacter uitgevoerd worden dan zonneboilers, die een relatief grote en zware warmtebuffer vergen om de ingevangen zonnewarmte tijdelijk op te slaan.

Stirling- en SOFC- μ WK systemen kunnen aangesloten worden op bestaande hoge- en lage-temperatuur centrale-verwarmingssystemen.

Hoge-temperatuur brandstofcellen zoals de Solid Oxide Fuel Cell, die een werkt temperatuur van ca 900 °C heeft, zijn in staat om aardgas intern om te

¹⁸ Afgezonderd enkele geïsoleerd liggende woningen op het platte land, die voorzien zijn van een opslagvoorziening voor huisbrandolie of butagas.

zetten in waterstof. Deze endotherme stoom-reformingsreactie met behulp van het verbrandingsproduct water, verzorgt bovendien een deel van de koeling van de brandstofcel, waardoor er sprake is van een fraaie synergie wanneer aardgas als brandstof wordt gebruikt voor de elektrochemische elektriciteitsopwekking.

4.2 Weaknesses

De lage-temperatuur PEM brandstofcel daarentegen stelt hoge eisen aan de kwaliteit van de brandstofsamenstelling, waarbij het aardgas in een aparte chemische fuel processor, die uit meerdere reactoren bestaat, omgezet wordt in schoon waterstof, waarmee de PEM wordt gevoed. Bovendien is de restwarmte die ontstaat in de brandstofcel van een laag temperatuurniveau¹⁹, waardoor deze niet zonder meer in een hoge-temperatuur verwarmingssysteem (85 → 70 °C) toegepast kan worden. Hiervoor moet additioneel brandstof verbrand worden, wat ten koste gaat van het besparingspotentieel. PEM systemen worden beter toegepast bij lage-temperatuur verwarmingssystemen (55 → 40 °C), zoals die geadverteerd worden voor nieuwbouw- en renovatiewoningen.

μWK Systemen die in huishoudens geplaatst worden, zullen niet volledig onafhankelijk van het elektriciteitsnet bedreven worden. Netuitwisseling is noodzakelijk om de ongelijktijdigheid van de elektriciteitsvraag en het elektriciteitsaanbod vanuit het μWK systeem mee op te vangen en bovendien, vanwege het sterk dynamische karakter van het vraagpatroon, om in de piek-elektriciteitsvraag te kunnen voorzien. Dit levert vooralsnog een kostenpenalty en een veiligheidsrisico op. Om het μWK-systeem elektriciteitsvraagvolgend te kunnen bedienen, wat gewenst is uit rentabiliteitsoogpunt (maximaliseren van de vermeden elektriciteitsinkoop), dient een opslagvoorziening aanwezig te zijn waardoor het warmteproductiepatroon ontkoppeld kan worden van het warmtevraagpatroon. Voor een volledige ontkoppeling van het warmtevraagpatroon is zelfs seizoensopslag van warmte noodzakelijk. Daarnaast zal om veiligheidsredenen gegarandeerd moeten kunnen worden dat het μWK systeem elektrisch ontkoppeld wordt van het transportnet in geval er werkzaamheden aan dit net verricht moeten worden. Dit veiligheidsvereiste geldt overigens evenzeer voor netgekoppelde PV systemen.

Ten aanzien van de levensduur worden (nog) hogere eisen gesteld aan de PEM brandstofcel, dan wanneer deze toegepast wordt in de transportsector. Momenteel zijn vrijwel alle automobielfabrikanten bezig om PEMFCs te ontwikkelen voor toepassing in personenvervoerstuigen en autobussen, waarmee grote R&D budgetten gemoeid gaan (orde: 1 miljard €). Echter, voor tractie wordt een levensduur verwacht van 4-5 duizend bedrijfsuren. Dit is onvoldoende voor stationaire elektriciteitsproductie. Hierbij is een levensduur van 40 duizend uren minimaal vereist, om te voorkomen dat de brandstofcel al te frequent vervangen zou moeten worden. De haalbaarheid van dit levensduurvereiste is nog niet aangetoond.

Wanneer μWK-systemen op basis van de gasmotor worden toegepast, moet rekening worden gehouden met een ontsparing van de NO_x uitstoot, ondanks de voorziening die reeds toegepast wordt om NO_x om te zetten. Qua primaire-

¹⁹ Atmosferisch bedrijf verlaagt i.h.a. de werktemperatuur, vanwege de eis van verzadigde voedingsstromen en de invloed op de waterstofconcentratie.

energiebesparing en CO₂-emissiereductie ligt de gasmotor in tussen de Stirlingmotor en de brandstofcelvarianten.

4.3 Opportuniteiten

De huidige wijze van de energievoorziening van Nederlandse huishoudens, met centraal opgewekte elektriciteit, doorgaans zonder restwarmtebenutting, en met decentrale (hoog-rendements-) centrale-verwarmingsketels voor de warmtevoorziening, kent nog een aanzienlijk verbeteringspotentieel. Een eenvoudige exergieanalyse toont aan dat er vier maal zo veel brandstof wordt gebruikt als er (theoretisch) minimaal nodig is om in de energievraag te voorzien: het overall-exergierendement bedraagt slechts 24 %.

Dankzij bovengenoemde voordelen van kleinschalige μ WK systemen voor toepassing in Nederlandse huishoudens, kan er een aanzienlijke energiebesparing, emissiereductie en ook kostenbesparing, gerealiseerd worden als middel om de verstrekkende overheidsdoelstellingen ten aanzien van efficiencyverbetering en emissiereductie te helpen realiseren.

Het kostentarget voor toepassing van brandstofcellen (PEMFC) in de vervoerssector is scherp: maximaal 100 €/kWe voor een 50-75 kilowatt generator. Indien dit target gehaald wordt, is ook de toepassing op een schaal van 1-5 kWe in stationaire, μ WK systemen ruimschoots binnen bereik. Toepassing in stationaire systemen kan dan ook als spin-off van de PEM ontwikkeling voor tractiedoeleinden gezien worden.

Onder invloed van concurrentie en keuzevrijheid voor particulieren uit meerdere energieleveranciers, wordt verwacht dat op termijn de elektriciteitsprijs, na een aanvankelijke daling, zal toenemen [22]. Dit werkt door ten voordele van zelfopwekkers zoals μ WK systemen, doordat de vermeden inkoop van elektriciteit meer waard wordt, waardoor de rentabiliteit van de investering in het μ WK systeem verder verbetert. Het is te hopen dat tevens de terugleverprijs voor momentaan te veel geproduceerde elektriciteit, daarbij toeneemt.

Voor energiebedrijven ontstaat, met de komst van μ WK systemen, de mogelijkheid om minder afhankelijk te worden van elektriciteitsinkoop van centrales, door zelf te investeren in deze systemen en ze te leasen aan de eindgebruiker. Hiermee ontstaat een nieuw type decentraal-verdeelde, “virtuele elektriciteitscentrale”, waarvan de aansturing plaatsvindt naar gelang de momentane belastingstoestand van de warmtebuffers en waarbij elektriciteit via het lokale elektriciteitsnet gedistribueerd wordt naar nabijgelegen afnemers.

Ook biedt een dergelijk business concept mogelijkheden voor nieuwe energiecoöperaties, bijvoorbeeld in beheer van bewoners, waarbij de kosten voor de bestaande infrastructuur mogelijk (gedeeltelijk) vermeden kunnen worden. In Engeland is aangetoond dat een dergelijk “private wire” business model levensvatbaar is [24].

Binnen Europa wordt verwacht dat de markt voor centrale-verwarmingssystemen, verder toeneemt. De vervangingsmarkt voor CV-ketels is tevens het grootste marktsegment, naast plaatsing in nieuwbouwwoningen, voor μ WK systemen.

Een behoefte aan air conditioning (koelen en drogen van lucht) is daarbij nog nauwelijks aanwezig. Maar met de introductie van airconditioning systemen in auto's moet niet worden uitgesloten dat het publiek ook in de nabije toekomst comfortverhogende koelapparatuur in de woning zal installeren. In deze studie

wordt echter nog geen rekening gehouden met het hiermee gepaard gaande extra energiegebruik.

Indien er op termijn een waterstof-infrastructuur gecreëerd wordt waardoor er lokaal géén CO₂ geëmitteerd wordt, dan kunnen brandstofcellen uitstekend ingepast worden voor de productie van elektriciteit en warmte, met een hoog omzettingsrendement. Als afvalproduct ontstaat daarbij uitsluitend schoon water [A. de Groot].

Deze technologieontwikkeling biedt een kans voor het Nederlandse bedrijfsleven om dit type systemen verder te commercialiseren. Een marktverkenning laat een verwachte, gemiddelde jaarlijkse omzet zien van 115 (BC) - 135 (Stirling) M€, voor de komende twintig jaren [12].

4.4 Threats

Een aantal factoren kunnen de potentiële voordelen van micro-warmtekracht-systemen aantasten. Dit betreft de volgende ontwikkelingen:

Een autonome verbetering van de prestaties van het referentiesysteem, door een stijging van het parkrendement en door een verschuiving van de samenstelling van de brandstofmix, ten gunste van het aandeel aardgas en tevens door een toename van het marktaandeel van HR ketels, vermindert het besparingspotentieel voor micro-WK systemen.

De toepassing vergt uiterst betrouwbaar opererende systemen, die met een onderhoudsinterval, onderhoudskosten en levensduur vergelijkbaar met een HR ketel toe moeten kunnen.

Kostenverhoging vanwege veranderend gebruik van elektriciteitsaansluiting. Waar de infrastructuur voor elektriciteitstransport oorspronkelijk bedoeld is om door distributie vanuit elektriciteitscentrales in de totale vraag te voorzien, vindt er een fundamentele verandering plaats wanneer deze voorziening in feite als opslag- en lokale distributievoorziening voor elektriciteit gebruikt wordt. Een mogelijk gevolg is dat hierdoor de vastrecht- en transportkosten zullen oplopen waardoor de ruimte voor een meerinvestering verminderd wordt.

Vanwege de relatief lage kosten voor een hoog-rendementsketel en de maximale meerkosten die een eigenaar naar verwachting bereid is te betalen bij aanschaf van een μ WK systeem, is het gestelde ontwikkeldoel van maximaal 1350 € voor een 1 kWe systeem voor de complexere systeemvarianten, vrij scherp.

Bovendien zal er aanvankelijk, bij vrijmaking van de energiemarkt voor huishoudens, uiterlijk voorzien voor 1 januari 2004, sprake kunnen zijn van een prijsdaling voor elektriciteit vanwege de ontstane concurrentie. Dit vermindert de marge voor investering in een μ WK systeem door een particulier, die immers ontleend wordt aan de vermeden inkoop van elektriciteit van het energiebedrijf.

Hiermee hangt ook de enigszins afwachtende opstelling van energiebedrijven samen, die met de komst van μ WK systemen hun afzetmarkt voor elektriciteit zien verminderen.

Een stijgende gasprijs heeft een nadelige invloed op de rentabiliteit van de investering in het μ WK systeem, doordat een huishouden meer aardgas zal gebruiken vanwege het lagere thermisch rendement ten opzichte van een HR ketel.

Onzekerheid omtrent beleidsvorming: REB, BTW, TLV, EPR, EPA, EPN-erkenning. Dubbelstelling van de REB bij tijdelijke teruglevering. Subsidies ter stimulering van de marktintroductie van μ WK systemen zijn momenteel nog niet voorhanden. Terwijl grootschaliger warmtekrachtsystemen vrijgesteld zijn van REB heffing over het brandstofgebruik, wordt gehoopt dat deze vrijstelling evenzeer voor kleinschalige, μ WK systemen van toepassing verklaard kan worden. Daarmee wordt dan eveneens voorkomen dat er een dubbele ecotax heffing plaats vindt, namelijk in eerste instantie over de gebruikte brandstof waarmee elektriciteit geproduceerd wordt en in tweede instantie over de elektriciteit die tijdelijk 'opgeslagen' wordt op het distributienet wanneer deze even later, door de zelfopwekker of zijn/haar buurman/vrouw, teruggekocht wordt van het energiebedrijf. Bovendien kunnen de marginale elektriciteitsproductiekosten gemakkelijk hoger zijn dan de terugleververgoeding, waardoor teruglevering onaantrekkelijk is voor de eigenaar/gebruiker van het μ WK systeem.

Ook in ontwerp-europese regelgeving ter stimulering van groene energie, door ontheffing van ecotax, worden micro-warmtekrachtsystemen nog niet erkend als een efficiënte energie-conversieoptie. Dit is mede het gevolg van het nog niet-bereikt hebben van de status van 'bewezen technologie'.

Een te snelle marktintroductie van nog niet voldoende-ver ontwikkelde μ WK technologie, kan een averechtse uitwerking op het publiek hebben. Dit blijkt eerder het geval te zijn geweest bij de introductie van warmtepompen, die gehinderd werd door frequente en ingrijpende onderhoudsbehoeften, door geluidshinder (bedrijf 's-nachts met goedkope dalurenstroom) en door tegenvallende prestaties.

Van de introductie van condenserende, hoog-rendementsketels kan geleerd worden dat de opleidingsbehoefte van installateurs en onderhoudstechnici gemakkelijk onderschat kan worden, waardoor de marktontwikkeling met enkele jaren vertraagd is. Het is raadzaam om hieraan op landelijke schaal tijdig en ruimschoots aandacht te besteden, middels voorlichting en instructie over deze voor hen geheel nieuwe technologieën!

Om de kostprijs van met name de brandstofcelvarianten te reduceren, is het belangrijk om grote aantallen ervan te produceren en te verkopen. In dit opzicht is het eveneens van belang dat de marktontwikkeling niet belemmerd zou worden door de onderhoudsbehoefte.

Efficiëntere inzet van fossiele brandstoffen, zoals met micro-warmtekracht, is de laatste optie in de Trias Energetica, waarbij beleidsmatig prioriteit gegeven wordt aan vraagreductie en de inzet van duurzame energievoorzienings-systemen, zoals uit biomassa, wind, zonlicht en zonne-, omgevings- en afvalwarmte. Echter, een doelstelling voor het energie-aandeel van 10 % uit duurzame bronnen in het jaar 2020, betekent dat vooralsnog ten minste 90 % van de energievraag voorzien wordt uit fossiele energiebronnen, met name door aardgas. Hierdoor loont het alleszins de moeite om de inzet daarvan zo efficiënt mogelijk te laten plaatsvinden.

Concurrerende opties die momenteel aangeboden worden, dan wel in ontwikkeling zijn: mini-WK voor utiliteitsbouw/flatgebouwen, zoals kleine gasturbines van rond 50 kilowatt elektrisch vermogen, stadsverwarmings-systemen en bij nieuwbouw (inpassing van een warmte-distributiesysteem).

5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De inzet van micro-WK systemen voor de energievoorziening van elektriciteit en warmte voor individuele, Nederlandse woningen leidt tot een afname van het primaire-energiegebruik en tot emissiereductie van CO₂ en van NO_x. Deze afnamen zijn evenwel afhankelijk van het toegepaste type systeem (Stirling, gasmotor of brandstofcel), van de dimensionering ervan (generatorcapaciteit en grootte van energiebuffer(s)), van de gehanteerde regelstrategie (warmte- of elektriciteitsvraagvolgend) en ook van de verhouding waarmee elektriciteit en warmte opgewekt en gevraagd worden door het huishouden. Rekening houdend met de variabiliteit van de energievraag en ook met onzekerheid omtrent de uiteindelijke kengetallen voor micro-WK technologieën en voor de referentietechnologie van gescheiden opwekking, worden primaire-energiebesparingen verwacht van 12 tot 24 %, bij toepassing van 1 kWe netgekoppelde micro-WK systemen op basis van Stirling-, respectievelijk brandstofceltechnologie, die ruimteverwarmingsvraag-volgend bedreven worden en voorzien zijn van een tapwaterbuffer. Door een verschuiving ten gunste van aardgasgebruik is het effect van CO₂ emissiereductie zelfs sterker dan dat van primaire-energiebesparing. Per gemiddeld huishouden kan zo jaarlijks 1,0 tot 2,7 ton CO₂-emissie vermeden worden. Daarnaast wordt een jaarlijkse emissiereductie van 1,3 tot 2,2 kg per gemiddeld huishouden verwacht voor de beide typen technologie.

Aangezien in de huidige (referentie)situatie met gescheiden (centrale) opwekking van elektriciteit en van warmte (decentraal), het aanzienlijke exergieverlies, waardoor er een (drievoudige) overmaat aan primaire energie ingezet wordt, voornamelijk plaatsvindt bij de warmteproductie (hoogwaardig aardgas wordt omgezet in laagwaardige warmte), moeten besparingsopties vooral gezocht worden bij de wijze van warmteopwekking. Zelfs warmteproductie met een geringe co-productie van elektriciteit, leidt daardoor al tot primaire-energiebesparing en tot CO₂-emissiereductie. Het Stirlingsysteem, met een elektrisch rendement van circa 10 %, is bovenal een elektriciteits-producerende HR ketel.

De investeringsruimte voor een μ WK systeem wordt vooral ontleend aan de vermeden inkoop van elektriciteit, naast de ontvangen vergoeding voor momentaan teveel geproduceerde elektriciteit. De gasrekening wordt (met name bij brandstofcellen) hoger, vanwege het extra gasgebruik waarmee elektriciteit gemaakt wordt. Deze elektriciteitsproductie vindt echter plaats met een marginaal thermisch rendement van 100 % (bij gelijkblijvend totaalrendement). De rentabiliteit van de meerinvestering is gebaat bij een zo hoog mogelijke gelijktijdigheidsgraad van elektriciteitsvraag en –aanbod. Echter, om wille van de energiebesparing en emissiereductie moet de restwarmte nuttig aangewend kunnen worden. Met name bij het Stirlingsysteem leidt dit tot het vereiste van een hoog totaalrendement. De ongelijktijdigheid tussen warmtevraag en –aanbod, wordt opgeheven door tijdelijke warmteopslag. Tenminste wordt een tapwaterbuffer toegepast.

Ten opzichte van de Stirlingvariant zullen de brandstofcelvarianten van μ WK systemen meer elektriciteit kunnen opwekken dan er gedurende een jaar door het huishouden gevraagd wordt. Voor het 1 kWe SOFC systeem wordt voor een gemiddeld huishouden meer dan het dubbele opgewekt. Dit komt voornamelijk door het hogere elektrische en daardoor lagere thermische

rendement. Uiteraard is dit gunstig voor de primaire energiebesparing en reductie van CO₂ en NO_x emissies. Het is echter vooralsnog onzeker of dit ook gunstig is voor de rentabiliteit van de (meer-)investering. Doorslaggevend hierbij is de marktprijs voor de door het huishouden geëxporteerde elektriciteit. Indien deze daalt tot onder de marginale kosten waarmee het elektriciteitsoverschot opgewekt wordt, dan is dit bedrijf onrendabel. De brandstofprijs is immers relatief hoog (kleinverbruikers betalen het hoogste tarief) en belast met BTW en met REB. Een elektriciteitsvraag-volgende regelstrategie is voor brandstofcellen belangrijker dan voor Stirlingsystemen, omdat een groter deel van de totale elektriciteitsinkoop vermeden kan worden. Dit vergt echter een grotere warmtebuffer, door de ongelijktijdigheid die ontstaat tussen de productie van en de vraag naar warmte.

Waar grootschalige (klassieke) warmte/krachtsystemen ontheven zijn van de ecotax- (REB-)heffing, zijn μ WK systemen hier vooralsnog niet van vrijgesteld. Om μ WK ook economisch aantrekkelijk te maken voor een particulier investeerder/gebruiker wordt er daarom voor gepleit om de ecotax hooguit te heffen over de daadwerkelijk afgenomen hoeveelheid gas en elektriciteit, en niet over het gasgebruik waarmee geëxporteerde elektriciteit is opgewekt.

De potentiële Nederlandse marktomvang voor μ -WK systemen bedraagt circa 400 duizend eenheden per jaar. Driekwart hiervan bestaat uit vervanging van bestaande CV ketels, in verband met een gemiddelde levensduur van 15 jaar. Het resterende deel bestaat uit toepassing in nieuwbouwwoningen. De woningen zijn al voorzien van een gasaansluiting en ook het elektriciteitsnet hoeft vanwege de geringe capaciteit (ca 1 kWe per woning) niet verzwaaard te worden. De installatie van elektrische warmtepompen vraagt doorgaans wel om een verzwaring van de elektriciteitsaansluiting.

Recente metingen van het elektriciteitsgebruikspatroon van individuele huishoudens, leveren waardevolle inzichten op omtrent het dynamisch karakter van de elektriciteitsvraag. Het dynamisch bereik is groot, met een piekvermogen dat circa 100 maal hoger is dan het minimumvermogen. Tevens is de dynamische bandbreedte groot, waardoor een elektriciteits-vraagvolgend bedreven μ WK systeem voldoende snel moet kunnen reageren op wisselingen in de elektriciteitsvraag. De vereiste stapresponsie wordt geschat op 90 seconden.

De optredende variatie in de jaargemiddelde kracht/warmteverhouding van Nederlandse woningen wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door variatie in de elektriciteitsvraag. Deze verhouding varieert tussen 0,15 en 0,35 (90 % betrouwbaarheidsinterval). Voor het ruimteverwarmingsvraagpatroon, zijn door DEGO voor een kalenderjaar tijdsreeksen afgeleid door middel van simulatie van het warmteverlies, voor diverse typen woningen, waarin sterke seizoensinvloeden zichtbaar zijn.

De waargenomen jaarlijkse toename van het elektriciteitsgebruik en de afname van de vraag naar ruimteverwarming, brengt de jaargemiddelde kracht/warmteverhouding van woningen steeds dichterbij die van brandstofcellen systemen toe.

De keuze voor de installatie van een μ WK systeem, maakt de bewoner minder gevoelig voor storingen in het elektriciteitsnet. Mits het systeem zelf voldoende betrouwbaar opereert, kan de beschikbaarheid over elektriciteit in de toekomst hoger zijn dan van het net. Eilandbedrijf moet dan mogelijk zijn, wat in principe in de huidige regelgeving verboden is. Ontheffing is alleen mogelijk bij type-goedgekeurde invertoren, die automatisch op eilandbedrijf

overschakelen, wanneer de momentane netspanning tot onder een ingestelde grenswaarde daalt.

Aanbevolen wordt om tijdig de inspanningen te richten op de opleiding van installatie- en onderhoudsmonteurs van verwarmingssystemen, omdat het gedrag van Stirling- en met name brandstofcelsystemen een technologisch hoogstaande combinatie is van thermische, mechanische, elektrotechnische, chemische, elektrochemische en materiaalkundige aspecten. Gebleken is dat destijds de introductie van condenserende HR ketels al onvoorzien vertraagd werd door het ontbreken van een landelijk bijscholingsprogramma voor de installatie- en servicemonteurs.

Binnen het onderzoeksprogramma wordt voorts aanbevolen om meer zicht te krijgen op optimale systeemdimensies (capaciteit en buffergrootte), voor diverse Nederlandse marktsegmenten, die gekarakteriseerd worden door energievraag en –tariefstelling. Mede in het licht van de komende vrijmaking van de energiemarkt voor huishoudens. Het optimale systeem dat een maximale energiebesparing nastreeft, zal in de warmtevraag voorzien door middel van maximale coproductie van elektriciteit en ook 's-zomers bedreven worden, ongeacht de vraag of deze elektriciteit leidt tot vermeden inkoop of tot export (warmtevraag-volgende regelstrategie). Daarentegen zal het optimale systeem dat een maximale investeringsruimte creëert, volledig elektriciteitsvraagvolgend bedreven worden (maximale vermeden elektriciteitsinkoop). Dit stelt evenwel zwaardere eisen aan de regelbaarheid van het systeem, omdat het elektriciteitsvraagpatroon een grotere dynamische bandbreedte bezit dan het ruimte-verwarmingsvraagpatroon. Het tijdelijke overschot aan warmte, dat met name 's-zomers ontstaat, dient dan met een voldoende grote warmtebuffer opgevangen te kunnen worden, om te vermijden dat er ontsparing optreedt. In beide gevallen zal de piekvraag vanuit het elektriciteitsnet betrokken moeten worden. Indien de tariefstelling zodanig is dat terugleveren onvoordelig is, zal een μ WK-brandstofcelsysteem de warmtevraag van een gemiddelde woning slechts gedeeltelijk kunnen dekken. De piekbrander zal dan een relatief groot deel van de warmtevraag bedienen, waardoor het energiebesparings- en emissiereductiepotentieel slechts ten dele benut worden (“economie versus ecologie”).

Ook het perspectief voor energiebedrijven, om te investeren in deze nieuwe μ -WK technologieën, waarmee de inkoop van centraal opgewekte elektriciteit afneemt maar het gasgebruik verder toeneemt, en waarbij de eindgebruiker tegen een aantrekkelijk tarief elektriciteit en warmte afneemt, behoeft verdere uitwerking. Ook juridische aspecten spelen hierbij een, mogelijk prohibitieve, rol [Jeeninga].

6. REFERENTIES EN LITERATUUR

- [1] Energie Verslag Nederland 2000. ECN Beleidsstudies. Petten, juni 2001.
- [2] *Basisonderzoek Elektriciteitsverbruik Kleinverbruikers BEK 1998*. EnergieNed. Arnhem, december 1999.
- [3] *Basisonderzoek Aardgasverbruik Kleinverbruikers BAK 1998*. EnergieNed. Arnhem, december 1999.
- [4] *NEN 5128: Energieprestatie van woningen en woongebouwen – bepalingsmethode*
- [5] Jeeninga H., Beeldman M., Boonekamp P.G.M.: *EPA Woningen – Nadere invulling van de EPA doelstelling voor woningen*. Rapport ECN Beleidsstudies ECN-C—01-001. Petten, januari 2001.
- [6] Gool, W. van: *Exergie en Energie*. Van Gool ESE Consultancy. Driebergen, 1998.
- [7] Laag P.C. van der: *Systeem- en Marktpotentieelstudie voor de ontwikkeling en introductie van micro-warmtekrachttechnologieën in Nederland*. ECN Engine projectvoorstel SF13. Petten, 29 juni 2000.
- [8] Huijsmans J.P.P.: *Plan Projectcluster micro-WK*. Petten, 13 december 2000.
- [9] Gastel M. van, Harmsen R., Smidt R.P. de: *LOCOGEN eindrapport: Marktkansen en pilots van micro-warmtekracht systemen*. Cogen Projects & ECN. Driebergen, 1 augustus 2001.
- [10] Laag P.C. van der, Zondag H.A., Visscher K.: *Het genereren van realistische elektriciteitsvraagpatronen*. PLAMOCO werkgroepsbijeenkomst. Petten, 26 september 2001.
- [11] Bakker E.J., Zondag H.A., Strootman K.J., Visscher K.: *Warmtevraagpatronen voor ruimteverwarming van bestaande woningtypen in Nederland*. ECN DEGO memo 00-033. Petten, december 2000.
- [12] Laag P.C. van der, Peppink G.: *Clusteranalyse: micro-WK*. ECN memo 8.27199-GR1. Petten, december 2000.
- [13] Seebregts A.J., Daniels, B.W., van der Laag P.C., Spoelstra S.: *Richtlijnen omgaan met onzekerheden in beleidsonderbouwende studies*. ECN. Petten, december 2000.
- [14] Vose D.: *Risk Analysis – a Quantitative Guide, 2nd Edition*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, UK, 2000.
- [15] Morgan M.G., Henrion M.: *Uncertainty – a Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge University Press. Cambridge, 1998.
- [15] Frost & Sullivan: *European Micro CHP Systems Market*. Report #3890-I4. London, July 2001.
- [16] Klein C.A.M. van der: *Micro CHP with PEMFC or SOFC for Domestic Application*. Congrespresentatie Fuel Cells 2001. Tokyo, 10 juli 2001.

- [17] Klein C.A.M. van der: *Fuel Cell Micro CHP Systems for Buildings*. Congrespresentatie 7th Grove Fuel Cell Symposium. Londen, 11 september 2001.
- [18] Zondag H.A., Bakker E.J., Strootman K.J., Visscher K.: *Thermische collectoren*. ECN DEGO memo 00-034. Petten, december 2000.
- [19] *Warmtepomp kan ook in woonhuizen helpt schelen in energiegebruik*. Technisch Weekblad. 14 Juni 2000.
- [20] *Warmtepompen getest in huis*. De Ingenieur nr 15. 20 September 2000.
- [21] Matheson D., Matheson J.: *The Smart Organization- Creating Value through Strategic R&D*. Harvard Business School Press. Boston, 1998.
- [22] Scheepers, M.J.J., et al.: *Energie Markt Trends 2001*. ECN Beleidsstudies rapport ECN-P--01-009. Petten, oktober 2001.
- [23] Acuña Calderón A.B.: *Micro Combined Heat & Power System for residential applications*. TU-E rapport. Eindhoven, zomer 2001.
- [24] Jones A., Fry M.: *Woking: Energy Services for the New Millennium*. Paper at F-Cells 2001: Commercialising Stationary Applications. London, August 2001.

LITERATUUR

- Bael J.van, Luyckx W.: *The First Micro Combined Heat and Power for Social Housing in Belgium*. Vito. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.
- Barrovecchio L. et al.: *A Proton Exchange membrane Fuel Cell in a House*. Gaz de France & H Power Corp. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.
- Berg J.: *Concept of a Fuel Cell Domestic Heating System. Status of the Development and ongoing Test Program*. Vaillant GmbH. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.
- Bertrand G.L. et al.: *A New Process for the Cost-effective use of Natural Gas in SOFC: Gradual Internal Reforming*. Gaz de France. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.
- Creemers B., Kop L.: *Micro-WKK op basis van de PEM-brandstofcel*. Artikel van Gastec in GAS. April 2000.
- Diethelm R.: *SOFC for residential application power supply*. Sulzer HEXIS Ltd. London, March 1, 2000.
- Doerk T.: *Sulzer HEXIS 1 kW SOFC Fuel Cell Cogeneration System Results of the Long-Term Field-Tests*. Sulzer Hexis Ltd. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.
- Dril A.W.N. van, Rijkers F.A.M., Battjes J.J., de Raad A.: *Toekomst Warmtekrachtkoppeling*. ECN rapporten C—99-086 en C—00-022. Petten, oktober 1999 en februari 2000.
- Hoving K., Mallant R.K.A.M., Assink G.J.B.: *Micro-Combined Heat and Power based on CPO and SPFC. A prototype design and feasibility study*. Final report for Novem, SRTCA-OP.99.20379. Amsterdam, August 1999.

- Hoving K., Huijsmans J.P.P. et al.: *Field Test of a 1 kWe Sulzer HEXIS SOFC μ CHP unit with Shell CPO Fuel Processor at Gasunie Research*. N.V. Nederlandse Gasunie & ECN. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.
- Iwata S., Takimoto K.: *Development & Field Test of Residential Gas Engine Cogeneration System*. Osaka Gas Co., Ltd. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.
- Jansen, D., Lugten, P., Brandwagt, K.: *Verkenning naar de rol van brandstofcellen bij de reductie van NOx-emissies in Nederland*. ECN, Petten, mei 2000.
- Jeeninga, H.; Ruijg, G.J.; *Effectiviteit van de HR-ketel als energiebesparingsmaatregel: berekening van de milieuwinst en kosteneffectiviteit*. ECN rapport ECN-C--99-041. Petten, juni 1999.
- Laag P.C. van der: *Micro-WK systemen: een stap voorwaarts bij uw huishoudelijke energievoorziening*. Artikel in ECN Informatief. Petten, 20 september 2000.
- Laag P.C. van der: *Ontwikkeling en Introductie van μ WK Systemen*. Gastcollege Innovatiemanagement, Universiteit Utrecht. Utrecht, 22 mei 2001.
- Lepper E.C.P. de: *Mini- en Micro-warmtekracht*. Verslag nationaal congres op 10 oktober 1996. Energie Consulent nummer 5, 1996.
- Nakai Y. et al.: *Solution Technologies for Co-Generation Systems from the electric point of view*. Osaka Gas Co., Ltd. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.
- Pool G., Eastell L.W., Shiret A.R.: *Domestic Energy Optimisation*. Advantica Technologies Ltd. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.
- Sammes N.M., Boersma R.: *Small-scale fuel cells for residential applications*. Journal of Power Sources 86 (2000), pp. 98-110.
- Scheepers M.J.J., e.a.: *Energie Markt Trends 2000*. ECN BS publicatie. Petten, mei 2000.
- Schmidt M., Diethelm R.: *Sulzer Hexis SOFC system: first results of 3-year field test*. Third Int. Fuel Cell Conference. Japan, 1999.
- Schrauwers A.: *Elk huis een eigen centrale: brandstofcel, gas- en stirlingmotor geschikt voor micro-warmtekracht*. Artikel in De Ingenieur nr 2, KIVI. 2 Februari 2000.
- Vos R. de: *Miniatur-warmtekracht moet zich nog bewijzen*. Energie- en Milieuspectrum. December 1996.
- C.P. Wilcox, R. Winstanley, T. Nietsch, C. Smith, R. Knight, C. Seymore; *Solid Oxide Fuel Cell Field Trial Evaluation: Final Report*; EA Technology, 2000, ETSU F/02/00167/REP.
- Wisman G. et al.: *Operating Experiences with the Sulzer HEXIS 1 kW SOFC for Self-Powered Dwellings and Buildings*. Thyssengas GmbH. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.
- Woods R.R. et al.: *Autothermal Reforming of Natural Gas: A Key Technology for Fuel Cells*. Hydrogen Burner Technology & Gaz de France. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.

Woude R.R. van der, e.a.: *Vernieuwende Concepten voor Lokale, Duurzame Energiesystemen*. Eindverslag ECN-C—00-018. Petten, maart 2000.

Yamada H. et al.: *Development of the PEFC Co-Generation system at Tokyo Gas*. Tokyo Gas Co., Ltd. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.

Yasuda I. et al.: *Development of Highly Efficient and Compact Fuel Processors for PEFC Applications*. Tokyo Gas Co., Ltd. Int. Gas Research Conference 2001. RAI, Amsterdam, November 5-8, 2001.

Gasgestookte warmtepomp opvolger van HR-ketel. Technisch Weekblad. 13 januari 1999.

Nationale Energie Verkenningen 1995 – 2020. ECN Beleidsstudies. Petten, maart 1998.

Sulzer; *Website Sulzer Hexis: Innovative Energieversorgung mit Brennstoffzellen*; Sulzer Hexis AG, Winterthur, Zwitserland, 26 jan 2001. www.hexis.ch

Vaillant: *Techniek van de toekomst – CV ketel met brandstofcel*. Brochure. Amsterdam, januari 2001.

Warmtekracht in het perspectief van decentralisatie van de energievoorziening. Cogen Projects. Driebergen, maart 1999.

Wilt u ook een CPO-SPFC μ -CHP op zolder? Shell Venster. September-/oktober 2000.

7. BIJLAGEN

7.1 Warmtevoorziening

Algemeen

In de referentiesituatie worden warmte en elektriciteit separaat opgewekt. In deze paragraaf wordt de separate opwekking van warmte besproken.

Conversietechnologie

De referentiesituatie voor de warmtevoorziening in de markt voor μ -WK systemen (woningen en kleine gebouwen) wordt gevormd door individuele centrale verwarmingsketels (ICV), waarin door verbranding uit brandstof warmte wordt geproduceerd. Driekwart van de woningen in Nederland is uitgerust met een ICV installatie. Veelal worden zowel ruimteverwarming als warm tapwater door één zogenaamde combiketel verzorgd. Maar ook komen aparte verwarmingsketels voor uitsluitend ruimteverwarming voor. Het tapwater wordt dan geleverd door (keuken- of bad-) geisers, gasboilers of elektrische boilers. In een klein deel van de Nederlandse woningen wordt de tapwatervraag voldaan met warmtepompboilers of zonneboilers.

Andere methoden waarmee woningen en kleine gebouwen van warmte worden voorzien zijn stads- en blokverwarming (11%) en lokale verwarming (15%) [Jeeninga/Ruijg 1999].

Brandstofeigenschappen

Als brandstof wordt aardgas gebruikt. In woningen en gebouwen die te ver van het net af gelegen zijn wordt propaan of huisbrandolie gebruikt.

Productkwaliteit

Individuele centrale verwarmingsketels worden op grond van hun beoogde rendement in verschillende typen onderscheiden:

Conventionele of standaard ketels (ST).

Verbeterd rendement ketels (VR).

Hoog rendement ketels (HR).

Ketels kunnen tegenwoordig naast veiligheidslabels een energielabel krijgen, uitgegeven door de stichting Gaskeur. Volgens een verplichte CE norm dienen nieuwe ketels tegenwoordig een rendement van minimaal 82% te hebben. Het zogenaamde Gaskeur Basislabel, wat betekent dat de ketel aan het VR criterium voldoet, is vanaf 88,5%. Op het label van HR ketels wordt nog onderscheid gemaakt naar verschillende rendementen: 100, 104 en 107% op onderwaarde. Deze rendementen worden gemeten bij lage aanvoer- en retourtemperaturen (36 respectievelijk 30 °C) [Gaskeur]. Er worden dan wel rendementen tot boven 109% gemeten.

Rendement

Omdat in de praktijk de meeste ketels met een radiatorensysteem werken, wat tot hogere temperaturen leidt, zullen in de praktijk de rendementen van de energielabels niet worden behaald. Voor deze studie wordt daarom uitgegaan

van 100% als rendement van een bestaande HR ketel, 90% voor een VR ketel, en 80% voor andere ketels (ST).

Verder wordt er voor deze studie van uit gegaan dat de systeemverliezen na een μ -WK systeem niet zullen verschillen van die van een ketel. Daarom worden deze buiten beschouwing gelaten. Het gemiddelde rendement van alle CV ketels wordt bepaald door van de verschillende typen ketels de penetratiegraad en het rendement te bepalen.

Table 7-1 *Rendementen en penetratie van verschillende typen ketels.*

	Rendement	Penetratie [Jeeninga/Ruijg]
ST	80%	36%
VR	90%	45%
HR	100%	19%
Gemiddeld	88%	100%

Hiermee wordt het gemiddelde rendement van het Nederlandse ketelbestand bepaald op 88%. Wanneer uit gasverbruiksgegevens een warmtevraag voor ruimteverwarming wordt berekend, wordt uitgegaan van dit rendement.

Als referentierendement van een ketelinstallatie in het geval dat een nieuwe optie wordt vergeleken met een conventionele optie, wordt uitgegaan van minimaal 100%. Het wordt namelijk tegenwoordig volstrekt normaal gevonden dat aan het einde van de levensduur van een bestaande CV ketel deze wordt vervangen door een HR-ketel. In de nieuwbouw is een HR-ketel vaak onontkoombaar om aan de EPN te voldoen.

In de SOFC studie [Laag 2001] is er van uit gegaan dat het thermisch rendement van een μ -WK systeem vergelijkbaar is met het thermisch rendement van een ketel wanneer de jaargemiddelde rookgastemperatuur gelijk is. Voor de bepaling van het thermisch rendement van een SOFC μ -WK systeem is toen uitgegaan van een rookgastemperatuur van 45 °C. Hierbij hoort een ketelrendement van 104%. Dan moet ook voor het rendement van de referentie HR-ketel 104% worden aangehouden [Laag 2001, annex B].

Table 7-2 *Referentie rendementen voor HR-ketels bij aangenomen jaargemiddelde rookgastemperaturen van μ -WK systemen.*

Rookgastemperatuur	HR-ketelrendement(LHV)
70 °C	97%
55 °C	100%
45 °C	104%
30 °C	107%

Voor deze studie wordt voorgesteld het rendement van de referentieketel volgens bovenstaande tabel te laten afhangen van de gemiddelde rookgastemperatuur van de μ -WK optie. Wanneer geen gemiddelde

rookgastemperatuur bekend is wordt het gemiddelde genomen (102%), met een spreiding tussen 97% en 107%.

Het rendement voor tapwater is minder goed bekend. In vorige studies (Locogen, SOFC) is uitgegaan van 60 à 80%. Wanneer echter voor het tapwaterrendement in zowel de referentiesituatie als de te beschouwen nieuwe situatie (b.v. μ -WK) wordt uitgegaan van het rendement voor ruimteverwarming blijven de systemen vergelijkbaar, en hoeft er niet een aparte berekening voor tapwater te worden gedaan. ***Het lagere rendement zou kunnen worden verrekend door een hogere bruto tapwatervraag aan te houden, die overeenkomt met de huidige gemiddelde gasvraag voor tapwater, en een rendement van 88%.***

Emissies

De CO₂ emissie van ketels is gerelateerd aan het gasverbruik: 56,2 kg CO₂/GJ_{LHV}.

NO_x emissies kunnen van ketel tot ketel verschillen, maar zijn bij moderne ketels laag. Remeha geeft een uitstoot op van 35 mg/kWh, wat overeenkomt met 10 g/GJ_{LHV}, en 20 ppm NO_x bij O₂ = 0% [Remeha]. Agpo geeft op 40 ppm bij n=1. In deze studie wordt uitgegaan van 20 g/GJ_{LHV}.

CO emissies zijn in de orde van 10 tot 20 ppm [Agpo], wat overeen komt met 10 g/GJ_{LHV}.

Investeringskosten

Voor investeringskosten van een HR-ketel is in meerdere studies reeds van 2,2 k€ uitgegaan [vdLaag 2000, 2001]. In dit project is BS eerder uitgegaan van 2 k€ in geval van nieuwbouw of projectmatige vervanging door energiebedrijf of woningbouwvereniging, en 2,5 k€ in geval van vervanging van een bestaande ketel in particulier eigendom en beheer. Wanneer een VR of ST ketel wordt vervangen door een HR ketel moeten vaak de rookgasafvoer en luchttoevoer worden veranderd, en moet een aansluiting op het riool worden gemaakt. Dan worden de investeringslasten 0,5 k€ hoger [Ginec]. Omdat deze kosten ook optreden bij vervanging van een VR of ST ketel door μ -WK worden deze kosten buiten beschouwing gelaten. In deze studie wordt geen onderscheid gemaakt tussen bestaande- of nieuwbouw, of particulier cq institutioneel. Er worden investeringskosten aangenomen van 2 k€/woning, incl installatie, met een spreiding tussen 1,8 en 2,5 k€.

Onderhoudskosten

Voor het onderhoud van ICV installaties kan men onderhoudscontracten afsluiten, waardoor het risico van sterk fluctuerende onderhoudskosten niet meer voor de bewoners is. Dergelijke contracten kosten ongeveer 70 €/jaar. Nieuwere ketels hebben een sterk verlaagde onderhoudsbehoefte. Zo heeft een recent geplaatste nieuwe HR-ketel de eerste 3 jaar geen onderhoud als er geen storingen optreden [Ginec]. In de clusteranalyse is uitgegaan van 35 tot 55 €/jaar, met een most likely value van 45 €/jaar, in de SOFC studie 45 tot 70 €/jaar, met een most likely value van 55 €/jaar, alle bedragen ex BTW. Dit laatste komt overeen met 68 €/jaar incl BTW. Voorgesteld wordt uit te gaan van 50 €/jaar, met een spreiding van 35 tot 70 €/jaar.

Trends

Met name de onderhoudskosten voor ICV ketels dalen

Referenties voor centrale-verwarmingssystemen

[Agpo] Productinformatie HR Econcompact 125 C, Agpo Breda, www.agpo.nl

[Gaskeur] Website Gaskeur, www.gaskeur.nl/home.htm

[Ginec] Ginec CV, Hoorn NL; *Offerte aan ir. G.J. Ruijg voor vervanging bestaande ketel door HR ketel*; Hoorn, dec 2000.

[Jeeninga/Ruijg] H. Jeeninga, G.J. Ruijg; *Effectiviteit van de HR-ketel als energiebesparingsmaatregel. Berekening van de milieuwinst en kosteneffectiviteit*; ECN Petten, juni 1999, ECN-C-99-041.

[Remeha] Productinformatie W21/W28 ECO HR ketels, Remeha Apeldoorn, www.remeha.nl

7.2 Micro-WK systeemvarianten

In deze paragraaf worden de diverse uitvoeringsvormen voor micro-WK systemen toegelicht, tezamen met de kengetallen voor rendement en specifieke emissies. De volgende drie typen worden momenteel, parallel bij ECN Schoon Fossiel ontwikkeld, met als doelstelling om een 1 kilowatt elektrisch vermogen te leveren met een consumentenprijs die maximaal 1350 € hoger is dan van een standaard HR ketel. Door de gelijktijdige ontwikkeling van meerdere typen en de ontwikkelrisico's die van invloed zijn op de technische slaagkans, wordt de waarschijnlijkheid dat tenminste één variant succesvol ontwikkeld wordt geraamd op 95 % [12].

7.2.1 Het Stirling type

Deze klasse van systemen is gebaseerd op de Stirlingmotor, die warmte afkomstig van een *externe* warmtebron omzet in mechanisch vermogen. Door middel van een generator wordt deze bewegingsenergie vervolgens omgezet in elektriciteit, met de juiste frequentie, spanning en fasehoek (50 Hz, 220 V en $|\cos(\varphi)| > 0,9$).

De Stirlingmotor maakt onderdeel uit van een aangepaste HR ketel, waardoor het totaalrendement tenminste 90 % bedraagt. Het elektrisch rendement bedraagt circa 10 %, vanwege de temperatuurniveaus van de in- en uitgekoppelde warmte en overige exergie verliezen. Met een gemiddelde warmtekrachtverhouding van 8 aan de generatorzijde, komt dit type systeem het meest in aanmerking voor woningen met een relatief hoge warmtevraag, zoals vrijstaande- en twee-onder-één kap woningen. In dat geval kan de primaire-energiebesparing gemaximaliseerd worden.

Het type dat door EnAtEc, het samenwerkingsverband van Eneco, Atag en ECN, ontwikkeld wordt, is in het meest gevorderde stadium en vertoont daardoor de hoogste technische slaagkans. Het systeem is gebaseerd op de Blauwe Engel HR ketel, waarin een Stirlingmotor geïntegreerd is. Hiertoe is de brandersectie aangepast, om voelbare- en stralingswarmte uit een deel van de rookgasstroom in te kunnen koppelen in de Stirlingmotor.

In Stirling micro-warmtekrachtsystemen wordt voor de conversie van de verbrandingswarmte in elektriciteit een Stirling motor gebruikt. De winning van de restwarmte voor ruimteverwarming en tapwater vindt plaats met normale HR ketel technologie.

In de volgende figuren worden een principeschema en een foto van een Stirling microwarmtekrachtsysteem getoond.

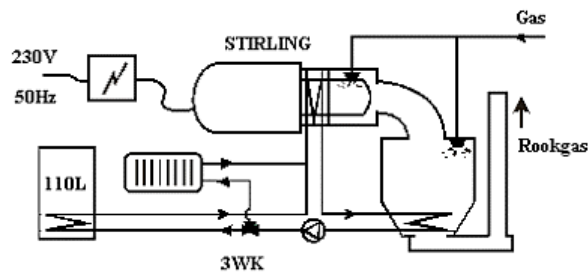


Figure 7-1 Principeschema Stirling Micro W/K systeem.



Figure 7-2 Inwendige van een Stirling μ -WK systeem.

Conversietechnologie

Zowel de Stirlingmotor als de Stirling-warmtepomp zijn gebaseerd op de Stirling cyclus: een gesloten thermodynamische cyclus, waarbij een werkgas (helium, lucht) afwisselend gecomprimeerd wordt als het koud is en geëxpandeerd als het warm is. Dit levert netto arbeid op, die gebruikt wordt om of een elektromotor aan te drijven (Stirlingmotor) of om een tweede omgekeerde Stirling cyclus aan te drijven, die warmte gaat verpompen (Stirling warmtepomp).

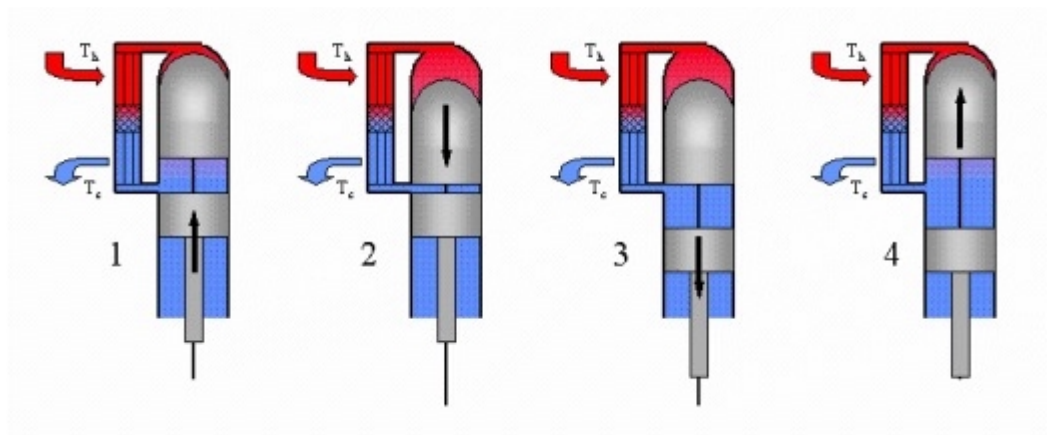


Figure 7-3 Schematische weergave van de Stirlingcyclus in 4 stappen (Figuur: NASA).

1. De zuiger komt omhoog, het gas wordt gecomprimeerd.
2. Het gas wordt verplaatst van de koude naar de warme ruimte, de druk neemt hierdoor verder toe.

3. De zuiger gaat naar beneden, het gas wordt geëxpandeerd.
4. Het gas wordt verplaatst van de warme naar de koude ruimte, de druk neemt verder af.

De vrije-zuiger Stirling technologie verschilt op belangrijke punten sterk van de meer klassieke kinematische Stirling technologie. Het belangrijkste verschil is de manier waarop de zuigers van de Stirling motoren bevestigd en voortbewogen worden.

- Bij de kinematische Stirling motor wordt de beweging van de zuigers door een systeem van drijfstangen en een krukas geregeld. Dit systeem heeft enkele belangrijke nadelen: het aandrijfmechanisme moet gesmeerd worden en de zuigers moeten afgedicht worden om smeermiddelen buiten en werkgas binnen te houden. Bovendien maakt het aandrijfsysteem lawaai en vergt het regelmatig onderhoud.
- Vrije-zuiger Stirling motoren kennen deze nadelen niet. De zuigers zijn opgehangen in veren en bewegen vrij op en neer. Deze veren zijn flexibel in axiale richting, maar zeer star in radiale richting. De zuigers kunnen hierdoor met een minimale tussenruimte contactloos bewegen in hun cilinders, waardoor geen slijtage optreedt. Afdichtingen zijn overbodig, omdat de Stirling motor en zijn lineaire elektriciteitsgenerator samen in één afgesloten drukvat zitten.

Vrije-zuiger Stirling machines zijn efficiënt, onderhoudsvrij, zeer betrouwbaar, hebben een lange levensduur en zijn zeer stil. Bovendien zijn het externe verbrandingsmachines, d.w.z. het werkgas wordt van buitenaf verwarmd. Hierdoor kunnen enerzijds zeer veel verschillende gasvormige, vloeibare en vaste brandstoffen gebruikt worden, anderzijds zijn de verbrandingscondities over het algemeen goed te beheersen, waardoor een zeer schone verbranding mogelijk is. Door bovendien gebruik te maken van branders met een hoog stralingsrendement, b.v. keramische schuimbranders wordt een zo groot mogelijk deel van de warmte van het verbrande aardgas overgedragen aan de Stirlingmotor.

Bron: website ECN SF, groep Stirling technologie,
www.ecn.nl/fossil/stirling/index.html

Brandstofeigenschappen

Als brandstof wordt aardgas gebruikt. In woningen en gebouwen die te ver van het net af gelegen zijn wordt propaan of huisbrandolie gebruikt. Vanwege het externe-verbrandingsprincipe worden geen zware eisen aan de brandstof gesteld, om toch warmte te kunnen inkoppelen in de Stirlinggenerator door middel van convectief- en stralings-warmtetransport.

Productkwaliteit

Stirling micro warmtekrachteenheden voor toepassing in woonhuizen en kleine gebouwen worden rond 2003 op de markt verwacht. In Nederland worden ze ontwikkeld door Enatec, een samenwerkingsverband van Eneco, Atag en ECN. ENATEC heeft de beschikking over een kleine demonstratie unit, die 350W elektriciteit levert, en werkt aan een eenheid met een elektrisch vermogen van 1 kW. Voor het seizoen 2001/2002 staat een veldtest gepland. Grootschalige marktintroductie volgt vanaf 2004.

In Nieuw-Zeeland heeft Whispergen een Stirling W/K ontwikkeld met een elektrisch vermogen van 750 watt en 5 à 6 kW_{th} voor toepassing op

plezierjachten en in afgelegen woningen. Op basis hiervan probeert men de μ -WK wereldwijd te vermarkten.

Rendement

Het elektrisch rendement zal tussen 9% en 15% liggen, met een meest waarschijnlijke waarde van 12% [12]. De Stirling motor zelf haalt een rendement van circa 25%, maar het branderrendement voor het Stirling deel bedraagt circa 40% (fractie van de ingekoppelde warmte).

Het totaal rendement (elektriciteit + warmte) zal nauwelijks afwijken van het rendement van een HR-ketel (100 tot 107%), omdat de luchtfactor en de warmtewisselaartechniek hetzelfde zijn.

Emissies

De CO₂ emissie van μ -WK installaties is gerelateerd aan het gasverbruik: 56,2 kg CO₂/GJ_{LHV}.

Dankzij de uitwendige verbranding met de nieuwste HR-keteltechnologie worden lage waarden verwacht voor de uitstoot van NO_x (8 g/GJ) en CO.

Investeringskosten

Investeringskosten zijn op dit moment nog erg hoog, omdat de fabricage beperkt is tot enkele stuks. Ontwikkeldoel van EnAtEc is 700 € meerkosten ten opzichte van de HR-ketel.

Onderhoudskosten

Whispergen verwacht hooguit 200 US\$ per jaar, bestaande uit 1 à 2 uur werk. Dit betreft voornamelijk branderonderhoud en schoonmaken, en eventueel controleren van de systeemdruk.

Trends

Whispergen ontwikkelde de Stirling machine voor pleziervaart en stand-alone toepassingen. Men gaat zich meer en meer richten op toepassing in standaardwoningen, met aansluiting op het elektriciteitsnet. EnAtEc werkt in de eerste plaats aan netgebonden systemen.

Aanbieders technologie

Atag Verwarming bv

Postbus 105

7130 AC Lichtenvoorde

telefoon: +31(0) 544 391 777

telefax: +31(0) 544 393 371

Victron Energie bv

Postbus 50016

1305 AA Almere-Haven

Telefoon: +31 36 531 02 00

Fax +31 36 531 16 66

<http://www.victronenergie.com>

email: jklumpenaar@victronenergie.nl

Referenties voor Stirling-type micro-WK systemen

Ir. G.J.J. Beckers; *Stirling Technologie*; ECN Petten, 16 mrt 2001,

<http://www.ecn.nl/fossil/stirling/index.html>

Welkom bij Enatec. Micro warmtekracht voor huishoudens en kleinbedrijf; Enatec Micro-Cogen B.V., Lichtenvoorde, <http://www.enatec.com/>

Whisper Tech Limited; Home-scale generators, Micro Combined Heat and Power (MCHP); Whisper Tech Limited, Christchurch, Nieuw-Zeeland, <http://www.whispertech.co.nz/>

7.2.2 Hoge-temperatuur, vast-oxide brandstofcel (SOFC)

Alle brandstofcellen berusten op het principe van een gecontroleerde, elektrochemische verbranding: de reactie van een gasvormige brandstof (bijvoorbeeld aardgas, biogas, kolengas, waterstof, koolmonoxide) met zuurstof uit lucht. Door deze reactie in een brandstofcel te laten plaatsvinden wordt de vrije enthalpie van de brandstof op een directe wijze (gedeeltelijk) omgezet in elektriciteit. Daarnaast wordt er warmte geproduceerd. Feitelijk wordt er tijdens de ‘verbranding’ elektriciteit opgewekt: een elektriciteit producerende brander. Brandstofcellen worden onderscheiden op grond van het type toegepaste elektrolyt

Algemeen

In SOFC μ -WK systemen wordt voor de conversie van de verbrandingswarmte in elektriciteit een Vast Oxide Brandstofcel (Solid Oxide Fuel Cell SOFC) gebruikt. De winning van de restwarmte voor ruimteverwarming en tapwater vindt plaats met normale HR ketel technologie.

In de volgende figuren worden een principeschema en een foto van een SOFC microwarmtekrachtsysteem getoond.

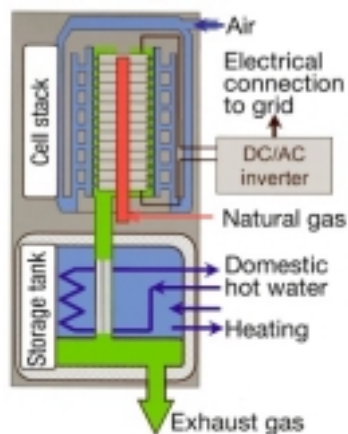


Figure 7-4 Principeschema van een SOFC μ -WK systeem.



Figure 7-5 Sulzer Hexis μ -WK (veldtest)systeem.

Conversietechnologie

Voor de conversie van brandstof in elektriciteit wordt gebruik gemaakt van de Vast Oxide Brandstofcel (Solid Oxide Fuel Cell SOFC).

In de brandstofcel wordt de chemische energie die vrijkomt bij de oxidatie van een (gasvormige) brandstof direct elektrochemisch omgezet in elektrische energie. Om dit te bereiken worden gasvormige brandstoffen continu toegevoerd aan een anode, terwijl O_2 -houdend oxidant continu wordt toegevoerd aan een kathode. De elektrochemische reactie vindt vervolgens plaats aan de elektroden. Tussen deze elektroden (de positief geladen kathode en de negatief geladen anode) bevindt zich een medium dat ionen transporteert, maar geen elektronen: het elektrolyt. De elektronen moeten dan buiten de cel om, waardoor er een winbare stroom ontstaat.

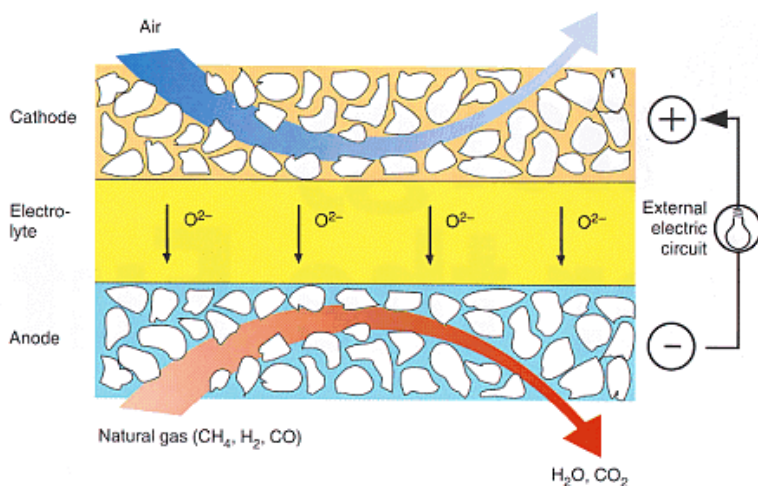


Figure 7-6 *Brandstofcelprincipe [Sulzer Hexis].*

In de SOFC bestaat het elektrolyt uit keramisch materiaal (vast oxide), dat zuurstofionen geleidt. De bedrijfstemperatuur ligt tussen de 800 en de 1000 °C. Zowel voor het elektrolyt als voor de beide elektroden worden keramische materialen gebruikt.

De spanning afkomstig van één brandstofcel is beperkt, 0,5 à 1,0 Volt. Door de cellen in serie te schakelen, in zogenaamde stacks, wordt een hogere spanning verkregen, en meer vermogen. Daartoe worden de cellen gescheiden door separatorplaten, die de stroom van de ene cel naar de volgende geleiden. Ook bevatten de separatorplaten kanalen voor de aan- en afvoer van procesgassen. In de volgende figuur wordt een samenstelling van een cel en twee separatorplaten getoond.

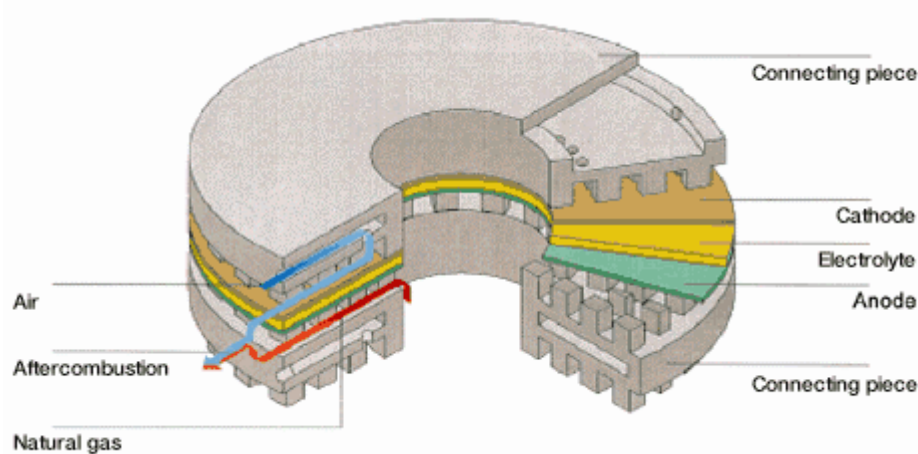


Figure 7-7 *Brandstofcel met twee separatorplaten [Sulzer Hexis].*

Een brandstofcelsysteem bestaat uit 4 subsystemen. Het hart van het systeem wordt gevormd door de brandstofcelstack. Daarnaast bevat het systeem een fuel-processor subsysteem, een DC/AC convertor voor de vermogensomzetting van gelijk- in wisselstroom en een subsysteem voor het terugwinnen van warmte.

Omdat brandstofcellen gevoed moeten worden met een waterstofrijk gas moet de primaire brandstof (veelal aardgas) eerst worden omgezet. In de nieuwste generaties SOFC vindt de reforming in de cellen zelf plaats (internal reforming). De endotherme reformreactie verzorgt tevens grotendeels de koeling van de brandstofcel.

Brandstofeigenschappen

Als brandstof wordt aardgas gebruikt. In woningen en gebouwen die te ver van het net af gelegen zijn wordt propaan of huisbrandolie gebruikt. Deze categorie woningen vormt een niche-markt voor micro-WK systemen.

Productkwaliteit

Globaal zijn er twee vormen van brandstofvoorbereiding: steam reforming (SR) en partiële oxidatie (POx). Bij steam reforming wordt de brandstof gemengd met een overmaat stoom en verhit, waardoor een mengsel van CO en H₂ ontstaat. Bij partiële oxidatie wordt de brandstof verbrandt met een ondermaat zuurstof of lucht, waardoor er een brandbaar (CO/H₂) gasmengsel ontstaat, maar met een lager H₂ gehalte. Partiële oxidatie is mogelijk op temperaturen tussen 500 en 800 °C wanneer er een geschikte katalysator aanwezig is. Dit heet dan catalytic partial oxidation (CPO). Er is ook een combinatie mogelijk: het partieel oxideren van brandstof in aanwezigheid van stoom. Dit wordt autothermal reforming genoemd. De exotherme partiële oxidatie levert de warmte voor de endotherme steam reforming.

Steam reforming leidt tot het hoogste elektrisch rendement; partiële oxidatie is daarentegen eenvoudiger.

Stacks leveren gelijkstroom, met een spanning die van de belasting afhangt. Om hiervan 230 Volt wisselstroom te maken is een power conditioner (DC/AC convertor) nodig.

Rendement

Praktisch gesproken is het maximale vermogen van een brandstofcel bereikt als de celspanning is gedaald tot 0,6 Volt. Modelberekeningen laten zien dat het elektrisch rendement van een SOFC met steamreforming (SR) dan 45% wordt, en in deellast maximaal 53%. Een SOFC met CPO heeft bij 0,6 Volt in vollast een elektrisch rendement van 32% en maximaal 41% in deellast [Ruijg 2001].

Het thermisch rendement van SOFC μ -WK systemen varieert met de belasting en het elektrisch rendement. Maar het totale rendement (elektrisch plus thermisch) is daar vrij ongevoelig voor, en blijkt vooral af te hangen van de aard van het systeem en de rookgastemperatuur [Ruijg 2001].

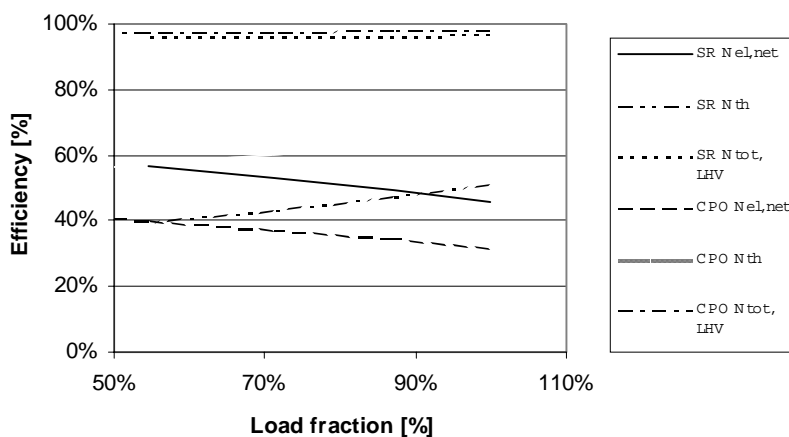


Figure 7-8 Deellastgrafieken voor SR en CPO SOFC μ -WK systemen, bij een rookgastemperatuur van 45 °C.

Het totale rendement van SOFC μ -WK systemen is berekend bij diverse rookgastemperaturen. De resultaten voor CPO en SR zijn in onderstaande tabel vergeleken met het totaalrendement van een HR-ketel bij dezelfde schoorsteentemperaturen.

Table 7-3 Afhankelijkheid van het totaalrendement van de rookgastemperatuur.

Rookgas temperatuur	HR-ketel equivalent	SOFC met Steam reforming	SOFC + CPO
70 °C	97%	81%	94%
53 °C	101%	90%	96%
45 °C	104%	97%	98%
30 °C	107%	104%	103%

Het totale rendement van een SOFC μ -WK systeem is lager dan dat van een HR-ketel omdat het brandstofcelsysteem met een flink hogere luchtvermaat moet werken (3 tot 5), om koelingsproblemen te voorkomen. Een systeem met steam reforming heeft op zijn beurt weer een lager totaalrendement dan een systeem met CPO, omdat in het geval van steam reforming een groot deel van

de warmte aanwezig is in latente vorm in het rookgas, en die pas bij lage rookgastemperaturen teruggewonnen kan worden.

Voor deze studie zal worden uitgegaan van een elektrisch rendement van 39% voor SR systemen, en 28% voor CPO systemen. Als boven- en ondergrenzen worden aangehouden 45% en 33% voor SR, en 32% en 25% voor CPO aangehouden.

Voor het jaargemiddeld thermisch rendement wordt er van uitgegaan dat de jaargemiddelde rookgastemperatuur 53 °C zal zijn, met een boven- en ondergrens van 70 °C en 45 °C. De rendementen uit bovenstaande tabel worden aangehouden voor de totaalrendementen bij deze temperaturen. De thermische rendementen worden berekend door de elektrische rendementen van de totaalrendementen af te trekken.

Emissies

De CO₂ emissie van μ -WK installaties is gerelateerd aan het gasverbruik: 56,2 kg CO₂/GJ_{LHV}.

De NO_x emissies van brandstofcellen blijken zeer laag te zijn, lager dan 1 ppmv in het rookgas. Dit betekent minder dan 2 g/GJ ingaande brandstof [Jansen 2000].

Het proces in de brandstofcel is essentieel NO_x vrij. NO_x kan pas ontstaan in de naverbrander. De verbranding vindt hier katalytisch plaats, onder een grote luchtovermaat. Hierdoor is de temperatuurverhoging klein, wat zorgt voor weinig NO_x vorming.

De brandstofcellen kunnen slechts weinig zwavel aan, hooguit 10 ppm. Aanwezige zwavelverbindingen moeten dus vóór de brandstofcel worden verwijderd, wat er toe leidt dat de uitlaatgassen een verwaarloosbare hoeveelheid SO₂ bevatten.

Voor deze studie wordt ervan uitgegaan dat SOFC μ -WK systemen een NO_x uitstoot van 1 g/GJ_{brandstof} hebben. Als boven- en ondergrens worden 2 en 0 g/GJ_{brandstof} aangehouden.

Investeringskosten

Er is uitgegaan van investeringskosten per kilowatt elektrisch vermogen omdat er wordt aangenomen dat dankzij het modulaire karakter van brandstofcellen de investeringskosten een lage afhankelijkheid van de systeemgrootte zullen hebben. Wel is er steeds getracht bij het verzamelen van kostprijsgegevens zo veel mogelijk aan te sluiten bij de beoogde systeemgrootte voor installaties in woonhuizen (0,3 tot 3 kW_e).

Componenten

Het SOFC systeem bevat naast de internal reforming stack: een inverter om van gelijkstroom een wisselspanning van 240 Volt te maken, zwavelverwijdering, een naverbrander, warmtewisselaars en een regeling. Verder moet het systeem in een opstellingsruimte ondergebracht worden. Hoewel er niet in alle gevallen nieuwbouw hoeft te worden gepleegd, wordt er wel een stelpost bouwkundige kosten opgenomen.

Stack kosten

De huidige kosten voor een stack worden rond de 1500 €/kW_e geschat [Oosterkamp/Jonckers 2001].

Modelberekeningen voor 200 kW_e systemen laten stackkosten zien van 71 k€ bij een jaarproductie van 100 MW_e [Hart 2000], wat neerkomt op 350 €/kW_e. In die berekeningen zijn de systeemkosten en de installatie en engineering kosten ook ieder 350 €/kW_e, zodat de totale systeemkosten op iets meer dan 1000 €/kW_e komen. Verwacht wordt dat dit binnen 10 jaar gerealiseerd kan worden. Hetgeen een daling zou betekenen van 14% per jaar. Dit is ook in overeenstemming met de langjarige kostendalingstrend van brandstofcel-systemen [EVN 1998].

Andere stackkosten die gerapporteerd worden zijn 240, 380 en 580 €/kW_e [Wilcox 2000], 930 en 610 €/kW_e [British Gas 1995]. De meeste waarden passen tussen de twee eerstgenoemde, dus zijn die gekozen voor gebruik in het model.

Inverterkosten

De inverter, die van gelijkstroom van wisselende spanning wisselstroom maakt met een spanning van 240 Volt en 50 Hz, is ook een vooralsnog kostbaar onderdeel van het systeem. Voor early unit costs worden prijzen genoemd van 2400 €/kW_e, en mature unit costs van 1200 €/kW_e [Wilcox 2000]. Maar de prijzen van inverters van zonnepanelen zijn inmiddels lager: ongeveer 750 €/kW_e [Eikelboom 2001], en er is geen wezenlijk verschil tussen inverters voor zonnepanelen en voor brandstofcellen. Daarom wordt voor deze studie van de laatste waarde uitgegaan.

Ook voor deze component wordt een snelle daling van de investeringskosten verwacht van 14% per jaar (elke 5 jaar een halvering). Het verleden heeft al een snelle daling van de kosten laten zien. Er is te verwachten dat de vraag naar inverters in de komende jaren flink zal stijgen, vanwege de opmars van fotovoltaïsche zonnepanelen en de snelle ontwikkelingen op het gebied van brandstofcellen in het algemeen. Inverters werken op basis van halfgeleidertechnologie, en de computerbranche heeft laten zien dat er snelle kostendalingen met halfgeleiders mogelijk zijn wanneer er veel vraag naar de producten is.

Kosten overige componenten

Als overige componenten kunnen worden genoemd: warmtewisselaars om brandstof, water en lucht op te warmen tegen afkoelend rookgas, ontzwaveling, naverbranding, warmteterugwinning, en procesregeling (sensoren, actuatoren en regel- en veiligheidssysteem).

De grote warmtewisselaar moet uit twee delen bestaan. Tot 350 à 400 °C kunnen de gassen worden opgewarmd in conventionele warmtewisselaars. Zowel het brandstofmengsel als de lucht worden daarna verder opgewarmd tot de gewenste ingangstemperatuur, 700 tot 850 °C, tegen rookgas van 1000 tot 1150 °C. Hiervoor zijn speciale warmtewisselaars nodig, die tegen dergelijke temperaturen bestand zijn. Hiervoor komen waarschijnlijk alleen speciale staalsoorten in aanmerking, of wellicht keramische materialen. Dit maakt deze warmtewisselaars duur.

De warmtewisselaar voor de terugwinning van de resterende warmte in het rookgas kan uit de standaard keteltechniek afkomstig zijn. De prijs van de naverbrander valt in het niet bij die van de warmtewisselaars. De ontzwaveling is zo'n 50 €/kW_e, met 5% onderhoud. Voor de regeling wordt een toeslag van 10% gerekend.

Voor de hier genoemde componenten is een integrale kostenschatting gemaakt, gebaseerd op kostprijgegevens voor grotere systemen (350 kW_e), die neerkomt

op 500 €/kW_e inclusief installatie en engineering [Jonckers 2001]. Dit getal is vergeleken met resultaten van modelberekeningen voor een 200 kW_e systeem [Hart 2000], die bij een jaarproductie van 100 MW_e kosten voor overige componenten laten zien van 350 €/kW_e en voor installatie van het totale systeem 300 €/kW_e, bij elkaar 650 €/kW_e. Deze getallen liggen vrij dicht bij elkaar. De beoogde systemen zijn een factor 100 kleiner. Per kW_e zijn de componenten dan een factor 3 duurder. Uitgaande van een bedrag van 500 €/kW_e voor grotere systemen komt dat neer op een prijs van 1500 €/kW_e voor brandstofcellen die geschikt zijn voor individueel gebruik in woningen.

Er wordt van uitgegaan dat door schaafeffecten de daling 5% zal bedragen. Na iets meer dan 10 jaar zijn dan de kosten weer gedaald tot 750 €/kW_e, wat overeenkomt met de resultaten van [Jonckers 2001] en [Hart 2000].

SOFC Systeemkosten

In onderstaande tabel zijn de hiervoor bepaalde kosten per kilowatt elektrisch vermogen van de onderdelen van het SOFC systeem samengevat, en de snelheid van afname van de kosten over de komende 10 jaar.

Table 7-4 *Investeringskosten van delen van een SOFC systeem met verwachte kostendaling*

Onderdeel	Kosten €/kW _e			Afname [%/jaar]		
	Laag	Midden	Hoog	Laag	Midden	Hoog
Stack	1000	1500	2000	10%	14%	20%
Inverter	500	750	1000	10%	14%	20%
Overige systeemkosten	500	1000	1250	3%	5%	8%

Wanneer de bouwkundige kosten buiten beschouwing worden gelaten (deze zijn min of meer gelijk voor alle systemen) leiden deze afnamepercentages tot een daling van de systeemkosten van 9,5% per jaar. Dit is lager dan de 14% die blijkt uit de resultaten van Schaeffer [EVN 1998]. Wellicht dalen de kosten sneller dan hier is aangenomen.

Afschrijftermijnen

Voor de verschillende onderdelen van het SOFC μ -WK systeem worden verschillende afschrijftermijnen gehanteerd (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Er wordt vanuit gegaan dat de komende jaren de stack halverwege de levensduur van het systeem moet worden vervangen. Vooralsnog wordt er vanuit gegaan dat het systeem 8 jaar mee kan. In de toekomst zullen deze levensduren toenemen, en zal de economische levensduur meer relevant worden. Daarom is voor de geldigheid van deze afschrijftermijnen 5 jaar aangenomen.

Onderhoudskosten

Onderhoudskosten zijn geschat als percentages van de investeringskosten per jaar. De onderhoudspercentages en de afschrijftermijnen zijn samengevat in onderstaande tabel. Er zijn vrij hoge percentages aangenomen, wegens het prille stadium van ontwikkeling. Het onderhoudspercentage voor overige systeemkosten is ontleend aan die van grotere gasmotoren. De ratio is dat de potentiële gebruiker van het micro-WK systeem niet bereid zal zijn om hogere onderhoudskosten te willen betalen, dan deze gewend is. Voor de

technologieontwikkeling betekent dit dat de betrouwbaarheid (en levensduur) tenminste zo hoog moet zijn als de concurrerende technologie. Voor bouwkundige kosten is 1% onderhoud normaal.

Table 7-5 *Onderhoudspercentages en afschrijftermijnen van verschillende delen van een SOFC systeem.*

Onderdeel	Afschrijftermijn [jaar]			Onderhoud [%inv/jaar]		
	L	M	H	L	M	H
Stack	2	4	8	7%	10%	15%
Inverter	5	8	15	7%	10%	15%
Overige systeemkosten	5	8	15	3%	5%	8%

Trends [EVN 1998]

Onderstaande figuur geeft de historische kostendalingstrend weer van brandstofcellen in het algemeen (\$/kW_e uit 1995) zoals die zich sinds het begin van de jaren '60 gemanifesteerd heeft. De daling is gemiddeld 14,0% per jaar.

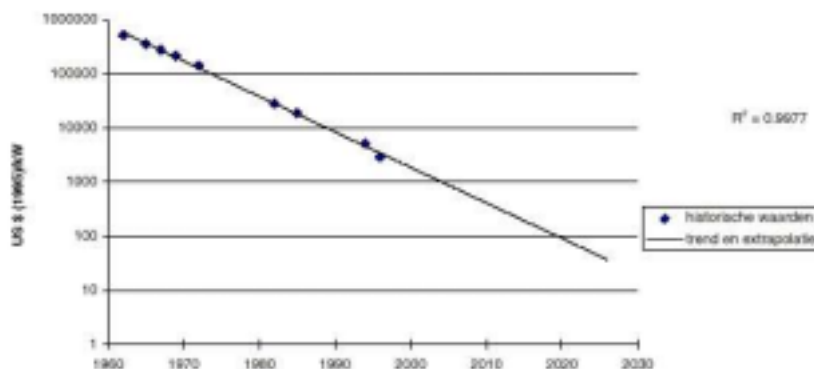


Figure 7-9 *Kostendaling brandstofcelsystemen*

Een indruk van de orde van grootte van het kostenniveau dat brandstofcellen moeten bereiken om concurrerend te worden met huidige technologieën is gegeven in onderstaande tabel. Als de trend van bovenstaande figuur zich doorzet, ontwikkelt de eerste markt voor brandstofcellen zich tussen 2005 en 2010 op de kleinschalige warmtekracht-markt. De kosten bedragen dan ongeveer 1000 dollar per kW_e. Mobiele toepassingen komen dan pas rond 2025 in beeld. Het streven van de auto-industrie om in 2004 een brandstofcelauto op de markt te brengen, betekent dat deze industrie ervan uit gaat dat met een grote R&D-inspanning de trend aanzienlijk versneld kan worden.

Table 7-6 *Orde van grootte van toegestane kostenniveaus brandstofcellen voor verschillende toepassingen [EVN 1998].*

Soort toepassing	Toegestaan kostenniveau [\$/kWe]
Mobiel: auto's	50
Mobiel: bussen	500
Stationair: micro-warmtekracht (tot 10 kWe)	1000
Stationair: mini-warmtekracht (tot 1 MWe)	750
Stationair: decentrale elektriciteitsproductie met hoog rendement (vanaf 5 MWe)	500

Aanbieders technologie

Marktleider voor de kleinere SOFC systemen (1 kW_e, 40% elektrisch rendement) voor toepassing in de woningsector is Sulzer Hexis uit Zwitserland. In 2002/3 worden de eerste demo-systemen op de markt verwacht. InDEC (Innovative Dutch Electro Ceramics) B.V. uit Nederland levert poreuze stack componenten voor deze SOFC systemen [EVN 1998].

Referenties voor SOFC type micro-WK sytemen

- [British Gas 1995] British Gas plc; A System Study for a 200 kWe Combined Heat and Power Package-Phase 2, ETSU/FCR/010 (1995).
- [Eikelboom 2001] Dr. J.A. Eikelboom; persoonlijke mededelingen; ECN Petten, maart 2001.
- [EVN 1998] Energie Verslag Nederland 1998. ECN Beleidsstudies. Petten.
- [Hart 2000] N.T. Hart, M.J. Day, M.N. Pashley; Economic evaluation of 200 kWe SOFC system; Proceedings of the 4th European Solid Oxide Fuel Cell Forum, Luzern, Zwitserland, 10-14 juli 2000, ISBN 3-905592-04-5.
- [Jansen 2000] Jansen, D., Lugten, P., Brandwagt, K.: Verkennig naar de rol van brandstofcellen systemen bij de reductie van NO_x-emissies in Nederland. ECN, Petten, mei 2000.
- [Jonckers 2001] A.A. Jonckers; Apparaten dimensionering en kosten schatting; ECN notitie, 4 mei 2001.
- [Oosterkamp/Jonckers 2001] P.F. van den Oosterkamp, A.A. Jonckers; mondelinge mededelingen; ECN Petten, mei 2001.
- [Sulzer Hexis] Sulzer; *Website Sulzer Hexis: Innovative Energieversorgung mit Brennstoffzellen*; Sulzer Hexis AG, Winterthur, Zwitserland, 26 jan 2001. www.hexis.ch
- [Wilcox 2000] C.P. Wilcox, R. Winstanley, T. Nietsch, C. Smith, R. Knight, C. Seymore; Solid Oxide Fuel Cell Field Trial Evaluation: Final Report; EA Technology, 2000, ETSU F/02/00167/REP.

7.2.3 Lage-temperatuur PEMFC systemen

Algemeen

In PEMFC, μ -WK systemen wordt voor de conversie van de verbrandingswarmte in elektriciteit een protonengeleidend membraan brandstofcel (Proton Exchange Membrane Fuel Cell: PEMFC, ook wel genoemd Solid Polymer Fuel Cell: SPFC) gebruikt. De winning van de restwarmte voor ruimteverwarming en tapwater vindt plaats met normale HR ketel technologie.

In de volgende figuren worden een principeschema en een foto van een PEMFC microwarmtekrachtsysteem getoond.



Figure 7-10 *Principeschema van een PEMFC μ -WK systeem.*



Figure 7-11 *Vaillant Plug Power μ -WK systeem.*

Conversietechnologie

Voor de conversie van brandstof in elektriciteit wordt gebruik gemaakt van de protongeleidend membraan brandstofcel (Proton Exchange Membrane Fuel Cell PEMFC, ook wel Solid Polymer Fuel Cell SPFC genoemd).

In de brandstofcel wordt de chemische energie die vrijkomt bij de oxidatie van een (gasvormige) brandstof direct elektrochemisch omgezet in elektrische energie. Om dit te bereiken wordt gasvormige brandstof continu toegevoerd aan een anode, terwijl O₂-houdend oxidant continu wordt toegevoerd aan een kathode. De elektrochemische reactie vindt vervolgens plaats aan de elektroden. Tussen deze elektroden (de positief geladen kathode en de negatief geladen anode) bevindt zich een medium dat ionen transporteert, maar geen elektronen: het elektrolyt. De elektronen moeten dan buiten de cel om, waardoor er een winbare stroom ontstaat.

Een brandstofcelsysteem bestaat uit 5 subsystemen. De kern van het systeem wordt gevormd door de brandstofcelstack. Daarnaast bevat het systeem een fuel-processor subsysteem, een DC/AC convertor, een naverbrander en een subsysteem voor het terugwinnen van warmte (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**).

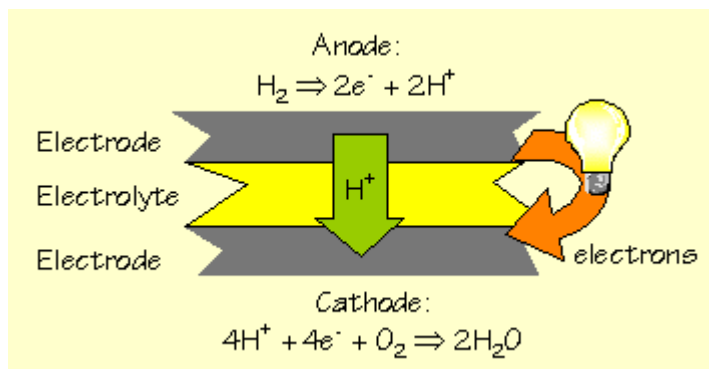


Figure 7-12 PEM Brandstofcelprincipe

In de PEMFC bestaat het elektrolyt uit een kunststof membraan, dat protonen (waterstofionen) geleidt. De bedrijfstemperatuur ligt tussen de 70 en de 110 °C. Voor de beide elektroden wordt metaal gebruikt.

De spanning afkomstig van één brandstofcel is beperkt, 0,5 à 1,0 Volt. Door de cellen in serie te schakelen, in zogenaamde stacks, wordt een hogere spanning verkregen, en meer vermogen. Daartoe worden de cellen gescheiden door separatorplaten, die de stroom van de ene cel naar de volgende geleiden. Ook bevatten de separatorplaten kanalen voor de aan- en afvoer van gassen, en voor koeling van de cellen. In de volgende figuur wordt een samenstelling van drie cellen en vier separatorplaten getoond.

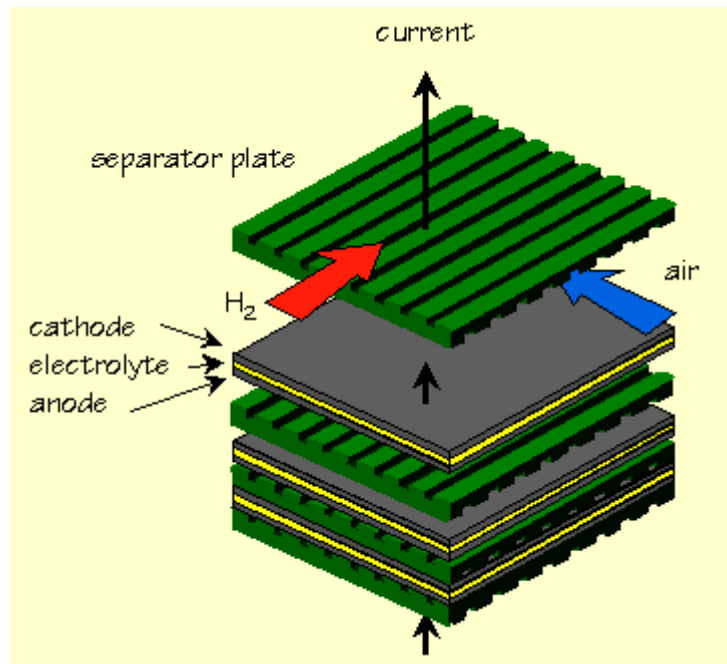


Figure 7-13 PEM Brandstofcelstack.

Brandstofeigenschappen

Als brandstof wordt aardgas gebruikt. Omdat PEM brandstofcellen uitsluitend werken op waterstof moet de primaire brandstof (meestal aardgas, maar LPG en vloeibare brandstoffen zijn ook mogelijk) eerst worden omgezet. Daartoe is het systeem uitgerust met een fuel processor die de brandstof omzet in een mengsel van waterstof, kooldioxide en water, dat ook resten stikstof en edelgassen mag bevatten. PEM cellen kunnen geen koolmonoxide verdragen (het blokkeert de katalysator) zodat via water-gas shift zo veel mogelijk koolmonoxide in waterstof en CO_2 wordt omgezet. Het restant CO wordt tot op ppm niveau verwijderd, bijvoorbeeld met selectieve katalytische oxidatie (Selox).

Het brandstofgas dat aan de anode wordt toegevoerd bevat naast waterstof een groot deel kooldioxide, en daarnaast sporen van andere gassen. De waterstof kan worden benut totdat de partiële druk zo laag wordt dat de daarbij horende Nernstspanning gelijk wordt aan de actuele celspanning. De benutting bedraagt 75% tot 85%. Met de afvoer van de kooldioxide gaat de resterende waterstof mee. Om in ieder geval de warmte nog te benutten wordt het anode afgas door een naverbrander geleid voordat de verbrandingsgassen hun warmte aan de warmteterugwinning afstaan.

PEM cellen werken het best op zuivere waterstof ($\geq 99,95\%$). Dan kunnen de fuel-processor en de naverbrander achterwege blijven, en wordt het systeem veel eenvoudiger. Waterstof moet dan echter centraal worden geproduceerd, en gedistribueerd. De problemen daarbij zijn nog zodanig dat er voorlopig vooral wordt gewerkt aan verbetering van de kleinschalige waterstofproductie uit aardgas.

Productkwaliteit

Globaal zijn er twee vormen van brandstofvoorbereiding: steam reforming (SR) en partiële oxidatie (POx). Bij steam reforming wordt de brandstof gemengd met een overmaat stoom en verhit, waardoor een mengsel van CO en

H₂ ontstaat. Bij partiële oxidatie wordt de brandstof verbrandt met een ondermaat zuurstof of lucht, waardoor er ook een CO/H₂ mengsel ontstaat, maar met een lager H₂ gehalte. Partiële oxidatie is mogelijk op temperaturen tussen 500 en 800 °C wanneer er een geschikte katalysator aanwezig is. Dit heet dan catalytic partial oxidation (CPO). Er is ook een combinatie mogelijk: het partieel oxideren van brandstof in aanwezigheid van stoom. Dit wordt autothermal reforming genoemd. De exotherme partiële oxidatie levert de warmte voor de endotherme steam reforming. Steam reforming leidt tot het hoogste elektrisch rendement, partiële oxidatie is eenvoudiger.

Stacks leveren gelijkstroom, met een spanning die van de belasting afhangt. Om hiervan 230 Volt wisselstroom te maken is een power conditioner (DC/AC convertor) nodig.

Rendement

Een prettige eigenschap van brandstofcellen is dat hun rendement stijgt wanneer ze elektriciteit in deellast gaan produceren. Dit is anders dan bij gasmotoren, die hun hoogste rendement halen wanneer het vermogen (bijna) maximaal is.

Praktisch gesproken is het maximale vermogen van een brandstofcel bereikt als de celspanning is gedaald tot 0,6 Volt. Modelberekeningen laten zien dat een PEMFC met CPO bij 0,6 Volt in vollast een elektrisch rendement heeft van 33,7% en maximaal 38,5% in deellast [23]. Het elektrisch rendement van een PEMFC met steamreforming (SR) wijkt hier niet veel van af, en is daarmee duidelijk lager dan dat van een SOFC met SR. Dit komt doordat er bij een SOFC restwarmte uit de stack van voldoende hoge temperatuur beschikbaar is voor de reforming, terwijl daar in de externe fuel processor van de PEM brandstof voor moet worden verbrand, die daardoor niet beschikbaar is voor elektriciteitsproductie. Ditzelfde geldt voor de PEM en SOFC met CPO.

Het thermisch rendement van PEMFC μ -WK systemen varieert met de belasting en het elektrisch rendement. Maar het totale rendement (elektrisch plus thermisch) is daar vrij ongevoelig voor, en blijkt vooral af te hangen van de aard van het systeem (SR of CPO) en de rookgastemperatuur. Als gevolg van inherente warmteverliezen neemt het totaalrendement af in deellast. Het totale rendement van CPO systemen bedraagt 98,5%. Het daalt tot 98,2% bij halfvast en 97,9% bij kwartlast.

Het totale rendement van een PEM μ -WK systeem is lager dan dat van een HR-ketel omdat het brandstofcelsysteem met een hoge luchtvermaat moet werken (3 tot 5), om koelingsproblemen te voorkomen. De rendementen van systemen met steam reforming en met CPO ontlopen elkaar niet veel, omdat in beide gevallen een groot deel van de warmte aanwezig is in latente vorm in het rookgas, vanwege de noodzaak van bevochtiging. Latente warmte kan pas bij lage rookgastemperaturen teruggewonnen worden.

Emissies

De CO₂ emissie van μ -WK installaties is gerelateerd aan het gasverbruik: 56,2 kg CO₂/GJ_{LHV}.

Het proces in de brandstofcel is in essentie NO_x arm. NO_x kan pas ontstaan in de naverbrander. De verbranding vindt hier katalytisch plaats, onder een grote luchtvermaat. Hierdoor is de temperatuurverhoging klein, wat zorgt voor weinig NO_x vorming. De NO_x emissies van brandstofcellen blijken zeer laag te zijn, lager dan 1 ppmv in het rookgas. Dit betekent minder dan 2 g/GJ ingaande brandstof [Jansen 2000].

De PEM brandstofcellen kunnen slechts weinig zwavel aan, hooguit 1 ppm. Aanwezige zwavelverbindingen moeten dus voor de brandstofcel worden verwijderd, wat er toe leidt dat de uitlaatgassen een verwaarloosbare hoeveelheid SO₂ bevatten.

Voor deze studie wordt ervan uitgegaan dat PEMFC μ -WK systemen een NO_x uitstoot van 1 g/GJ_{brandstof} hebben. Als boven- en ondergrens worden 2 en 0 g/GJ_{brandstof} aangehouden.

Investeringskosten

Er is uitgegaan van investeringskosten per kilowatt elektrisch vermogen omdat er wordt aangenomen dat dankzij het modulaire karakter van brandstofcellen de investeringskosten een lage afhankelijkheid van de systeemgrootte zullen hebben. Wel is er steeds getracht bij het verzamelen van kostprijsgegevens zo veel mogelijk aan te sluiten bij de beoogde systeemgrootte voor installaties in woonhuizen (0,3 tot 3 kW_e).

Componenten

Het PEM FC systeem bevat naast de stack: een external reforming fuel processor, een inverter om van gelijkstroom met wisselende spanning 240 Volt wisselstroom te maken, zwavelverwijdering, een naverbrander, warmtewisselaars en een regeling. Verder moet het systeem in een opstellingsruimte ondergebracht worden. Hoewel er niet in alle gevallen nieuwbouw hoeft te worden gepleegd, wordt er wel een stelpost bouwkundige kosten opgenomen.

Stack kosten

Er is van uit gegaan dat de kosten van PEMFC stacks in dezelfde orde van grootte liggen als die van SOFC stacks.

Inverter kosten

De inverter, die van gelijkstroom van wisselende spanning wisselstroom maakt met een constante spanning van 240 Volt en 50 Hz, is ook een duur onderdeel van het systeem. Voor early unit costs worden prijzen genoemd van 2400 €/kW_e, en mature unit costs van 1200 €/kW_e [Wilcox 2000]. Maar de prijzen van inverters van zonnepanelen zijn al lager, ongeveer 750 €/kW_e [Eikelboom 2001], en er is geen wezenlijk verschil tussen inverters voor zonnepanelen en voor brandstofcellen. Daarom wordt voor deze studie van de laatste waarde uitgegaan.

Ook voor dit onderdeel wordt een snelle daling van de investeringskosten verwacht van 14% per jaar. Het verleden heeft al een snelle daling van de kosten laten zien. 10 jaar geleden waren inverters nog niet te betalen. Tegenwoordig worden ze al toegepast in combinatie met zuigermotoren in toerengeregelde aggregaten, waarbij de wisselstroom eerst wordt gelijkgericht, en dan via een inverter op de juiste spanning en frequentie wordt gebracht.

Er is te verwachten dat de vraag naar inverters in de komende jaren explosief zal stijgen, vanwege de opmars van fotovoltaïsche zonnecellen, en de snelle ontwikkelingen op het gebied van brandstofcellen in het algemeen. Inverters werken op basis van halfgeleidertechnologie, en de computerbranche heeft laten zien dat er snelle kostendalingen er met halfgeleiders mogelijk zijn wanneer er veel vraag naar de producten is.

Kosten overige componenten

Als overige componenten nodig zijn kunnen worden genoemd: ontzwaveling, externe fuel processor, naverbranding, warmteterugwinning, en regeling.

De fuel processor is een duur onderdeel. Daarentegen heeft een PEMFC systeem geen dure warmtewisselaars nodig om lucht en brandstof naar de bedrijfstemperatuur van een SOFC stack te verwarmen. In kosten van overige componenten zullen PEMFC en SOFC systemen elkaar daarom niet veel ontlopen.

De warmtewisselaar voor de terugwinning van de resterende warmte in het rookgas kan uit de standaard keteltechniek afkomstig zijn. De prijs van de naverbrander valt in het niet bij die van de fuel processor. De ontzwaveling is zo'n 50 €/kW_e, met 5% onderhoud. Voor de regeling wordt een toeslag van 10% gerekend.

PEM FC Systeemkosten

In onderstaande tabel zijn de hiervoor bepaalde kosten per kilowatt elektrisch vermogen van de onderdelen van het PEMFC systeem samengevat, en de snelheid van afname van de kosten over de komende 10 jaar.

Table 7-7 *Investeringskosten van delen van een PEMFC systeem met verwachte kostendaling*

Onderdeel	Kosten €/kW _e			Afname [%/jaar]		
	Laag	Midden	Hoog	Laag	Midden	Hoog
Stack	1000	1500	2000	10%	14%	20%
Inverter	500	750	1000	10%	14%	20%
Overige systeemkosten	500	1000	1250	3%	5%	8%

Deze afnamepercentages leiden tot een daling van de systeemkosten van 9,5% per jaar. Dit is lager dan de 14% die blijkt uit de resultaten van Schaeffer [EVN 1998]. Wellicht dalen de kosten sneller dan hier is aangenomen.

Begin 2001 was er op de website van Vaillant te vinden dat hun systemen ongeveer 100.000 Dmark kostten. In augustus was deze informatie niet meer beschikbaar. Het betreft de kostprijs van experimentele eenheden, die waarschijnlijk veel sneller zullen dalen dan de voorspelde 14%.

Afschrijftermijnen

Voor de verschillende onderdelen van het PEMFC μ -WK systeem worden in navolging van de SOFC verschillende afschrijftermijnen gehanteerd. Er wordt vanuit gegaan dat de komende jaren de stack halverwege de levensduur van het systeem moet worden vervangen. Vooralsnog wordt er vanuit gegaan dat het systeem 8 jaar mee kan. In de toekomst zullen deze levensduren toenemen, en zal de economische levensduur meer relevant worden. Daarom is voor de geldigheid van deze afschrijftermijnen 5 jaar aangenomen.

Onderhoudskosten

Onderhoudskosten zijn geschat als percentages van de investeringskosten per jaar. De onderhoudspercentages en de afschrijftermijnen zijn samengevat in onderstaande tabel. Er zijn vrij hoge percentages aangenomen, wegens het prille stadium van ontwikkeling. Het onderhoudspercentage voor overige

stelsystemkosten is ontleend aan die van grotere gasmotoren. Voor bouwkundige kosten is 1% onderhoud normaal.

Table 7-8 *Onderhoudspercentages en afschrijftermijnen van verschillende delen van een PEMFC systeem.*

Onderdeel	Afschrijftermijn [jaar]			Onderhoud [%inv/jaar]		
	L	M	H	L	M	H
Stack	2	4	8	7%	10%	15%
Inverter	5	8	15	7%	10%	15%
Overige systeemkosten	5	8	15	3%	5%	8%

Trends [EVN 1998]

Onderstaande figuur geeft de historische kostendalingstrend weer van brandstofcellen in het algemeen (\$/kW_e uit 1995) zoals die zich sinds het begin van de jaren '60 gemanifesteerd heeft. De daling is gemiddeld 14,0% per jaar.

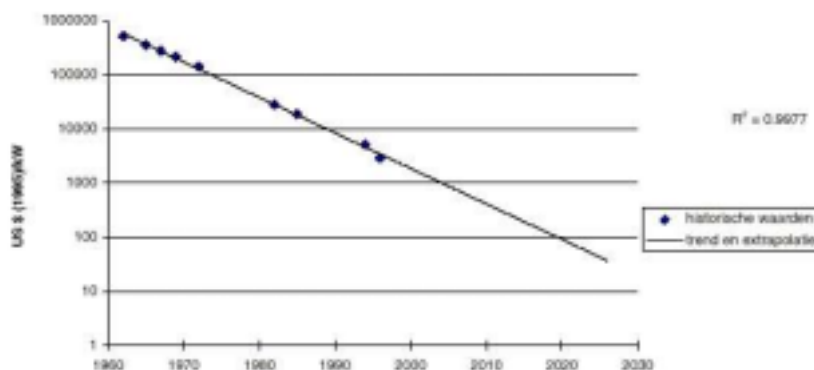


Figure 7-14 *Kostendaling brandstofcelsystemen*

Een indruk van de orde van grootte van het kostenniveau dat brandstofcellen moeten bereiken om concurrerend te worden met huidige technologieën is gegeven in onderstaande tabel. Als de trend van bovenstaande figuur zich doorzet, ontwikkelt de eerste markt voor brandstofcellen zich tussen 2005 en 2010 op de kleinschalige warmtekracht-markt. De kosten bedragen dan ongeveer 1000 dollar per kW_e ofwel circa 2000 gulden per kW_e. Mobiele toepassingen komen dan pas rond 2025 in beeld. Het streven van de auto-industrie om in 2004 een brandstofcelauto op de markt te brengen, betekent dat deze industrie ervan uit gaat dat met een grote R&D-inspanning de trend aanzienlijk versneld kan worden.

Table 7-9 *Orde van grootte van toegestane kostenniveaus brandstofcellen voor verschillende toepassingen [EVN 1998].*

Soort toepassing	Toegestaan kostenniveau [\$/kWe]
Mobiel: auto's	50
Mobiel: bussen	500
Stationair: micro-warmtekracht (tot 10 kWe)	1000
Stationair: mini-warmtekracht (tot 1 MWe)	750
Stationair: decentrale elektriciteitsproductie met hoog rendement (vanaf 5 MWe)	500

Aanbieders technologie

Marktleider voor de kleinere PEMFC systemen in Europa (1-4,6 kW_e, 35% elektrisch rendement) voor toepassing in de woningsector is Vaillant uit Duitsland. In 2002 worden de eerste demo-systemen op de markt verwacht, en in 2004 wil men de serieproductie van PEMFC μ -WK systemen ter hand nemen. Hart van het μ -WK systeem is een stack van Plug Power uit de USA (Latham NY) [Vaillant 2001].

In de USA werkt General Electric aan de Homegen. Ook hier is de stack van Plug Power [Plug Power 2001].

Plug Power heeft sinds februari 2000 in Apeldoorn (bij Gastec) een Nederlandse vestiging [Plug Power 2001].

Referenties voor het PEMFC-type micro-WK systemen

- [Eikelboom 2001] Dr. J.A. Eikelboom; persoonlijke mededelingen; ECN Petten, maart 2001.
- [EVN 1998] Energie Verslag Nederland 1998. ECN Beleidsstudies. Petten.
- [Jansen 2000] Jansen, D., Lugten, P., Brandwagt, K.: Verkennig naar de rol van brandstofcellen systemen bij de reductie van NO_x-emissies in Nederland. ECN, Petten, mei 2000.
- [Jonckers 2001] A.A. Jonckers; Apparaten dimensionering en kosten schatting; ECN notitie, 4 mei 2001.
- [Oosterkamp/Jonckers 2001] P.F. van den Oosterkamp, A.A. Jonckers; mondelinge mededelingen; ECN Petten, mei 2001.
- [Plug Power 2001] Plug Power homepage, <http://www.plug-power.com/home.cfm>, augustus 2001.
- [Vaillant 2001] Vaillant; Das Brennstoffzellen Heizgerät; Vaillant Remscheid Duitsland, © 2001 Vaillant http://195.179.67.226/internet/pages/universal/interuniv_presentation_frame/0,1840,1361,00.html
- [Wilcox 2000] C.P. Wilcox, R. Winstanley, T. Nietsch, C. Smith, R. Knight, C. Seymore; Solid Oxide Fuel Cell Field Trial Evaluation: Final Report; EA Technology, 2000, ETSU F/02/00167/REP.

7.2.4 Gasmotoren

Algemeen

Een optie voor μ -WK systemen die op korte termijn beschikbaar kan komen is de gasmotor μ -WK installatie. Het hart van deze installatie bestaat uit een zuigerverbrandingsmotor.

Conversietechnologie

Zuigermotoren zijn zeer bekend vanwege hun toepassing als automotoren, met benzine of dieselolie als brandstof. Ook worden ze veel toegepast in stationaire toepassingen, in Nederland vrijwel altijd met aardgas als brandstof. Zuigermotoren worden vooral toegepast in de vermogensrange van 4 tot 2000 kW_e, maar er zijn nog grotere systemen mogelijk [Gailfuss, ABB Zantingh]. Enkele belangrijke voordelen zijn:

- verkrijgbaarheid in alle soorten en maten
- compactheid
- eenvoud van installeren

Voor μ -WK systemen wordt gebruik gemaakt van zuigermotoren uit bromfietsen, of worden omgebouwde noodaggregaten gebruikt. In plaats van benzine kan met enige aanpassingen aan de motor aardgas als brandstof worden toegepast. De meeste motoren draaien in verband met de gewenste netfrequentie op een vast toerental van 1500 omw/min of eventueel op een veelvoud daarvan. Nieuwe ontwikkeling bij μ -WK systemen is echter variabel toerental. De opgewekte wisselstroom wordt dan eerst gelijkgericht en dan via moderne elektronica omgezet in netsynchrone wisselstroom met $\cos \varphi = 1$. Groot voordeel is dat de rendementen daarmee constant worden over het gehele vermogensbereik.

Brandstofeigenschappen

Als brandstof wordt aardgas gebruikt. In woningen en gebouwen die te ver van het gasnet af gelegen zijn kan propaan, benzine of huisbrandolie worden gebruikt.

Productkwaliteit

Eigenlijk is er in de μ -WK vermogensrange (tot 5 kW_e) alleen een systeem van 4,7 kW_e beschikbaar (Ecopower). Het meest bekende systeem wordt gebouwd door Senertec, op basis van een 5,5 kW_e Fichtel&Sachs gasmotor [SNTC]. Maar deze wordt al tot de mini systemen gerekend. Er wordt gewerkt aan een 1,8 kW_e systeem [Gastec]. Er zijn echter schaalverkleiningen te verwachten, want de kleinst verkrijgbare noodaggregaten hebben een vermogen van 0,7 kW_e [Honda].

Automotoren worden gebouwd voor een levensduur van ongeveer 5000 uur, bromfiets en aggregaatmotoren hebben een nog kortere levensduurverwachting. Om de levensduur te verlengen en op voor stationair gebruik aanvaardbaar niveau te krijgen (20.000 tot 80.000 uur) is het specifiek vermogen verlaagd. Dat maakt dat ook de kosten per kW_e nooit het niveau van een automotor zullen bereiken (25 €/kW_e). De huidige hoge prijs per kW_e wordt echter veroorzaakt door het vroege stadium van ontwikkeling en de kleine oplage. Verwacht wordt dat dit in de loop der tijd aanzienlijk kan dalen.

Table 7-10 *Kengetallen mechanische varianten zuigermotoren [VHK].*

Vermogensrange kW _e	< 5
Rendement elektriciteitsopwekking %	20-25
Totaalrendement %	90-95
Levensduur uur	20.000-80.000
Onderhoud uur	3000-6000
Geluidsproductie dBA	50-65
NO _x –uitstoot mg/m ³	125
Prijsindicatie €/kW _e	1.250-10.000

Rendement

Belangrijke kenmerken van de zuigermotoren zijn de relatief lage rendementen op elektriciteitsproductie, vergeleken met brandstofcellen systemen en grote WKK eenheden (STEG), en een dalend rendement in deellastbedrijf. Typische vollastrendementen van zuigermotoren zijn 20 tot 25% voor microsystemen, wat laag is in vergelijking met 35 à 40% voor zeer grote motoren, en 45 à 55% voor STEG systemen.

Het dalende deellastrendement wordt veroorzaakt door het constante toerental van de motoren en de regeling met een smoorklep. De nieuwe trend voor vermogensregeling is toerenregeling, waarbij de opgewekte wisselstroom eerst wordt gelijkgericht en dan met vermogenselectronica wordt omgezet in netsynchrone wisselstroom. Groot voordeel is het zelfs iets oplopende deellastrendement. Het regelbereik is globaal 40 tot 100% vermogen.

Het is van belang dat WKK-systemen een lange bedrijfstijd hebben (minimaal 4500 uur/jaar); de maximale efficiency wordt gehaald wanneer het systeem op vol vermogen draait. Vaak stoppen en starten levert een lager gemiddeld rendement en extra onderhoudskosten op. Een goede afstemming van het vermogen op de warmte- c.q. elektriciteitsvraag is derhalve van groot belang. De systemen zijn doorgaans warmtegestuurd.

Emissies

De CO₂ emissie van μ-WK installaties direct gerelateerd aan het gasverbruik: 56,2 kg CO₂/GJ_{LHV}.

NO_x emissies van gasmotoren zijn hoog (100 – 500 mg/Nm³ tegen 30 mg/Nm³ voor de Capstone micro gasturbine [Gailfuss]). Verder is “brandstofslip” een serieus probleem: een deel van de brandstof (0,5 – 3%) verlaat de motor onverbrand of gedeeltelijk verbrand (CO). Methaan veroorzaakt een sterk broeikas effect: CH₄ is 21 maal effectiever dan CO₂, gerekend over een periode van 100 jaar. Sommige systemen maken van de nood een deugd door met de onverbrande brandstof de NO_x katalytisch te reduceren.

Verder is het geluidsniveau van verbrandingsmotoren vrij hoog: 50-65 dBA, waardoor effectieve geluids-isolatiemaatregelen noodzakelijk zijn.

Investeringskosten

Prijzen voor minisystemen liggen doorgaans in de range €1250 tot 2500,- per kW_e [Gailfuss 2000]. Prijzen voor experimentele microsystemen kunnen

oplopen tot € 10.000,-/kW_e. Belangrijkste reden hiervoor is het huidige ontwikkelings- en productiestadium (prototype, nulserie).

De investeringskosten van gasmotoren met denox installatie liggen ongeveer 30% hoger dan die van gasmotoren zonder denox [vdSchans 1999].

Voor deze studie worden huidige investeringskosten voor 1 kW_e μ-WK systemen aangenomen van € 7500, met € 10000 als bovengrens, en € 5000 als ondergrens. Er wordt jaarlijks een kostendaling van 10% aangenomen, met 15% als bovengrens, en 5% als ondergrens [Ruijg 2002]. Een jaarlijks reductietempo van 10% komt overeen met een halvering van de kosten in zeven jaar. Na deze periode zijn de kosten vergelijkbaar met de doelkosten voor micro-WK brandstofcel- en Stirlingsystemen.

Onderhoudskosten

Onderhoudskosten van gasmotoren zijn in het algemeen vrij hoog. De gasmotoren bevatten veel onderdelen, die hoog worden belast. Door het lagere specifieke vermogen van stationaire motoren is de onderhoudsbehoefte per 1000 bedrijfsuren al lager dan voor automotoren. Wel is er jaarlijks groot onderhoud nodig, en verwacht wordt dat gedurende de levensduur minimaal 1 revisie noodzakelijk zal zijn. Extrapolatie van gegevens uit [Gailfuss 2000] leidt tot een waarde voor het jaarlijks onderhoud van een 1 kW_e μ-WK systeem van ongeveer 200 €/jaar.

Trends

Door toepassing van vermogenselektronica wordt het mogelijk om de gasmotoren toerengeregeld te maken, wat met name het deellastrendement ten goede komt [Honda, Ecopower].

Ook worden sterk verlaagde investeringskosten verwacht. De huidige hoge kosten van gasmotor μ-WK systemen zijn namelijk vooral te wijten aan de lage productieaantallen.

Aanbieders technologie

HONDA:

Door Honda is een micro-WKK systeem ontwikkeld op basis van een kleine lean burn 163 CC éencilindermotor welke draait op aardgas. Het elektrisch vermogen bedraagt 1,8 kW; het verwarmingsvermogen 4,8 kW. Het totaalrendement is 80%. De afmetingen zijn (lxbxh) 480x520x1000 mm. De levensduur van de motor bedraagt 20.000 uur (onderhoud elke 6000 uur). Honda produceert ook noodaggregaten, in vermogens vanaf 0,7 kW_e. Met vermogenselektronica zijn deze geschikt gemaakt voor variabele toerentallen, wat een beter deellastrendement tot gevolg heeft. Wellicht worden deze aggregaten in de toekomst geschikt gemaakt voor warmtekracht doeleinden.



Figure 7-15 *Honda Micro Cogeneration System [Gastec]*

MINOTAUR [TBE]:

Door het Amerikaanse Teledyne Brown Engineering wordt een 2,5 kW WKK-systeem op de markt gebracht, en vanaf maart 2001 een 5,0 kW_e systeem. Er wordt gebruik gemaakt van een 272 cc éencilinder viertaktmotor. Het systeem heeft een regelbaar vermogen. Het rendement op elektriciteit bedraagt circa 25%. Met behulp van een separate unit kan gebruik gemaakt worden van restwarmte. De restwarmteterugwinunit komt binnenkort op de markt beschikbaar. De levensduur bedraagt 40.000 uur. De afmetingen zijn 1040x1040x960 mm. Geluidsproductie 65 dBA op 7 meter. De prijs (exclusief de warmteterugwinunit) ligt op € 18.000,-.

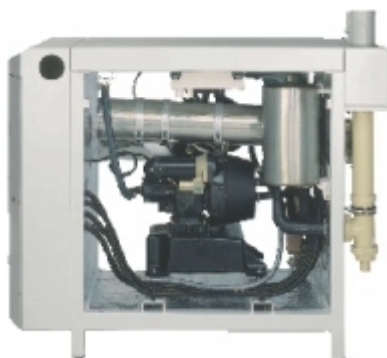


Figure 7-16 *Minotaur Remote Power System*

ECOPOWER [Ecopower]:

Dit Zwitserse bedrijf heeft een WKK-systeem ontwikkeld met een elektrisch vermogen van 2 tot 4,7 kW en een thermisch vermogen van 5,8 tot 11,3 kW. Het totaalrendement bij een koelwatertemperatuur van 60°C bedraagt 91% (elektrisch 24%, thermisch 67%). Bij een laagtemperatuursysteem kan een rendement van 101% worden behaald. Er is een proefserie van 20 apparaten gebouwd welke in de praktijk worden getest; op dit moment richt men zich op de marktontwikkeling. De emissiewaarden en het geluidsniveau liggen nog wat hoog (58 tot 64 dBA).

De motor is toerengeregeld en de stroom wordt via vermogenslektronica netsynchroon gemaakt. Dit heeft een goed deellastrendement tot gevolg [Hermans 2001].



Figuur: Ecopower Mini-BHKW

INTELLIGEN ENERGY SYSTEMS [VHK]:

Dit Amerikaans bedrijf heeft een 5 kW_e micro-WKK systeem ontwikkeld op basis van een betrouwbare motor, een inductie generator en een microprocessor gestuurde besturingseenheid. Het totaalrendement bedraagt 90%. De motor draait op aardgas, propaan en olie. Het systeem is in de praktijk getest en is op de markt verkrijgbaar. Recente zoekacties op internet hebben geen verwijzing naar dit bedrijf opgeleverd. Het is dus de vraag of dit systeem nog verkrijgbaar is.

SENERTEC [SNTC]

Het Duitse SenerTec brengt een 5,5 kW_e micro-WKK eenheid op de markt (voorheen Fichtel en Sachs). Het verwarmingsvermogen bedraagt 12,5 kW. Er wordt gebruik gemaakt van een 583 cc éencilinder motor welke draait op aardgas. Het totaalrendement (bij een aanvoertemperatuur van 70°C) bedraagt 91%; het rendement voor de elektriciteitsopwekking bedraagt 28% op onderwaarde. Het systeem is warmtegestuurd. De levensduur bedraagt 80.000 uur (onderhoud iedere 3500 uur). Geluidsproductie 52 dBA, NO_x 400 mg/m³. Afmetingen 720x1060x1000 mm. De prijs van de unit is fl.22.450,- [Van der Beyl energiesystemen].



Figure 7-17 Senertec mini-WKK

Referenties voor gasmotor-type micro-WK systemen

[Gailfuss] Markus Gailfuss; *Blockheizkraftwerke bis 100 kW elektrischer Leistung*; Wärmetechnik-Versorgungstechnik 11/2000.

- [Gastec] Gastec Projecten, 2001. www.gastec.nl/projecten/honda.asp
- [vdSchans] R.J. van der Schans, *fax aan A. de Raad ECN*, Cogen Projects, Driebergen, 24sep1999
- [vDril 1999] A.W.N. van Dril, F.A.M. Rijkers, J.J. Battjes, A. de Raad; *Toekomst Warmtekrachtkoppeling. Verkenning van de economische aantrekkelijkheid in een geliberaliseerde energiemarkt*; ECN Petten, oktober 1999, ECN-C-99-086
- [Groenendijk/Zeedijk] G. Groenendijk, H.B. Zeedijk; *Werktuigbouw. Kennis van werktuigen*; Wolters-Noordhoff, Groningen 1983, ISBN 90 01 35246 4
- [Hermans 2001] Productfolder Ecopower mini-WKK; Hermans Techniek, Waalwijk
- [VHK] Ir. R.C.A. van Holstein, ir. M.P.W. Tak; *State of the art mini- en micro-WKK. Fase 1: Deskresearch*; Van Holstein en Kemna BV, Delft, december 1999
- [Honda] Honda Power Equipment Group, 4900 Marconi Dr., Alpharetta, GA 30005-8847 www.hondapowerequipment.com/gen.htm
- [TBE] Teledyne Brown Engineering, Business Unit Energy Systems, 10707 Gilroy Road, Hunt Valley, MD 21031-1311 www.tbe.com/products/minotaur/minotaur2500.asp
- [Ecopower] Valentin Ecopower, Wilhelm-Maybach-Strasse 12 - 55129 Mainz, www.ecopower.de
- [SNTC] SenerTec, Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH, Carl-Zeiss-Straße 18, 97424 Schweinfurt www.senertec.de
- [DTZ] DEUTZ AG, Deutz-Mülheimer Str. 147-149, 51057 Köln, www.deutz.de
- [ABB Zantingh] ABB Zantingh Energiesystemen BV, Aarbergerweg 5-7, 1435 CA Rijsenhout; *Productinformatie*; 1 april 1999
- [Van der Beyl Energiesystemen BV] Van der Beyl Energiesystemen BV; *Beylsleutel*, Rotterdam, juni 2000.
- [Ruijg 2002] *Rendementen en economische kengetallen van gasmotoren*. ECN notitie 7.2551/02 PC 2. Petten, 16 april 2002.