

RENTABILITEIT VAN MICRO WARMTEKRACHTSYSTEMEN

Beschouwingen vanuit een particulier (eindgebruikers-) perspectief

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

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

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 PEMFC 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 Protocol.

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, die bovendien maximaal 1350 € duurder is dan een HR ketel. Daartoe worden drie uitvoeringsvormen met verschillende warmte/krachtverhoudingen, op basis van het Stirling- en het brandstofcel-principe, 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 7.2551.

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 for individual households in the Netherlands. By installing natural gas fuelled co-generation equipment, based on Stirling, gas engine or fuel cell technologies, to fulfil the residential energy demands, energy cost reductions are calculated. All calculated values have been evaluated for their uncertainty.

An estimate is made for required SPOT¹, which leads to estimates for the room for investment for the several micro-scale natural gas fuelled technology options that are currently under development.

Trefwoorden

Energiekostenreductie, warmte-krachtkoppeling, Stirling motor, brandstofcellen, gasmotoren, rentabiliteit, micro-warmtekracht, onzekerheidsanalyse.

¹ SPOT = simple pay-out time.

INHOUD

LIJST VAN TABELLEN	4
LIJST VAN FIGUREN	5
SAMENVATTING	7
1. INLEIDING	13
1.1 Doel	13
1.2 Werkwijze	13
1.3 Afbakening	13
1.4 Leeswijzer	14
2. MARGINALE KOSTEN, OPBRENGSTEN EN CO ₂ -REDUCTIE	15
2.1 Marginale kosten van elektriciteit uit μ -WK	15
2.2 Marginale opbrengsten van elektriciteit uit μ -WK.	16
2.3 REB-dervingskosten van vermeden CO ₂ uitstoot	17
2.4 Conclusies	18
3. GEVOELIGHEIDSANALYSE	20
3.1 Meest invloedrijke factoren	20
3.2 Energiekostenreducties en hun invloedsfactoren	23
3.2.1 Terugleververgoeding en direct supply factor.	23
3.2.2 Afhankelijkheid van elektriciteits- en warmtevragen.	23
3.2.3 Vermogen en elektriciteitsvraag.	24
3.2.4 Marktsegmenten met variërend vermogen van de μ -WK eenheid.	25
3.2.5 1 kW _e Stirling	26
3.2.6 SOFC μ -WK systemen	28
3.3 Vergelijking van verschillende technologieën.	29
3.4 Conclusies	30
4. ENERGIEKOSTENREDUCTIE VAN μ -WK SYSTEMEN IN VERSCHILLENDE MARKTSEGMENTEN	31
4.1 Marktsegmenten	31
4.2 Effect van type en vermogen van de μ -WK op de kostenbesparing	31
4.2.1 1&2-persoons huishoudens	31
4.2.2 Appartement	32
4.2.3 Rijwoning	33
4.2.4 Vrijstaand	34
4.2.5 Vinex-woning	34
4.2.6 Groot gezin	35
4.2.7 Grootverbruiker	36
4.2.8 Keuze van systeemgrootte.	36
4.3 Vergelijking van 1 kW _e μ -WK systemen in verschillende marktsegmenten	37
4.3.1 Stirling	37
4.3.2 Gasmotor	38
4.3.3 PEMFC	39
4.3.4 SOFC	40
4.3.5 Vergelijking van de beschouwde typen 1kW _e μ -WK systemen in de verschillende marktsegmenten	41
5. MEERINVESTERINGSRUIMTE VAN μ -WK SYSTEMEN TEN OPZICHTE VAN HR-COMBIKETELS	43
5.1 Kapitaalslasten	43
5.2 Jaarlasten	44
5.3 Terugverdientijd	44

5.4	Meerinvesteringsruimte voor de particulier in de diverse marktsegmenten.	44
5.5	Beïnvloedbare parameters	46
5.6	Meerinvesteringsruimtes	48
6.	CONCLUSIES	49
6.1	Marginale kosten, opbrengsten en CO ₂ -reductie	49
6.2	Invloedsfactoren	50
6.3	Energiekostenreducties van 1 kW _e μ-WK systemen in verschillende marktsegmenten	50
6.4	Meerinvesteringsruimtes	51
7.	AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK	53
7.1	Nader onderzoek naar vermeden inkoop van elektriciteit	53
7.1.1	Bepaling APF.	53
7.1.2	Verhoging APF	53
7.2	Naar kostentargets voor componenten.	53
7.2.1	Probleem.	53
7.2.2	Voorstel voor aanpak.	53
	LITERATUUR	54

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1	Marginale kostprijs van elektriciteit uit diverse typen μ-WK installaties	8
Tabel 2	Marginale kostprijs van een kWh elektriciteit uit μ-WK (incl. BTW).	15
Tabel 3	Marginale opbrengst van elektriciteit uit μ-WK [€ct/kWh]	17
Tabel 4	Kosten per vermeden ton CO ₂ voor de overheid	18
Tabel 5	Invoerparameters met hun kansdichtheidsverdelingen (PEMFC)	20
Tabel 6	Energiekostenreducties door een PEMFC μ-WK systeem in een gemiddeld huishouden, bij verschillende terugleverscenario's [€/jr] (MKP = 6,6 €ct/kWh).	21
Tabel 7	Marktsegmenten.	31
Tabel 8	Vanuit energiekostenbesparing gezien optimale systeemgrootten in verschillende marktsegmenten.	37
Tabel 9	Energiekostenreductie van een 1 kW _e Stirling μ-WK installatie	37
Tabel 10	Energiekostenreductie van een 1 kW _e Gasmotor μ-WK installatie	38
Tabel 11	Energiekostenreductie van een 1 kW _e PEMFC μ-WK systeem in diverse marktsegmenten	39
Tabel 12	Energiekostenreductie van een 1 kW _e SOFC μ-WK systeem in diverse marktsegmenten	40
Tabel 13	Waarden van de annuïteit (jaarlijkse betaling als fractie van de investering) bij verschillende rentepercentages en een levensduur van 15 jaar	43
Tabel 14	Verwachtingswaarden voor meerinvesteringruimtes van de beschouwde technologieën in de verschillende marktsegmenten	48
Tabel 15	Marginale kostprijs van elektriciteit uit diverse typen μ-WK installaties, en CO ₂ reductie	49
Tabel 16	Verwachtingswaarden voor meerinvesteringruimtes van de beschouwde technologieën in de verschillende marktsegmenten	51

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1	Energiekostenreductie van een 1 kW _e PEMFC μ-WK systeem in een gemiddelde woning, afhankelijk van terugleververgoeding en directe levering [€/jr].	9
Figuur 2	Energiekostenreductie als functie van nominaal vermogen en type, met landelijk gemiddelde elektriciteit- en warmtevraag.	9
Figuur 3	Energiekostenreductie van 1 kW _e μ-WK systemen verschillende technologieën bij verschillende warmtevragen en een elektriciteitsvraag van 4500 kWh/yr.	10
Figuur 4	Energiekostenreducties van de beschouwde typen 1 kW _e μ-WK systemen in de verschillende marktsegmenten, met mogelijke spreiding ten gevolge van in- en externe onzekerheden.	11
Figuur 5	Meerinvesteringsruimtes van verschillende typen 1 kW _e μ-WK systemen in de beschouwde marktsegmenten, met mogelijke spreiding ten gevolge van interne onzekerheden.	12
Figuur 6	Samenhang tussen elektriciteitsproductie van een μ-WK installatie en directe levering aan het huishouden.	21
Figuur 7	Verdelingsdichtheid van de energiekostenreductie van een μ-WK systeem met een verwacht elektrisch rendement van 30% LHV.	22
Figuur 8	Invloed van verschillende grootheden op de jaarlijkse energiekostenreductie van μ-WK bij ongelimiteerde teruglevering.	22
Figuur 9	Energiekostenreductie van een 1 kW _e PEMFC μ-WK systeem in een gemiddelde woning, afhankelijk van terugleververgoeding en directe levering [€/jr].	24
Figuur 10	Energiekostenreductie van een 1 kW _e PEMFC μ-WK systeem in verschillende marktsegmenten [€/jr].	24
Figuur 11	Energiekostenreductie van een PEMFC μ-WK systeem afhankelijk van elektriciteitsvraag en elektrisch vermogen [€/jr].	25
Figuur 12	Energiekostenreductie van een PEMFC μ-WK systeem waarvan het vermogen toeneemt met de elektriciteitsvraag in verschillende marktsegmenten [€/jr].	26
Figuur 13	Energiekostenreductie van een 1 kW _e Stirling μ-WK systeem in verschillende marktsegmenten [€/jr].	26
Figuur 14	Energiekostenreductie van een Stirling μ-WK systeem waarbij het vermogen toeneemt met de elektriciteitsvraag van 0,4 kW _e tot 1,6 kW _e [€/jr].	27
Figuur 15	Energiekostenreductie door toepassing van een Stirling μ-WK systeem bij een elektriciteitsvraag van 3200 kWh/y in €/jr.	27
Figuur 16	Energiekostenreductie van een 1 kW _e SOFC μ-WK systeem in verschillende marktsegmenten [€/jr].	28
Figuur 17	Energiekostenreductie bij verschillende elektrische vermogens en elektriciteitsvragen [€/jr], en een gasvraag 1900 m ³ /jr.	29
Figuur 18	Energiekostenreductie bij toepassing van SOFC μ-WK systemen met aangepast vermogen in verschillende marktsegmenten [€/jr].	29
Figuur 19	Energiekostenreductie van 1 kW _e μ-WK systemen verschillende technologieën bij verschillende warmtevragen en een elektriciteitsvraag van 4500 kWh/yr.	30
Figuur 20	Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ-WK systemen met verschillende vermogens in 1&2-persoons huishoudens	32
Figuur 21	Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ-WK systemen met verschillende vermogens in appartementen	33
Figuur 22	Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ-WK systemen met verschillende vermogens in rijwoningen.	33

Figuur 23	Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ -WK systemen met verschillende vermogens in vrijstaande woningen	34
Figuur 24	Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ -WK systemen met verschillende vermogens in vinex woningen	35
Figuur 25	Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ -WK systemen met verschillende vermogens in grote gezinnen	35
Figuur 26	Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ -WK systemen met verschillende vermogens in het marktsegment “grootverbruikers”	36
Figuur 27	Energiekostenreducties van een 1 kW _e Stirling μ -WK systeem in diverse marktsegmenten in €/jr.	38
Figuur 28	Energiekostenreducties van een 1 kW _e Gasmotor μ -WK systeem in diverse marktsegmenten.	39
Figuur 29	Energiekostenreductie van een 1 kW _e PEMFC μ -WK systeem in diverse marktsegmenten	40
Figuur 30	Energiekostenreductie van een 1 kW _e SOFC μ -WK systeem in diverse marktsegmenten	41
Figuur 31	Vergelijking van de energiekostenreducties van de beschouwde technieken in de verschillende marktsegmenten.	42
Figuur 32	Meerinvesteringsruimtes van verschillende μ -WK systemen in diverse marktsegmenten in Euro bij een SPOT van 5 jaar. Zie paragraaf 4.1 voor de verklaring van de marktsegmenten.	45
Figuur 33	Relatieve spreiding in de meerinvesteringsruimtes van verschillende μ -WK technologieën in de beschouwde marktsegmenten.	45
Figuur 34	Invloeden van spreiding in invoergegevens op de investeringsruimte van SOFC μ -WK systemen in 1&2-persoons huishoudens.	46
Figuur 35	De invloed van beïnvloedbare parameters op de meerinvesteringsruimte van een SOFC μ -WK systeem in 1&2-persoons huishoudens.	46
Figuur 36	Spreiding in de resultaten van de meerinvesteringsberekeningen wanneer externe factoren constant worden gesteld.	47
Figuur 37	Meerinvesteringsruimtes met alleen spreiding in interne factoren.	48
Figuur 38	Vergelijking van de energiekostenreducties van de beschouwde 1 kW _e technieken in de verschillende marktsegmenten in Euro per jaar.	51

SAMENVATTING

Eén van de doelen van het ECN-cluster μ -WK is het bepalen van kostprijdoelen van componenten van micro-warmtekrachtsystemen. Daartoe is het nodig de meerinvesteringsruimtes van microwarmtekrachtinstallaties voor individuele toepassing in woningen te kennen. Deze meerinvesteringsruimte kan vervolgens over de diverse componenten van het systeem worden verdeeld. De meerinvesteringsruimte hangt voor een groot deel af van de reductie van energiekosten ten opzichte van het meest voor de hand liggende alternatief: de HR-(combi)ketel, en van de geaccepteerde terugverdientijd. De laatste is op zijn beurt weer afhankelijk van de waardering van de consument voor energiebesparing, en bijvoorbeeld of de μ -WK installatie in staat is stroom te produceren in het geval van uitval van het elektriciteitsnet.

In dit rapport wordt de aandacht vooral gericht op het eerste aspect: de reductie van de energiekosten door toepassing van μ -WK. Ook wordt enige aandacht besteed aan de geaccepteerde terugverdientijd.

Werkwijze

Het onderzoek is begonnen met een analyse van de marginale kostprijs van elektriciteit uit μ -WK-installaties. Hiermee kan worden bepaald vanaf welke hoogte van de terugleververgoeding het voor de diverse typen μ -WK systemen interessant wordt terug te leveren.

Vervolgens is een model gebouwd waarmee de jaarlijkse energiekostenbesparing kan worden bepaald. De invoerparameters zijn voorzien van een kansdichtheidsverdeling, waarmee is nagegaan wat de invloed van de diverse invoerparameters is op de resulterende energiekostenbesparing. Vervolgens is de invloed van de parameters met de meeste invloed zichtbaar gemaakt in 3 dimensionale grafieken.

Er is een zevental marktsegmenten gedefinieerd. Voor elk van deze marktsegmenten is onderzocht wat voor ieder type μ -WK systeem (Stirling, Gasmotor, PEMFC en SOFC) een goede keuze voor het elektrisch vermogen zou zijn. Voor alle marktsegmenten bleek 1 kW_e een redelijke tot goede keuze te zijn. Voor deze grootte is voor ieder marktsegment en voor ieder type μ -WK de verwachtingswaarden en de 90% betrouwbaarheidsintervallen van de energiekostenreductie bepaald. Een beschouwing over vereiste terugverdientijden heeft een voorlopige eis van 5 jaar opgeleverd. Met deze eis zijn tenslotte investeringsruimtes in de diverse marktsegmenten bepaald.

Marginale kosten, opbrengsten en CO₂-reductie

Als eerste heeft een analyse van marginale kosten, opbrengsten en CO₂-reductie plaatsgevonden. De resultaten van deze analyse zijn:

1. De marginale kostprijs (MKP) per kWh_e van elektriciteit uit μ -WK hangt vooral af van het totaalrendement van de μ -WK installatie.
2. De MKP per type is samengevat in Tabel 1.
3. De grootste financiële besparing voor de bewoner wordt behaald met het vermijden van inkoop van elektriciteit (16,6 tot 18 €/kWh) door het zo veel mogelijk direct benutten van de elektriciteit afkomstig van de μ -WK.
4. Als de terugleververgoeding (waarde voor het energiebedrijf plus eventuele REB teruggave) lager is dan de marginale kostprijs zal de consument in het geval van afwezigheid van elektriciteitsvraag de voorkeur geven aan warmteopwekking met de hulpketel. Dit is echter uit energiebesparingsoogpunt ongewenst.
5. Bij een elektrisch rendement boven 30% is de marginale kostprijs van elektriciteit zonder warmtebenutting lager dan de inkoopprijs. Dan wordt het financieel interessant om ook als er geen warmtevraag is elektriciteit te produceren voor eigen gebruik (vermeden inkoop), terwijl de warmte wordt gedumpt. Zo lang het elektrisch rendement lager is dan dat van de centrale elektriciteitsopwekking is dit uit energiebesparingsoogpunt ongewenst.

6. De overheid verleent vrijstelling van REB op gas voor warmtekrachtinstallaties met een elektrisch rendement boven 30%, en meer dan 60 kW_e vermogen. Er wordt gepleit voor een zelfde REB vrijstelling voor micro warmtekracht, die ook voor lagere rendementen geldt. Maar dan wordt het “dumpen” van warmte interessant vanaf 20% elektrisch rendement. Verder werkt dit vooral in het voordeel van laag-E-rendement μ -WK, en het is een voor de overheid zeer dure CO₂ reductiemaatregel. Beter is de REB op gas te handhaven en bij teruglevering de REB op elektriciteit (gedeeltelijk) terug te geven. De marginale kostprijs is dan nog zodanig dat dumpen van warmte niet snel interessant is.
7. Gezien het voorgaande is de bedrijfsstrategie die vanuit financieel oogpunt wordt aanbevolen:
 - Elektriciteitsvraagvolgend, om maximale vermeden inkoop te genereren.
 - Tot en met een elektrisch rendement van 30% warmtevraaggelimiteerd: elektriciteit inkopen als er geen warmtevraag is. Om milieuredenen is warmtevraaggelimiteerdheid aanbevolen tot het elektrisch rendement van de μ -WK het parkrendement ($\pm 42\%$) te boven gaat.
 - Als er geen elektriciteitsvraag is wordt de warmtevraag ingevuld met de hulpketel wanneer de terugleververgoeding lager is dan de marginale kostprijs van elektriciteit uit de μ -WK. De MKP is voor brandstofcellen hoger dan voor Stirling (Tabel 1).
 - Als de terugleververgoeding hoger is dan de marginale kostprijs wordt de warmtevraag met de μ -WK ingevuld. Wel zal er worden getracht de warmteproductie te verschuiven naar momenten met eigen elektriciteitsvraag door middel van warmteopslag.

Tabel 1 Marginale kostprijs van elektriciteit uit diverse typen μ -WK installaties

		Stirling	Gasmotor	PEMFC	SOFC
Elektrisch rendement	[-]	10%	20%	30%	40%
Totaal rendement ²	[-]	100%	95%	90%	85%
Thermisch rendement HR-ketel	[-]	100%			
Gaskosten, met REB belast ³	€/ct/kWh	49,4	24,7	16,5	12,4
Netto marginale kostprijs elektriciteit	€/ct/kWh	4,9	6,2	6,6	6,8
Vermeden CO ₂	kg/kWh	0,41	0,36	0,35	0,34

Invloedsfactoren

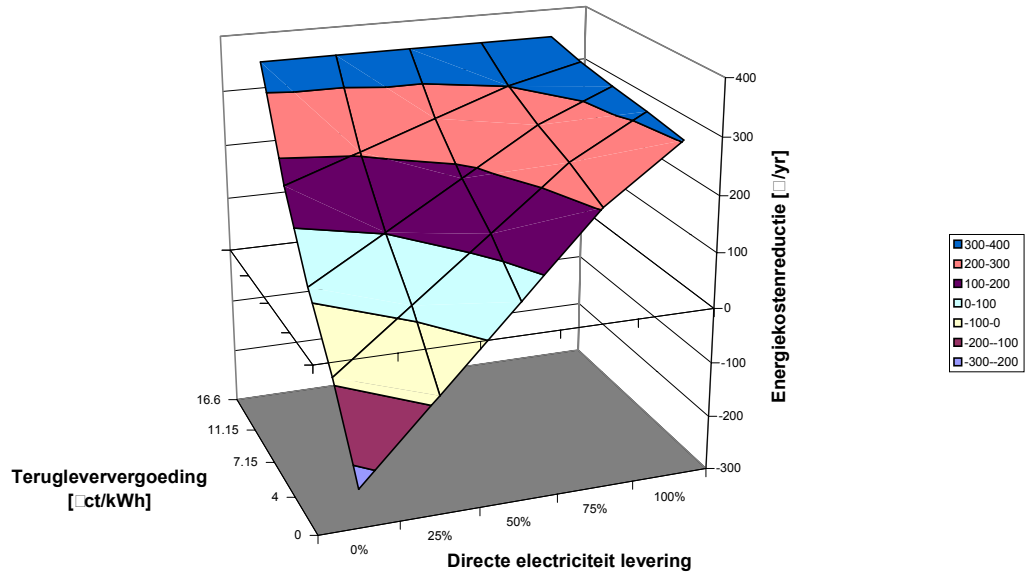
De volgende factoren hebben grote invloed op de energiekostenbesparing van μ -WK systemen.

1. Een hoog direct eigen gebruik van de door het μ -WK-systeem geproduceerde elektriciteit of een lage prijs voor tijdelijke “opslag” van elektriciteit op het net (verschil tussen terugleververgoeding en inkoopprijs van elektriciteit). Deze factoren zijn van doorslaggevend belang voor de economische haalbaarheid van μ -WK systemen in particuliere exploitatie. Wanneer beide laag zijn kan er zelfs sprake zijn van een energiekostenontsparring (Figuur 1).
2. Type en nominaal vermogen (Figuur 2). Voor gemiddelde elektriciteitsverbruiken is een nominaal elektrisch vermogen van een μ -WK systeem van 1 kW_e een goede keuze. Vanwege de modulaire opbouw en de hoge kosten van een stack wordt vermoed dat de investeringskosten van een μ -WK systeem toenemen met de systeemgrootte. Zo lang er een grote afhankelijkheid is, is het verstandig om bij afnemende elektriciteitsvraag voor kleinere systemen te kiezen, en omgekeerd. Bij Stirling μ -WK systemen is de afhankelijkheid van het formaat minder groot, en kan het vermogen relatief groot worden gekozen.
3. Warmtevraag en type. Brandstofcel μ -WK systemen zijn minder gevoelig voor de hoogte van de warmtevraag dan Stirling, wat wordt geïllustreerd in Figuur 3. Door de lage warmtekrachtverhouding is er voor brandstofcellen meestal voldoende afzet voor de warmte mogelijk. De Stirling daarentegen realiseert vergelijkbare energiekostenreducties als de brandstofcelssystemen in de marktsegmenten met een duidelijk bovengemiddelde gasvraag.

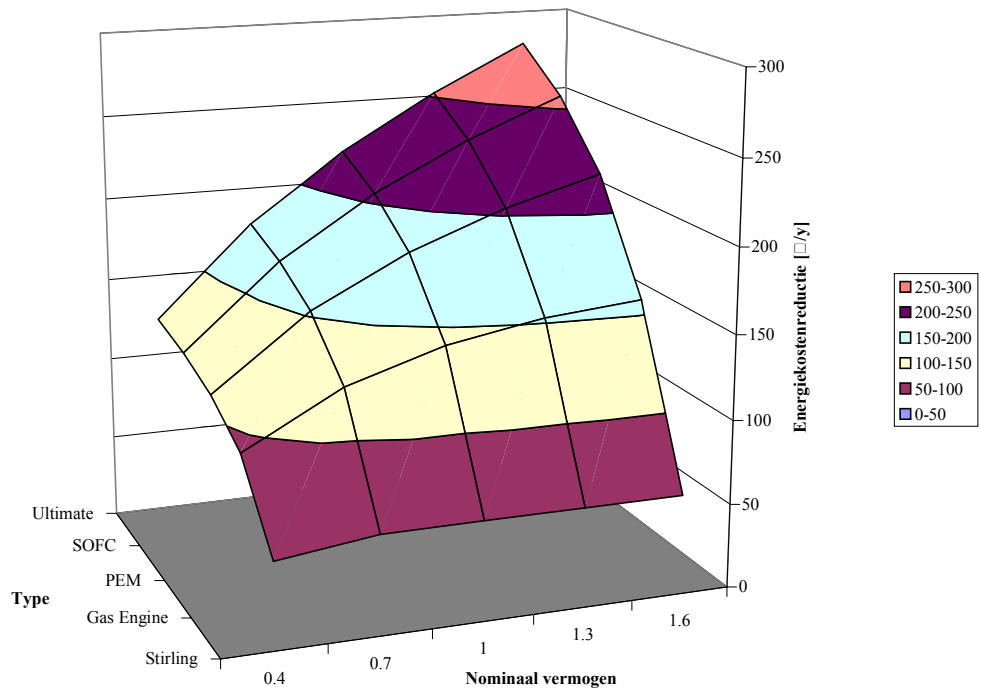
² Aangenomen is dat het totaalrendement daalt met toenemend elektrisch rendement: $\eta_{\text{tot}} = 1,05 - 0,5 * \eta_{\text{el}}$

³ is ook de elektriciteitsprijs bij dumpen van warmte

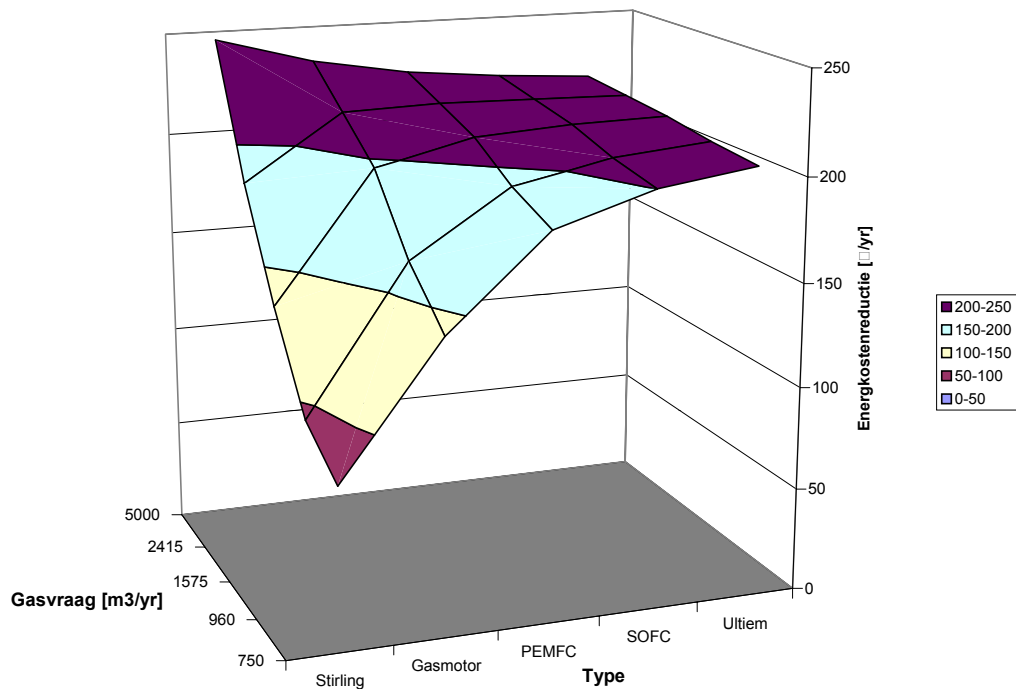
In Figuur 3 is aangenomen dat het aandeel directe levering van elektriciteit aan het huishouden voor alle typen gelijk is. Verwacht wordt echter dat brandstofcellen snellere belastingwisselingen aan kunnen dan Stirling systemen, zodat de laatste wellicht een lagere directe levering behalen. In situaties met een extreem laag gasverbruik (woningen met EPC ≤ 1 , appartementen) zal de SOFC de hoogste energiekostenreductie behalen, omdat zijn elektriciteitsproductie het minst van de gasvraag afhangt.



Figuur 1 Energiekostenreductie van een 1 kW_e PEMFC μ -WK systeem in een gemiddelde woning, afhankelijk van terugleververgoeding en directe levering [€/jr].



Figuur 2 Energiekostenreductie als functie van nominaal vermogen en type, met landelijk gemiddelde elektriciteit- en warmtevraag.



Figuur 3 Energiekostenreductie van 1 kW_e μ -WK systemen verschillende technologieën bij verschillende warmtevragen en een elektriciteitsvraag van 4500 kWh/yr.

Energiekostenreducties van 1 kW_e μ -WK systemen in verschillende marktsegmenten

Uit analyses van energiekostenreducties per marktsegment bij variërende grootte en type systeem blijkt dat een systeem van 1 kW_e in alle marktsegmenten redelijk tot goed voldoet.

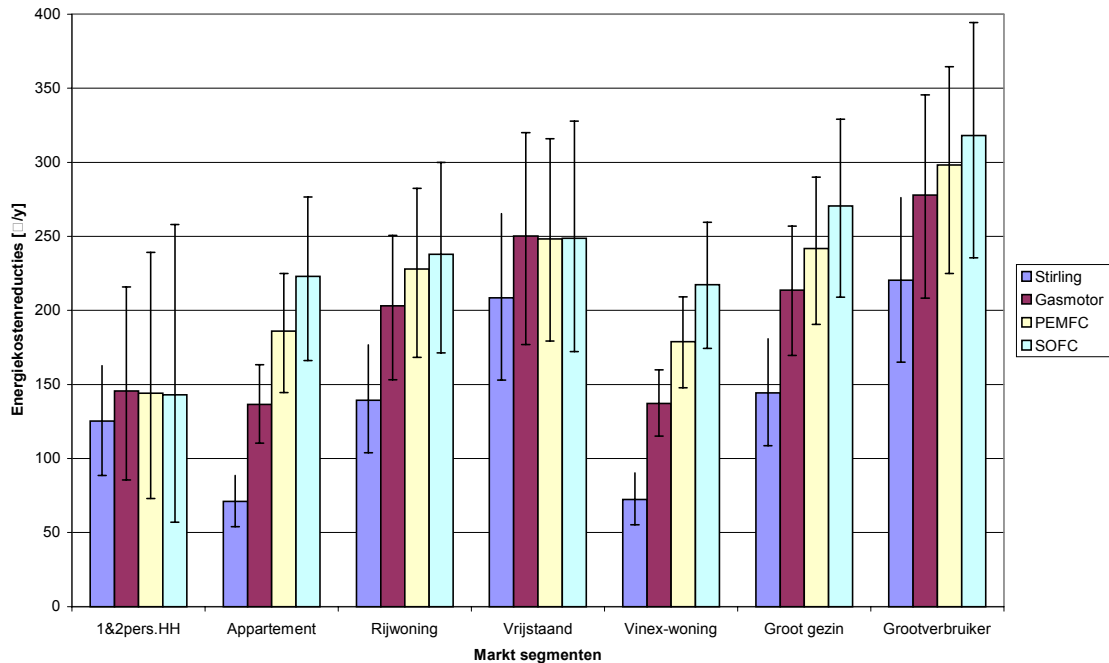
Om binnen de verschillende beschouwde marktsegmenten de μ -WK systemen te kunnen vergelijken zijn de te verwachten energiekostenreducties van 1 kW_e systemen bij elkaar in één figuur uitgezet.

In alle marktsegmenten wordt de grootste besparing behaald met SOFC μ -WK systemen. De besparingen van PEMFC systemen, en in een aantal segmenten ook de gasmotoren, blijven hier slechts iets bij achter. Bij een ten opzichte van de warmtevraag relatief lage elektriciteitsvraag (1&2 persoons huishouden, vrijstaand) vallen de verschillen tussen gasmotor, PEMFC en SOFC bijna weg, wat zou betekenen dat het in deze marktsegmenten niet veel uit maakt voor welk systeem men kiest.

De Stirling behaalt in alle marktsegmenten een lagere besparing dan de brandstofcellen. Bij een relatief lage elektriciteitsvraag (1&2-persoons huishouden, vrijstaand) is de besparing van de Stirling echter niet veel lager dan die van brandstofcellen. In de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker kan de Stirling zijn hoogste besparingen genereren. In marktsegmenten met een lage gasvraag (appartementen, vinex woningen) is de besparing van de Stirling zeer laag, wat ook al blijkt uit Figuur 3.

Omdat het te verwachten is dat de Stirling nog lange tijd goedkoper in aanschaf zal zijn dan brandstofcelsystemen, zal de Stirling in de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker voorlopig niet te concurreren zijn. Toepassing van brandstofcellen zal dan ook vooral in de marktsegmenten rijwoning en groot gezin moeten worden gezocht, waar de Stirling minder energiekostenreductie oplevert. Voor vinex woningen en appartementen lijkt de SOFC de beste keus.

In absolute zin blijft voor alle technieken de besparing in het segment 1&2-persoons huishoudens achter bij de anderen. Alleen bij hoge terugleververgoedingen kan μ -WK hier interessant zijn, wat zichtbaar is in de grote onzekerheidsmarges in Figuur 4.



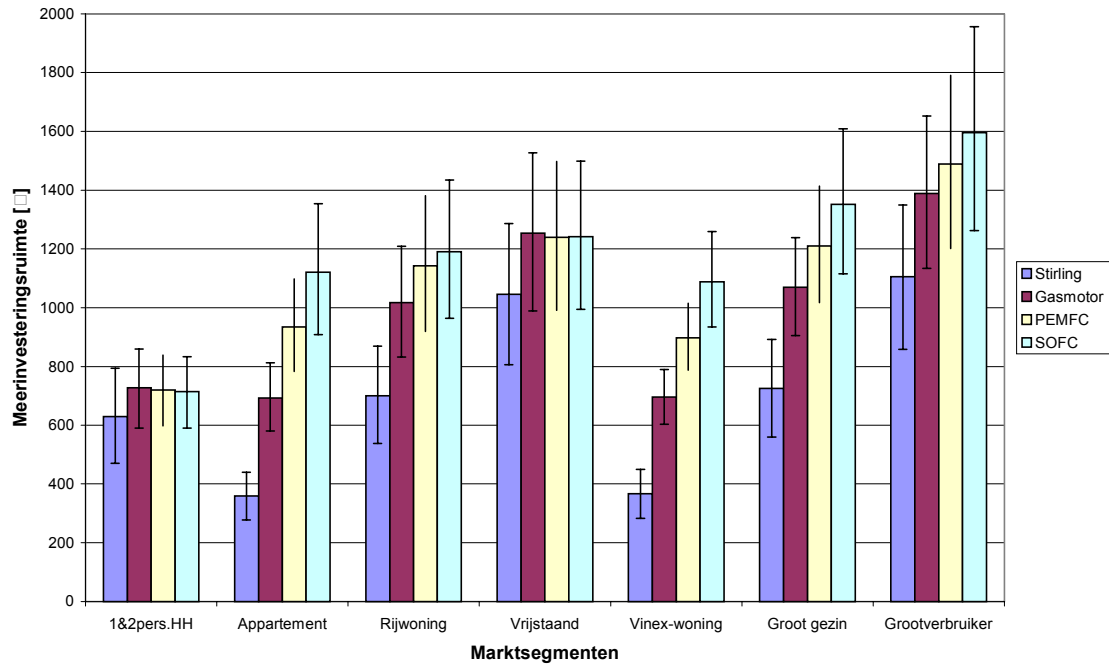
Figuur 4 Energiekostenreducties van de beschouwde typen 1 kW_e μ-WK systemen in de verschillende marktsegmenten, met mogelijke spreiding ten gevolge van in- en externe onzekerheden.

Meerinvesteringsruimtes

De verwachte meerinvesteringsruimtes voor de verschillende technieken in de beschouwde marktsegmenten zijn samengevat in Figuur 5. In de foutbalken in deze figuur die de mogelijke spreiding in de resultaten weergeven, zijn uitsluitend factoren meegenomen die beïnvloed kunnen worden door ontwerp of regeling van het μ-WK systeem, zoals bijvoorbeeld het aandeel directe levering, rendementen van μ-WK en hulpketel, en dergelijke. Zaken die niet door ontwerp of regeling kunnen worden beïnvloed, zoals onzekerheid over de hoogte van de terugleververgoeding, rendement van de centrale opwekking en dergelijke, zijn buiten beschouwing gelaten. Worden zulke onzekerheden wel meegenomen, dan zijn de mogelijke spreidingen in de meerinvesteringsruimtes identiek aan de spreidingen in de energiekostenreducties, zoals getoond in Figuur 4.

De Stirling zal vooral worden toegepast in de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker, waar de meerinvesteringsruimte bij een terugverdientijd (SPOT) van 5 jaar ongeveer 1050 euro kan bedragen. Een kanttekening die hierbij moet worden gemaakt is dat verwacht wordt dat voor de Stirling geen meerkosten voor het onderhoud verwacht worden ten opzichte van HR-ketels, wat betekent dat bij een SPOT van 10 jaar de particulier niet toelegt op de exploitatie. In principe zou dit een verdubbeling van de meerinvesteringsruimte kunnen betekenen. De vraag is echter of particulieren bereid zijn een dergelijke uitgave in één keer te doen.

Kansrijke marktsegmenten voor brandstofcellen zijn rijwoningen, vrijstaande woningen en grote gezinnen. De meerinvesteringsruimte voor PEMFC systemen bedraagt hier ruim 1200 euro, en voor SOFC systemen 1250 euro. Appartementen vormen een extra marktsegment voor SOFC systemen, waar de meerinvestering ruim 1100 euro bedraagt.



Figuur 5 Meerinvesteringsruimtes van verschillende typen 1 kW_e μ-WK systemen in de beschouwde marktsegmenten, met mogelijke spreiding ten gevolge van interne onzekerheden.

1. INLEIDING

Dit rapport geeft beschouwingen over reducties op de energiekosten die kunnen worden behaald bij toepassing van micro warmtekrachtinstallaties in woningen en andere kleine gebouwen. Door deze besparingen op de jaarlijkse energierekening van een particulier te vergelijken met de meerinvestering in het μ -WK systeem kunnen uitspraken worden gedaan over de rentabiliteit van deze (meer-)investering.

Het rapport is een vervolg op een eerder studie naar energiebesparings- en emissiereductie potentiëlen voor μ -WK technologieën op basis van Stirling, gasmotoren en brandstofcellen (Laag, 2002).

1.1 Doel

Eén van de doelen van het ECN-cluster μ -WK is het bepalen van kostprijdoelen van componenten van micro-warmtekrachtssystemen. Daartoe is het nodig de meerinvesteringsruimtes van microwarmtekrachtinstallaties voor individuele toepassing in woningen te kennen. Wanneer deze meerinvesteringsruimte bekend is kan deze ruimte over de diverse componenten van het systeem worden verdeeld. De meerinvesteringsruimte hangt voor een groot deel af van de reductie van energiekosten ten opzichte van het meest voor de hand liggende alternatief: de HR-(combi)ketel, en van de geaccepteerde terugverdientijd. De laatste is op zijn beurt weer afhankelijk van de waardering van de consument voor energiebesparing, en bijvoorbeeld of de μ -WK installatie in staat is stroom te produceren in het geval van uitval van het elektriciteitsnet.

In dit rapport wordt de aandacht vooral gericht op het eerste aspect: de reductie van de energiekosten door toepassing van μ -WK. Ook wordt enige aandacht besteed aan de geaccepteerde terugverdientijd.

1.2 Werkwijze

Het onderzoek is begonnen met een analyse van de marginale kostprijs van elektriciteit uit μ -WK-installaties. Hiermee kan worden bepaald vanaf welke hoogte van de terugleververgoeding het voor de diverse typen μ -WK systemen interessant wordt terug te leveren.

Vervolgens is een model gebouwd waarmee de jaarlijkse energiekostenbesparing kan worden bepaald. De invoerparameters zijn voorzien van een kansdichtheidsverdeling, waarmee is nagegaan wat de invloed van de diverse invoerparameters is op de resulterende energiekostenbesparing. Vervolgens is de invloed van de parameters met de meeste invloed zichtbaar gemaakt in 3 dimensionale grafieken. Er is een zevental marktsegmenten gedefinieerd. Voor elk van deze marktsegmenten is onderzocht wat voor ieder type μ -WK systeem (Stirling, Gasmotor, PEMFC en SOFC) een goede keuze voor het elektrisch vermogen zou zijn. Voor alle marktsegmenten bleek 1 kW_e een redelijke tot goede keuze te zijn. Voor deze grootte is voor ieder marktsegment en voor ieder type μ -WK de verwachtingswaarden en de 90% betrouwbaarheidsintervallen van de energiekostenreductie bepaald. Een beschouwing over vereiste terugverdientijden heeft een voorlopige eis van 5 jaar opgeleverd. Met deze eis zijn tenslotte investeringsruimtes in de diverse marktsegmenten bepaald.

1.3 Afbakening

In dit rapport richt de beschouwing van de energiekostenreductie zich op particuliere exploitatie van de μ -WK installatie. Dat wil zeggen dat de μ -WK installatie “achter de meter” is geplaatst. De consument koopt gas en elektriciteit van het energiebedrijf, en verkoopt eventuele

overschotten aan elektriciteit terug. De consument is eigenaar van de μ -WK installatie, of huurt deze van de (woning- of installatie-)verhuurder.

Het andere exploitatiescenario is plaatsing “vóór de meter”: de μ -WK installatie is eigendom van een energiebedrijf, dat opstelruimte van de woningeigenaar huurt (middels korting op bijvoorbeeld vastrecht), en dat elektriciteit, warmte en eventueel kookgas aan de consument levert.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is de analyse van de marginale kosten en opbrengsten beschreven, alsmede schattingen van CO₂ reductie, en kosten van CO₂ reductie voor de overheid.

De onzekerheidsanalyse, met de visualisering van de invloed van de grootste onzekerheden op de energiekostenreductie, is beschreven in hoofdstuk 3.

In hoofdstuk 4 worden 7 marktsegmenten gedefinieerd. Ook is daar de analyse beschreven die leidt tot de voorlopig beste grootte van de verschillende typen μ -WK systemen in de verschillende marktsegmenten. In de derde paragraaf van dit hoofdstuk worden voor de verschillende marktsegmenten en typen de energiekostenreducties met hun onzekerheid geanalyseerd.

Tenslotte wordt in hoofdstuk 5 de analyse beschreven die leidt tot de verwachte meerinvesteringsruimtes van μ -WK systemen ten opzichte van HR-combiketels.

Ieder hoofdstuk wordt afgesloten met de voornaamste conclusies die uit het beschrevene kunnen worden getrokken. In hoofdstuk 6 volgt een synthese van de conclusies uit de voorgaande hoofdstukken, waarna het rapport wordt afgesloten met aanbevelingen voor vervolgonderzoek in hoofdstuk 7.

2. MARGINALE KOSTEN, OPBRENGSTEN EN CO₂-REDUCTIE

Rentabiliteit van microwarmtekracht hangt onder andere af van hoe de installatie wordt ingezet, dus van de regelstrategie. Wanneer de installatie is aangeschaft zal de inzet worden bepaald aan de hand van de marginale kosten en opbrengsten. Dit wil zeggen: wat is de kostprijs en de opbrengst van een extra opgewekte kilowattuur elektriciteit, afgezien van kapitaalslasten en onderhoudskosten. De μ -WK installatie zal met name bedreven worden wanneer de kostprijs van elektriciteit lager is dan de momentane elektriciteitsprijs. Daartoe wordt in dit hoofdstuk een marginale kosten en opbrengsten analyse uitgevoerd. Ook worden hiermee de kosten voor de overheid per vermeden ton CO₂ bepaald.

2.1 Marginale kosten van elektriciteit uit μ -WK

Onder de marginale kostprijs (MKP) van elektriciteit uit μ -WK wordt verstaan wat het kost om een extra kilowattuur elektriciteit te maken. De MKP wordt bepaald door de inkoopkosten van aardgas per opgewekte kilowattuur te verminderen met de vermeden kosten van opwekking van de met de elektriciteitsproductie opgewekte warmte. De per kWh_e benodigde hoeveelheid gas wordt bepaald door het elektrisch rendement van de μ -WK installatie. De in de HR-ketel uitgespaarde hoeveelheid gas wordt vervolgens bepaald door het thermisch rendement. Voor de bepaling van de marginale kosten wordt nog onderscheid gemaakt tussen de normale gasprijs (43,5 €/m³, incl. BTW) en een van REB vrijgestelde gasprijs voor μ -WK (28,7 €/m³, incl. BTW.) De MKP wordt berekend met de vergelijking:

$$MKP = KNG(\mu wk) - KNG(HR) = \frac{1}{\eta_{el}} \left(1 - \frac{\eta_{th}}{\eta_{HR}}\right) \cdot \frac{NGP}{LHV}$$

Hierin zijn:

$KNG(\mu WK)$	= gaskosten per kWh opgewekte elektriciteit
$KNG(HR)$	= gaskosten voor de HR-ketel bij dezelfde warmteproductie
η_{el}	= elektrisch rendement μ -WK systeem
η_{th}	= thermisch rendement μ -WK systeem
η_{HR}	= thermisch rendement referentie HR-ketel
NGP/LHV	= kostprijs aardgas per kWh LHV.

Tabel 2 Marginale kostprijs van een kWh elektriciteit uit μ -WK (incl. BTW).

		Stirling	Gasmotor	PEMFC	SOFC
Elektrisch rendement	[-]	10%	20%	30%	40%
Thermisch rendement ⁴	[-]	90%	75%	60%	45%
Thermisch rendement HR-ketel	[-]	100%			
Gas benodigd	m ³ /kWh	1,14	0,57	0,38	0,28
Gaskosten, met REB belast ⁵	€/kWh	49,4	24,7	16,5	12,4
Idem, REB-vrij gas voor μ -WK	€/kWh	32,7	16,3	10,9	8,2
Warmteopbrengst	kWh _{th} / kWh _e	9,0	3,8	2,0	1,1
Vermeden HR gasbehoefte	m ³ /kWh	1,0	0,4	0,2	0,1
Vermeden HR gaskosten	€/kWh	44,5	18,5	9,9	5,6
Netto marginale kostprijs elektriciteit	€/kWh	4,9	6,2	6,6	6,8
Idem, REBvrij gas voor μ -WK	€/kWh	-11,8	-2,2	1,0	2,6

⁴ Totaalrendement daalt met toenemend elektrisch rendement

⁵ is ook de elektriciteitsprijs bij dumpen van warmte

Uit Tabel 2 vallen een aantal zaken op:

1. De netto marginale kostprijs ligt bij alle rendementen ruim onder de inkoopprijs van elektriciteit van 16,6 €/kWh_e (inclusief REB en BTW). Produceren voor vermeden inkoop van elektriciteit levert dus de hoogste financiële besparing.
2. Bij een elektrisch rendement van 30% en hoger dalen de gaskosten per opgewekte eenheid elektriciteit beneden de aankoopprijs van elektriciteit. Hierdoor wordt het dumpen van warmte om elektriciteit inkoop te vermijden financieel interessant. Zolang het rendement van μ -WK lager is dan het rendement van het centralepark leidt dumpen van warmte tot energieontsparring.
3. De overheid verleent vrijstelling van REB op gas voor warmtekrachtinstallaties met een elektrisch rendement boven 30%, en meer dan 60 kW_e vermogen. Er wordt gepleit voor een zelfde REB vrijstelling voor micro warmtekracht, die ook voor lagere rendementen geldt. Maar dan wordt het “dumpen” van warmte interessant vanaf 20% elektrisch rendement. Verder werkt dit vooral in het voordeel van laag-E-rendement μ -WK, en het is een voor de overheid zeer dure CO₂ reductiemaatregel. Beter is de REB op gas te handhaven en bij teruglevering de REB op elektriciteit (gedeeltelijk) terug te geven. De marginale kostprijs is dan nog zodanig dat dumpen van warmte niet snel interessant is.
4. De netto marginale kostprijs stijgt bij toenemend elektrisch rendement, doordat het totaalrendement daalt, waardoor er meer aardgas nodig is voor dezelfde hoeveelheid warmte.
5. Wanneer de bewoner de stroom niet zelf kan benutten en de vergoeding voor teruggeleverde stroom lager is dan de netto marginale kostprijs zal het niet meer aantrekkelijk zijn om de benodigde warmte op te wekken met de μ -WK. De benodigde warmte wordt dan goedkoper met een HR-ketel opgewekt. De overheid kan een hogere marginale opbrengst bewerkstelligen met een “teruglopende REB-meter”, waardoor alleen het eindgebruik belast wordt. Zo wordt ook voorkomen dat men twee maal REB betaalt: een keer voor aardgas voor teruggeleverde stroom, en een keer voor het terugkopen van eerder teruggeleverde stroom.
6. Bij REB-vrij gas voor μ -WK wordt de marginale kostprijs negatief bij laag elektrisch rendement, wat wil zeggen dat men minder geld kwijt is door de warmte met de μ -WK op te wekken dan met de hulpbrander, ook al krijgt men geen geld voor de teruggeleverde elektriciteit. Ook is het verschil in kostprijs tussen laag en hoog elektrisch rendement groter dan bij aardgas met REB. Deze effecten worden veroorzaakt door de grotere hoeveelheid goedkoop aardgas, die bij laag elektrisch rendement nodig is per kWh. Men zou dit effect kunnen vermijden door per teruggeleverde kWh hooguit 0,38 m³ aardgas belastingvrij te leveren. Dit komt overeen met een e-rendement van 30%. Dit zou betekenen dat men per teruggeleverde kWh elektriciteit 5,6 €/kWh vergoedt, in plaats van 7,15 €/kWh bij terugdraaiende elektriciteits-REB-meter.

2.2 Marginale opbrengsten van elektriciteit uit μ -WK.

De opbrengsten van elektriciteit uit μ -WK uiten zich in eerste plaats in vermeden inkoopkosten. Deze bedragen momenteel 16,6 €/kWh, inclusief REB en BTW.

Wanneer de elektriciteit niet in het huis gebruikt kan worden wordt deze teruggeleverd. Hiervoor worden twee mogelijkheden beschouwd:

1. De consument ontvangt voor de elektriciteit de vermeden inkoopkosten van de energiedistributeur. Dit zal ongeveer gelijk zijn aan de gemiddelde APX prijs: 3,0 €/kWh ex BTW, is ongeveer 3,6 €/kWh incl. BTW.
2. De consument ontvangt naast de APX prijs de REB terug. De REB bedraagt 7,15 €/kWh.

Voor de gasprijs worden weer de twee scenario's van de vorige paragraaf gehanteerd, met en zonder REB op gas voor de μ -WK. In Tabel 3 is samengevat wat dit voor de marginale opbrengst van elektriciteit uit μ -WK betekent.

Tabel 3 Marginale opbrengst van elektriciteit uit μ -WK [€ct/kWh]

		Stirling	Gasmotor	PEMFC	SOFC
Opbrengst vermeden inkoop elektriciteit	€ct/kWh	11,7	10,4	10,0	9,8
Idem, REBvrij gas voor μ -WK	€ct/kWh	28,4	18,8	15,6	14,0
Opbrengst bij terugleveren (zonder REB teruggave)	€ct/kWh	-1,4	-2,6	-3,0	-3,2
Idem, REBvrij gas voor μ -WK	€ct/kWh	15,4	5,8	2,6	1,0
Opbrengst bij terugleveren (met REB terug gave)	€ct/kWh	5,8	4,5	4,1	3,9
Idem, REBvrij gas voor μ -WK		nvt			

Opvallende zaken zijn:

1. De hoogste opbrengst wordt gegenereerd door het vermijden van inkoop. Hiermee moet de meerinvesteringsruimte voor μ -WK worden gegenereerd.
2. Het hogere totaalrendement zorgt er voor dat de Stirling de hoogste marginale opbrengst heeft. Dit is extreem in het geval van REBvrij gas voor μ -WK. Dit komt doordat er per kWh veel gas wordt geleverd dat bijdraagt aan de warmteopbrengst, waardoor er geen belast gas voor de hulpketel hoeft te worden gekocht.
3. Geen REB vrijstelling voor gas en geen teruggave van REB over teruggeleverde elektriciteit (wat in feite inhoudt dat er 2 maal REB wordt betaald) zorgt voor een negatieve marginale opbrengst. Dit betekent dat het bij ontbreken van elektriciteitsvraag goedkoper is om de gevraagde warmte met de hulpketel te leveren dan de μ -WK te gebruiken.
4. REB-vrij gas zonder REB teruggave over teruggeleverde elektriciteit levert positieve marginale opbrengsten. Voor de Stirling is het voordeel het hoogst, voor de SOFC levert het bijna niets op.
5. Een voor alle systemen redelijke marginale opbrengst van tenminste 7 €ct/kWh bij teruglevering wordt bereikt door het gas met REB te belasten, en REB op elektriciteit terug te geven bij teruglevering in het net. Het zal maximale inzet van een aanwezige μ -WK bewerkstelligen, maar waarschijnlijk niet uitnodigen tot overdimensionering van het μ -WK systeem.

REB-vrij gas en teruggave van REB op elektriciteit bij terugleveren is dubbel op en zal uiteraard niet plaatsvinden.

Er bestaat een mogelijkheid dat deze opbrengsten in de toekomst onder druk komen te staan. Dit kan het geval zijn als μ -WK op grote schaal doordringt. Dan zal de hoeveelheid elektriciteit die met name door de hoogspanningsnetten gaat sterk verminderen. De netbeheerders zullen dan de inkomsten uit de transportcomponent van de kWh-prijs missen, en deze inkomstenderving willen compenseren door het vastrecht te verhogen.

2.3 REB-dervingskosten van vermeden CO₂ uitstoot

Door het verlenen van REB vrijstelling voor gas voor μ -WK, of door het teruggeven van REB voor teruggeleverde elektriciteit, derft de overheid belastinginkomsten. De inkomstenderving per vermeden ton CO₂ kan worden berekend door de betaalde REB per opgewekte kilowattuur uit μ -WK af te trekken van de REB die betaald moet worden bij gescheiden opwekking.

De vermeden CO₂ uitstoot wordt berekend door de CO₂ uitstoot van de μ -WK af te trekken van de CO₂ uitstoot van gescheiden opwekking van dezelfde hoeveelheid elektriciteit en warmte.

De resultaten van deze berekeningen voor de verschillende manieren van REB verrekening wordt in de volgende tabel samengevat. Hierbij is uitgegaan van een uitstoot van 0,615 kg CO₂/kWh uit centrale elektriciteitsopwekking, en 56 kg CO₂/GJ_{LHV} uit aardgas.

Tabel 4 Kosten per vermeden ton CO₂ voor de overheid

		Stirling	Gasmotor	PEMFC	SOFC
Vermeden CO ₂	kg/kWh	0,41	0,36	0,35	0,34
REB gescheiden opwekking	€ct/kWh	22,3	13,4	10,5	9,0
REB WKK	€ct/kWh	16,8	8,4	5,6	4,2
Idem, REBvrij gas voor μ-WK	€ct/kWh	0,0	0,0	0,0	0,0
REB bij teruglevering	€ct/kWh	9,6	1,2	-1,6	-3,0
REB derving vermeden inkoop	€ct/kWh	5,5	5,1	4,9	4,8
Idem, REBvrij gas voor μ-WK	€ct/kWh	22,3	13,4	10,5	9,0
Idem, REB teruggave bij teruglevering	€ct/kWh	12,6	12,2	12,1	12,0
REB derving per vermeden ton CO ₂	€/ton	133	140	142	144
Idem, REBvrij gas voor μ-WK	€/ton	539	371	304	268
Idem, REB teruggave bij teruglevering	€/ton	306	337	349	356

De REB derving bij toepassing van μ-WK kan worden vergeleken met de REB derving die de overheid heeft door de REB vrijstelling van duurzame energie, die 116 €/ton CO₂ bedraagt.

De volgende dingen vallen op:

1. De grootste CO₂ reductie per opgewekte kWh wordt behaald met Stirling. Dit komt doordat Stirling het hoogste totaalrendement heeft. Van Stirling is echter bekend dat afzet van warmte de beperkende factor is, zodat het niet zeker is dat met Stirling de hoogste absolute CO₂ reductie [ton/y] wordt behaald.
2. Bij vermeden inkoop van elektriciteit mist de overheid de REB op elektriciteit. Daarentegen ontvangt de overheid meer REB op aardgas. Het dervingssaldo bedraagt 5,5 €ct/kWh voor Stirling tot 4,8 €ct/kWh voor SOFC. Het leidt tot REB derving van 133 €/ton voor Stirling tot 144 €/ton voor SOFC. Voor de overheid is dit duurder dan CO₂-reductie met duurzame energie.
3. De duurste optie voor de overheid is het verlenen van REB vrijstelling op aardgas voor μ-WK, met name in het geval van Stirling. Dit komt door de relatief grote hoeveelheid gas die Stirling verbruikt per kWh elektriciteit, die afgaat van de (met REB belaste) hoeveelheid gas die de hulpketel gebruikt. Dit probleem kan eventueel worden omzeild door de REB vrijstelling op aardgas te beperken tot 0,38 m³ per teruggeleverde kWh. Dan is het gas voor vermeden inkoop wel belast, en is de REB derving op elektriciteit beperkt tot 5,6 €ct/kWh.
4. REB teruggave bij teruglevering kost de overheid 7,15 €ct/kWh, wat neerkomt op 306 €/ton voor Stirling tot 356 €/ton voor SOFC. Dit is ruim 2½ tot 3 maal zo duur als REB vrijstelling voor duurzame energie.

2.4 Conclusies

Uit de voorgaande paragrafen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. De grootste financiële besparing voor de bewoner wordt behaald met het vermijden van inkoop van elektriciteit door het zo veel mogelijk direct benutten van de elektriciteit afkomstig van de μ-WK.
2. Als de terugleververgoeding (waarde voor het energiebedrijf plus REB teruggave) lager is dan de marginale kostprijs zal de consument bij afwezigheid van elektriciteitsvraag de voorkeur geven aan warmteopwekking met de hulpketel. Dit is echter uit energiebesparingsoogpunt ongewenst.
3. Bij een elektrisch rendement boven 30% is de marginale kostprijs van elektriciteit lager dan de inkoopprijs. Dan wordt het financieel interessant om ook als er geen warmtevraag is elektriciteit te produceren voor eigen gebruik (vermeden inkoop), terwijl de warmte wordt geloosd. Zo lang het elektrisch rendement lager is dan dat van de centrale elektriciteitsopwekking is dit uit energiebesparingsoogpunt ongewenst, maar er valt weinig aan te doen.
4. De overheid doet er goed aan geen REB vrijstelling te verlenen op gas voor microwarmtekracht in particulier beheer, omdat het “dumpen” van warmte in de hand werkt, vooral in het voordeel van laag-E-rendement μ-WK werkt, en het een zeer dure CO₂

reductiemaatregel is. Beter is de REB op gas te handhaven en bij teruglevering de REB op elektriciteit (gedeeltelijk) terug te geven. De marginale kostprijs is dan nog zodanig dat dumpen van warmte niet interessant is.

5. Gezien het voorgaande is de aanbevolen bedrijfsstrategie:

- Elektriciteitsvraagvolgend, om maximale vermeden inkoop te genereren.
- Tot en met een elektrisch rendement van 30% warmtevraaggelimiteerd: elektriciteit inkopen als er geen warmtevraag is.
- Als er geen elektriciteitsvraag is wordt de warmtevraag ingevuld met de hulpketel wanneer de terugleververgoeding lager is dan de marginale kostprijs van elektriciteit uit de μ -WK
- Als de terugleververgoeding wel hoger is dan de marginale kostprijs wordt de warmtevraag met de μ -WK ingevuld. Wel zal er worden getracht de warmtelevering te verschuiven naar momenten met eigen elektriciteitsvraag.

3. GEVOELIGHEIDSANALYSE

De meerprijs die een consument bereid is te betalen voor een μ -WK installatie is onder andere afhankelijk van de jaarlijkse kostenbesparing die met zo'n installatie kan worden behaald. De kostenbesparing hangt van zeer vele factoren af, die alle op hun beurt een mate van onzekerheid of variabiliteit kennen. In dit hoofdstuk wordt een analyse uitgevoerd van de gevoeligheid van de jaarlijkse kostenbesparing afhankelijk van de onzekerheden in de relevante parameters. De belangrijkste effecten worden in diagrammen getoond.

3.1 Meest invloedrijke factoren

De factoren die de meeste invloed hebben op de jaarlijkse kostenbesparing door μ -WK kunnen worden gevonden met een onzekerheidsanalyse door middel van @Risk. In deze methode wordt de onzekerheid van de uitkomsten bepaald door een model een groot aantal malen door te rekenen met invoer die random varieert volgens opgegeven kansdichtheidsverdelingen.

De invoerparameters van het voor dit onderzoek ontwikkelde model met hun kansdichtheidsverdelingen zijn betrokken op een gemiddeld Nederlands huishouden voorzien van een 1 kW_e PEMFC systeem met tapwaterbuffer, en in Tabel 5 samengevat.

Tabel 5 Invoerparameters met hun kansdichtheidsverdelingen (PEMFC)

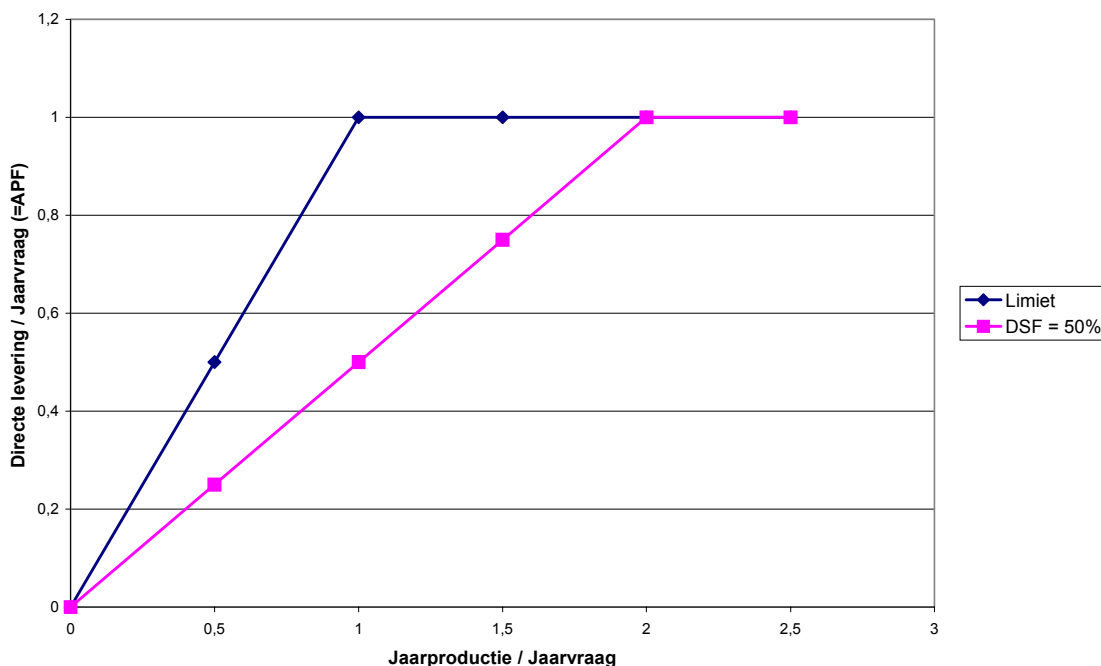
Invoer parameters	minimum	most likely	maximum	gemiddeld	eenheid	Distributie
Elektrisch vermogen μ -WK	0,4	1,0	1,6	1,0	kWe	Pert
Elektrisch rendement μ -WK	27%	30%	33%	30%		Pert
Totaalrendement μ -WK	85%	90%	95%	90%		Pert
Hulpketelrendement	95%	100%	105%	100%		Pert
Parkrendement centrale E-productie	42%	47%	52%	47%		Pert
Elektriciteitsvraag	1500	3300	4500	3200	kWh/yr	Pert
Gasvraag	1000	1600	4000	1900	m ³ /yr	Pert
Minimum aandeel hulpbrander	2%	5%	15%	6,2%		Pert
Onderwaarde van aardgas				31,65	MJ/m ³	
Max.gevraagd verwarmingsvermogen	4	6	10	6,3	kWth	Pert
Direct Supply Factor	50%	70%	100%	72%		Pert
Aankoopprijs elektriciteit ⁶				16,60	€ct/kWh	
REB op elektriciteit				7,15	€ct/kWh	
Terugleververgoeding	4,0	6,0	16,6	7,4	€ct/kWh	Pert
Netto gas aankoopprijs ⁶				43,47	€ct/m ³	
REB op gas				14,76	€ct/m ³	

Vele factoren in deze tabel spreken voor zich. Enkele die toelichting behoeven zijn:

- Direct supply factor. Deze is gedefinieerd als dat deel van de elektriciteitsproductie van de μ -WK dat direct aan het huishouden wordt geleverd. De betekenis van de DSF wordt visueel weergegeven in Figuur 6. In deze figuur is de hoeveelheid direct aan het huishouden geleverde elektriciteit afgezet tegen de geproduceerde hoeveelheid. Ter normering zijn hier de hoeveelheden gedeeld door de jaarlijkse vraag. Zodoende wordt verticaal het deel van de jaarvraag weergegeven dat direct wordt geleverd, en niet hoeft te worden ingekocht. Dit deel hebben we de vermeden inkoop factor genoemd, of APF, avoided purchase factor. De limiet geeft aan dat er natuurlijk nooit meer direct kan worden geleverd dan de μ -WK heeft

⁶ Inclusief REB

geproduceerd, en ook niet meer dan er jaarlijks wordt gevraagd. Een DSF van 50% geeft aan dat de helft van de geproduceerde elektriciteit direct wordt geleverd, tot een maximum gelijk aan de jaarlijkse vraag.



Figuur 6 Samenhang tussen elektriciteitsproductie van een μ -WK installatie en directe levering aan het huishouden.

- Terugleververgoeding. Hiervoor worden 3 scenario's doorgerekend, omdat er nog erg veel onduidelijkheid is over hoe energiebedrijven hiermee om zullen gaan. Deze zijn:
 1. Ongelimiteerd terugleveren tegen een lagere prijs dan inkoop. Hiervoor is het gemiddelde van 7,4 €/kWh uit Tabel 5 genomen.
 2. De kWh meter draait terug tot maximaal 0, wat géén netto elektriciteit export op jaarbasis betekent. Dit was in september 2002 het plan van Remu.
 3. Terugleveren is niet mogelijk.

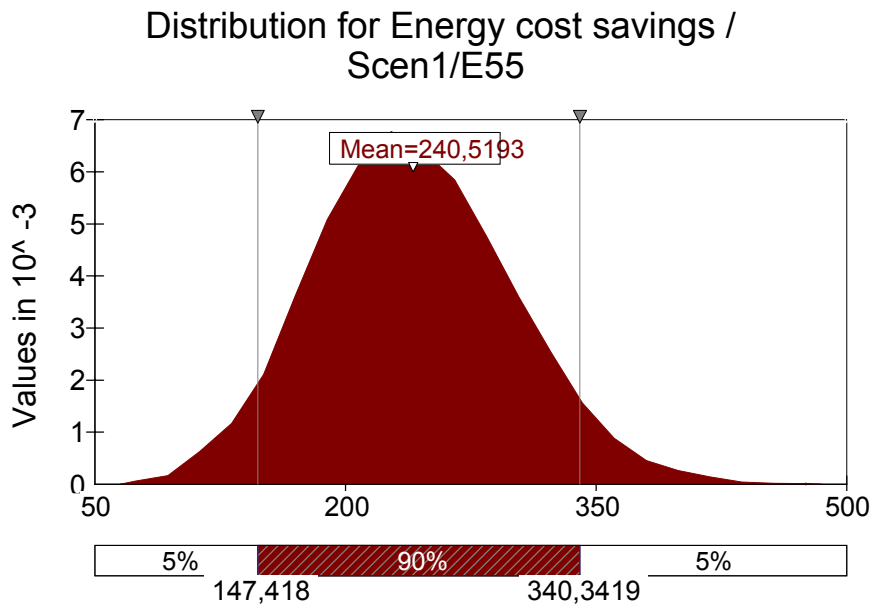
Met @Risk is het model met bovengenoemde terugleverscenario's doorgerekend met vele verschillende random invoerwaarden, die alle aan bovengenoemde kansverdelingsfuncties voldoen. Het resultaat van al deze berekeningen zijn de verwachtingswaarde over de energiekostenreductie, de kansverdeling daarvan, en de mate waarin de uitkomst (de jaarlijkse energiekostenreductie) wordt beïnvloed door variatie van de verschillende invoergegevens.

Tabel 6 Energiekostenreducties door een PEMFC μ -WK systeem in een gemiddeld huishouden, bij verschillende terugleverscenario's [€/jr] (MKP = 6,6 €/kWh).

Scenario	5%	Gemiddelde	95%
1 ongelimiteerd terugleveren tegen 7,4 €/kWh	147	241	340
2 tot maximaal 0 terugdraaiende meter	215	305	392
3 geen teruglevering.	160	230	309

Opvallend is dat er weinig verschil is tussen scenario's 1 en 3. Dit komt doordat er bij de gekozen grootte (1 kWe) in het gekozen marktsegment (een "gemiddelde" woning) niet veel hoeft te worden teruggeleverd, en er bij de gekozen terugleververgoeding (7,4 €/kWh) een klein verschil bestaat met de marginale kostprijs (gaskosten) van de geproduceerde elektriciteit (6,6 €/kWh). Dit laatste is in het vorige hoofdstuk 2 geïllustreerd.

De spreidingen in de hierboven weergegeven resultaten worden geïllustreerd aan de hand van de uitkomsten van scenario 1, in Figuur 7.

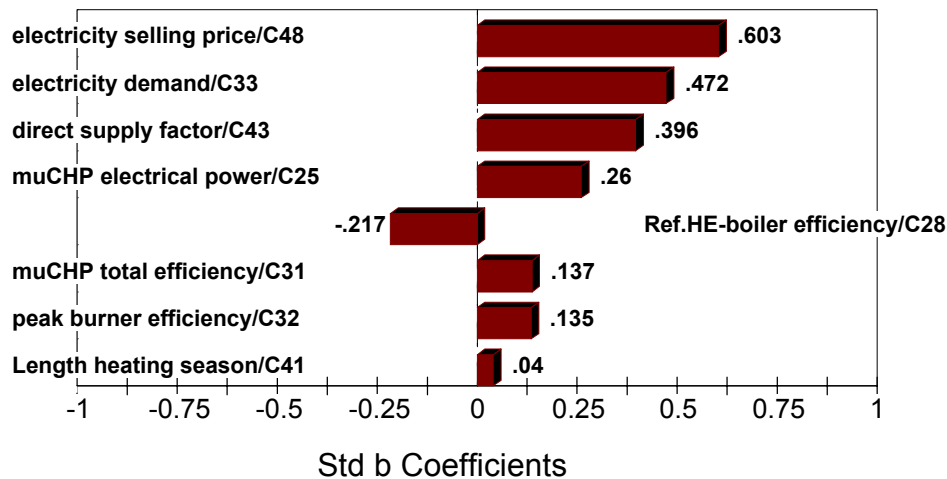


Figuur 7 Verdelingsdichtheid van de energiekostenreductie van een μ -WK systeem met een verwacht elektrisch rendement van 30% LHV.

Dit lijkt op een normale verdeling, het 90% waarschijnlijkheidsinterval strekt zich ongeveer 30% uit rond de gemiddelde waarde.

De factoren met de meeste invloed worden zichtbaar in een tornadodiagram, Figuur 8.

Regression Sensitivity for Energy cost savings / Scen1/E55



Figuur 8 Invloed van verschillende grootheden op de jaarlijkse energiekostenreductie van μ -WK bij ongelimiteerde teruglevering.

Van de onafhankelijke (invoer-)factoren hebben de terugleververgoeding, het aandeel directe levering (verder DSF genoemd, direct supply factor), het elektrisch vermogen en het totaalrendement van de μ -WK de grootste invloeden op de variatie in de jaarlijks te besparen energiekosten. Via de lengte van het stookseizoen speelt het maximaal gevraagde vermogen

voor ruimteverwarming ook een rol van betekenis. In de volgende paragraaf wordt getoond hoe verschillende factoren met elkaar de energiekosten beïnvloeden.

3.2 Energiekostenreducties en hun invloedsfactoren

In deze paragraaf worden de invloeden van de belangrijkste factoren op de energiekostenreducties getoond. In grafiekvorm kunnen slechts twee invloedsfactoren tegelijk worden gevarieerd. De overige parameters in het model worden gelijk gesteld aan de gemiddelde waarden van Tabel 5. Echter, wanneer het vermogen van de μ -WK, de warmtevraag en/of de elektriciteitsvraag veranderen zal ook de direct-supply factor (DSF) veranderen. Hiermee is in het model rekening gehouden.

3.2.1 Terugleververgoeding en direct supply factor.

Uit het tornadodiagram Figuur 8 blijkt dat de terugleververgoeding en de DSF de belangrijkste invloedsfactoren zijn. De DSF is van belang omdat direct aan het huishouden geleverde elektriciteit de hoogste waarde heeft, namelijk die van vermeden inkoop. Figuur 9 geeft de invloed van deze factoren weer op de energiekostenreductie.

Als uiterste geval voor de DSF zijn 0% en 100% genomen. In theorie zijn beide gevallen mogelijk, in de praktijk zal de DSF zich ergens in het midden bevinden. Daarom zijn 25%, 50% en 75% toegevoegd. Een waarde tussen 50% en 75% wordt vooralsnog als meest waarschijnlijk aangenomen.

Als minimumwaarde voor de terugleververgoeding is het geval genomen dat men voor teruggeleverde elektriciteit niets vergoed krijgt. Als maximumwaarde is het theoretische geval van de teruglopende meter genomen. De tussenliggende waarden zijn:

- 4 €/kWh is een gemiddelde APX prijs
- 7,15 €/kWh is de terugleververgoeding wanneer men uitsluitend de REB terug krijgt bij teruglevering
- 11,15 €/kWh is APX prijs plus REB teruggave

De resultaten van berekening van de energiekostenreductie voor de genoemde waarden voor DSF en terugleververgoeding zijn weergegeven in Figuur 9.

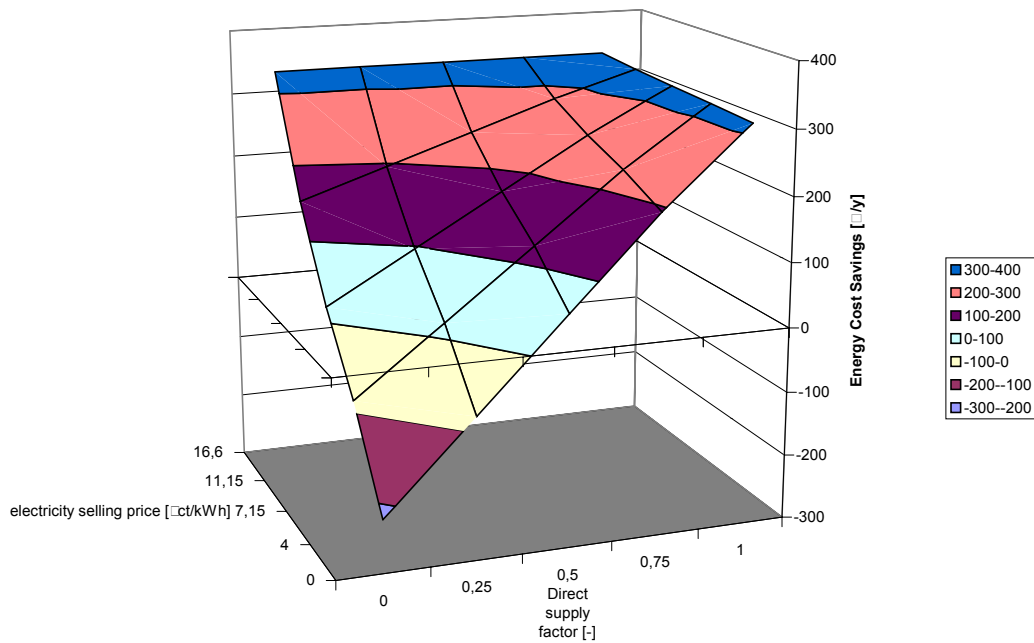
Wanneer de terugleververgoeding gelijk is aan de inkoopprijs van elektriciteit, in dit voorbeeld 16,6 €/kWh, doet het aandeel directe levering er niet toe. Bij 100% directe levering heeft de terugleververgoeding alleen betrekking op wat er naast het eigen verbruik extra wordt geproduceerd, en is er dus een kleine afhankelijkheid. Naar verwachting zal echter de terugleververgoeding lager dan 10 €/kWh zijn, en de directe levering van een 1 kW_e systeem hooguit 70%. Bij afnemende terugleververgoeding en DSF daalt de energiekostenreductie sterk.

Verder is te zien dat bij lage terugleververgoeding de energiekostenreductie zelfs negatief kan worden. In deze gevallen wordt de μ WK dan ook uitgeschakeld als er geen eigen vraag naar elektriciteit is, en wordt de gevraagde warmte geleverd met de hulpketel.

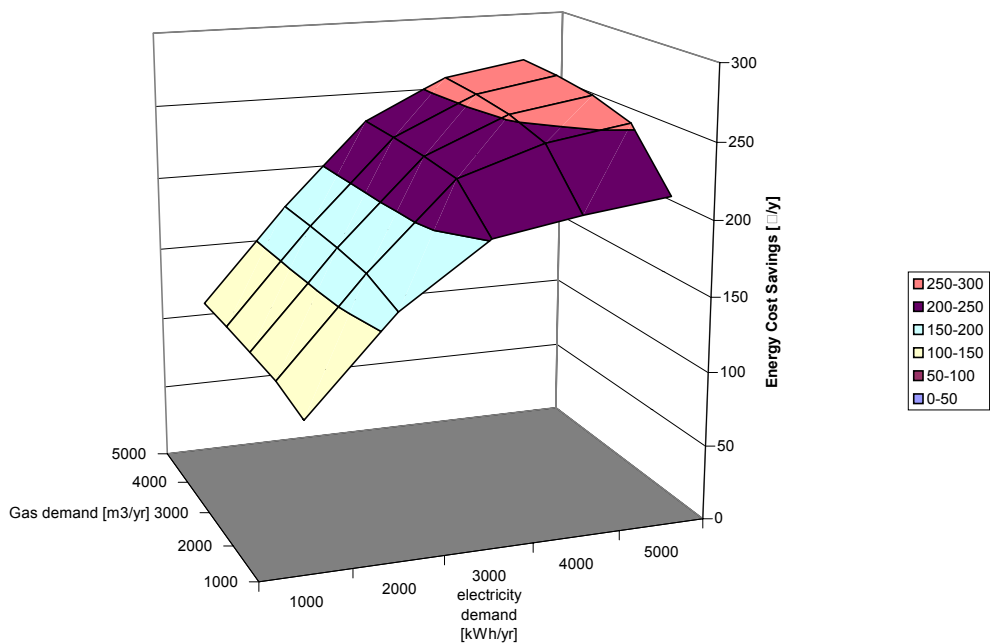
3.2.2 Afhangelijkheid van elektriciteits- en warmtevragen.

In Figuur 10 is de energiekostenreductie van een 1 kW_e PEMFC systeem weergegeven in verschillende mogelijke marktsegmenten. Deze marktsegmenten worden gekarakteriseerd door hun jaarlijkse gas- en elektriciteitsvragen.

Er is te zien dat de kostenreductie stijgt met toenemend elektriciteitsverbruik, terwijl de kostenreductie weinig afhangt van het gasverbruik. Boven 3000 kWh/y neemt de kostenreductie van een 1 kW_e PEMFC systeem veel minder snel toe dan bij lagere elektriciteitsvraag. Dan is blijkbaar de capaciteit van het μ -WK systeem reeds benut, en moet het meerdere elektriciteitsverbruik worden ingekocht.



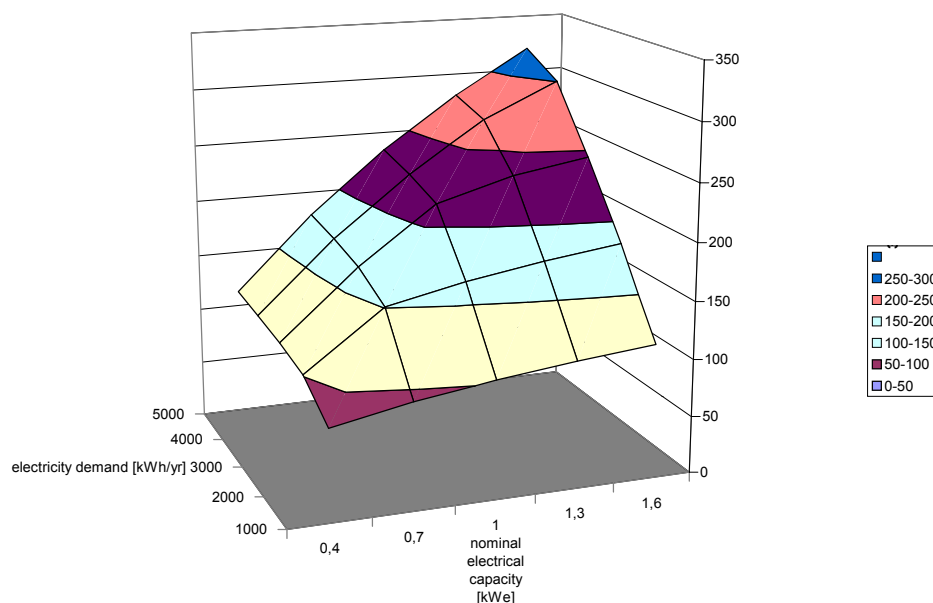
Figuur 9 Energiekostenreductie van een 1 kW_e PEMFC μ -WK systeem in een gemiddelde woning, afhankelijk van terugleververgoeding en directe levering [€/jr].



Figuur 10 Energiekostenreductie van een 1 kW_e PEMFC μ -WK systeem in verschillende marktsegmenten [€/jr].

3.2.3 Vermogen en elektriciteitsvraag.

Omdat in Figuur 10 de gasvraag niet zo van belang bleek (wat ook in het tornadodiagram Figuur 8 zichtbaar is), is in Figuur 11 de energiekostenreductie weergegeven als functie van het elektrisch vermogen van het μ -WK-systeem en de jaarlijkse elektriciteitsvraag.



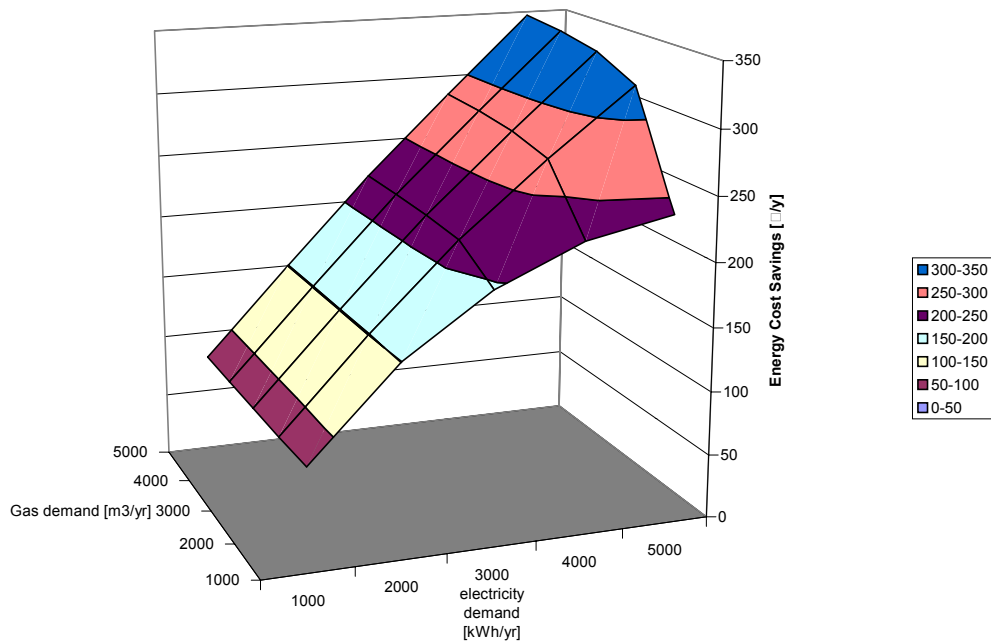
Figuur 11 Energiekostenreductie van een PEMFC μ -WK systeem afhankelijk van elektriciteitsvraag en elektrisch vermogen [€/jr].

Te zien is dat voor 2000, 3000 en 4000 kWh/y de lijn een knikpunt vertoont. Boven een bepaald vermogen neemt de kostenreductie minder snel toe. Dit is het punt waar de jaarlijkse elektriciteitsproductie van de μ -WK de jaarlijkse vraag overschrijdt. Ook is te zien dat de knikpunten naar hogere μ -WK vermogens verschuiven wanneer de jaarlijkse vraag toeneemt. Het lijkt dus verstandig het vermogen te kiezen aan de hand van het te verwachten jaarverbruik elektriciteit, en daarbij de knikpunten in de grafiek te volgen. Voor het gemiddelde huishouden (rond 3000 kWh/y) lijkt daarom een PEMFC systeem met een elektrisch vermogen van 1 kW_e een goede keuze.

3.2.4 Marktsegmenten met variërend vermogen van de μ -WK eenheid.

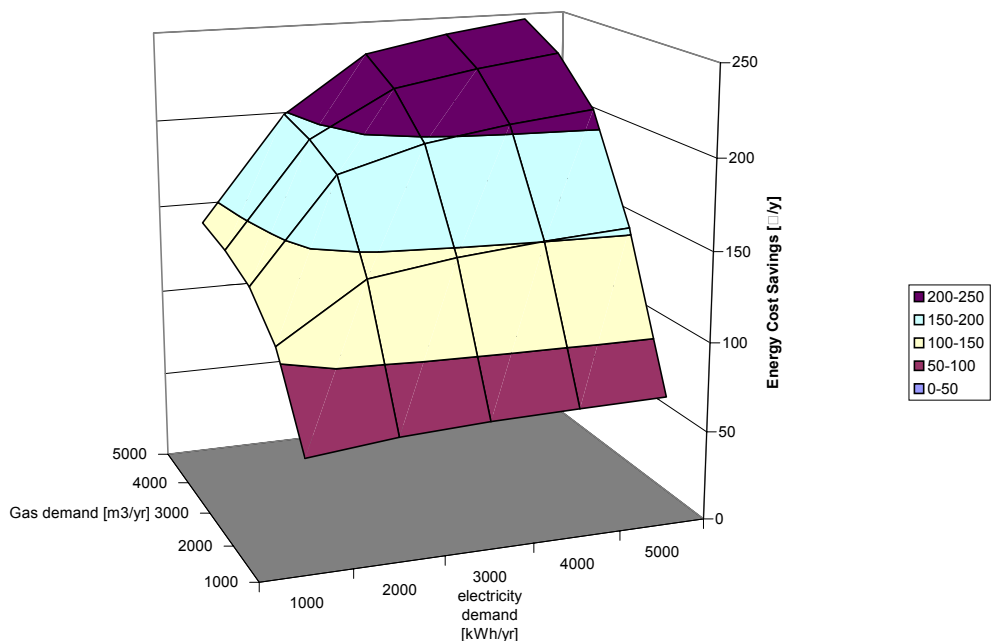
In de volgende figuur zijn de energiekostenreducties van PEMFC μ -WK systemen in de verschillende marktsegmenten weergegeven, terwijl bij toenemende elektriciteitsvraag het vermogen van de μ -WK wordt verhoogd.

Te zien is dat alleen voor lage gasvraag de warmteafzet limiterend werkt op de energiekostenreductie. Voor grotere gasvragen neemt de reductie vrijwel lineair toe met de elektriciteitsvraag.



Figuur 12 Energiekostenreductie van een PEMFC μ -WK systeem waarvan het vermogen toeneemt met de elektriciteitsvraag in verschillende marktsegmenten [€/jr].

3.2.5 1 kW_e Stirling

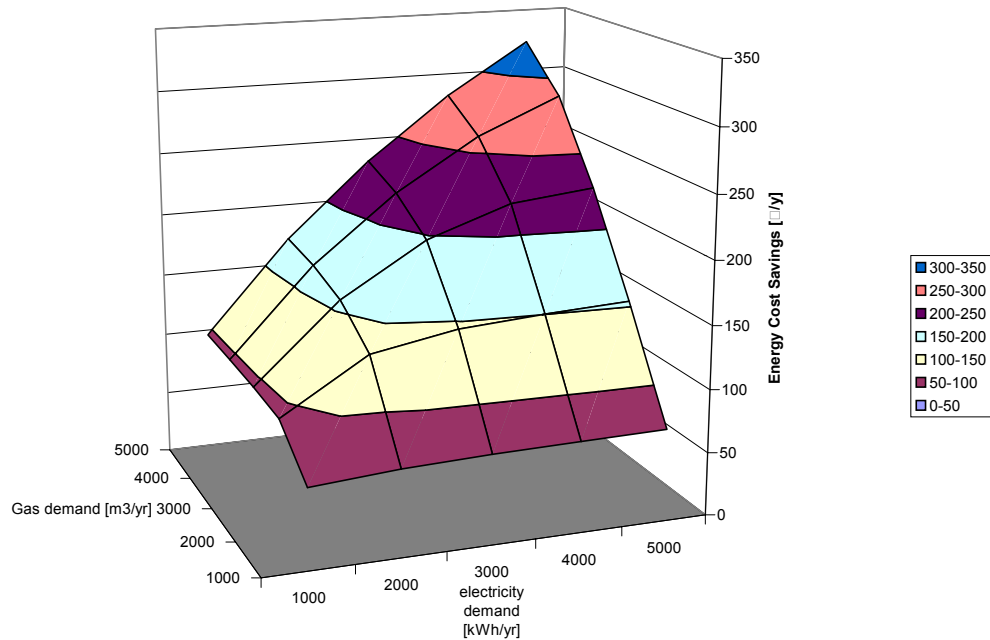


Figuur 13 Energiekostenreductie van een 1 kW_e Stirling μ -WK systeem in verschillende marktsegmenten [€/jr].

De Stirling is duidelijk warmtevraag gelimiteerd, wat blijkt uit de toenemende energiekostenreductie bij toenemende gasvraag, wat sterk verschilt met de PEMFC. Een Stirling moet dan ook bij voorkeur worden toegepast bij een gasvraag hoger dan 3000 m³/j.

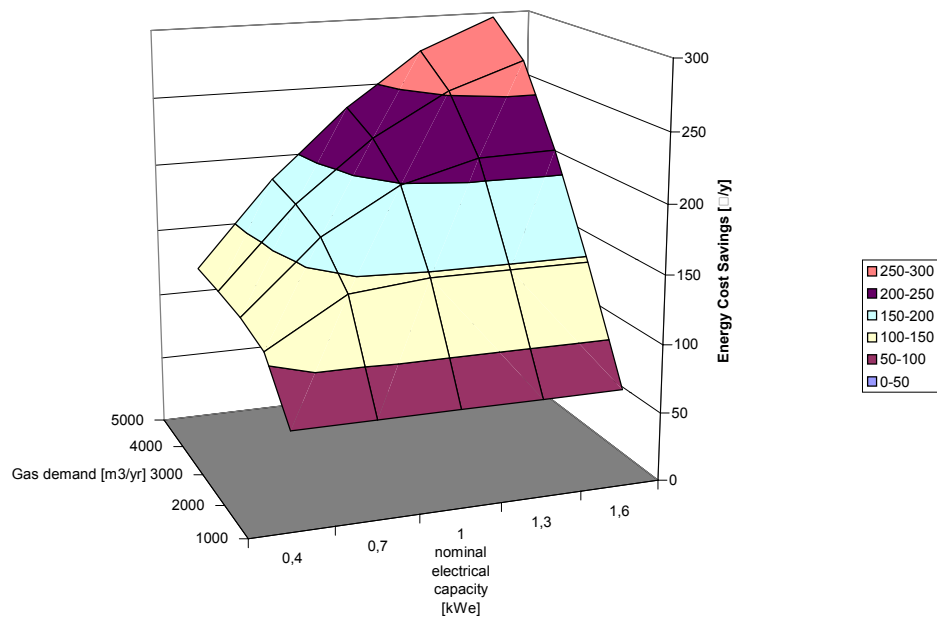
Bij hogere elektriciteitsvraag is de Stirling minder goed in staat een groot deel van de vraag te leveren, wat zich uit in een afvlakkende toename van de kostenreductie bij toegenomen elektriciteitsvraag. Een toenemende DSF zorgt voor een kleine toename van de kostenreductie.

Wanneer het vermogen van de Stirling toeneemt met de elektriciteitsvraag ontstaat het volgende beeld.



Figuur 14 Energiekostenreductie van een Stirling μ -WK systeem waarbij het vermogen toeneemt met de elektriciteitsvraag van 0,4 kW_e tot 1,6 kW_e [€/jr].

Het elektrisch vermogen neemt toe van 0,4 kW_e bij 1000 kWh/y tot 1,6 kW_e bij 5000 kWh/y. Het volgende figuur geldt voor 3200 kWh/y. Te zien is dat bij een hoge gasvraag de elektriciteitsvraag er niet te veel toe doet, al moet deze niet te laag zijn.

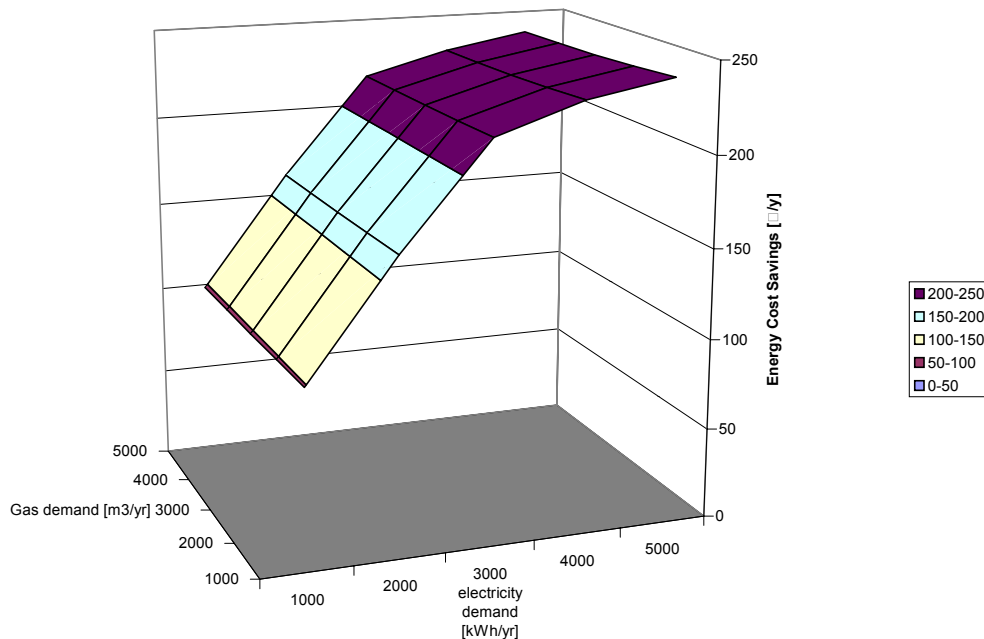


Figuur 15 Energiekostenreductie door toepassing van een Stirling μ -WK systeem bij een elektriciteitsvraag van 3200 kWh/y in €/jr.

Bij een gasvraag van 3000 m³/j neemt boven 1,3 kW_e de energiekostenreductie nauwelijks meer toe, terwijl bij 5000 m³/j de toename boven 1,3 kW_e afvlakt. Dit wijst er op dat een elektrisch vermogen van een Stirling μ-WK systeem van 1 kW_e over een groot bereik vanaf 3000 kWh/y en 3000 m³/j een goede keuze is. Bij 3000 kWh/y en 3000 m³/j bedraagt de energiekostenreductie ongeveer 200 €/j, wat slechts een fractie lager is dan de energiekostenreductie van PEMFC in dat marktsegment.

3.2.6 SOFC μ-WK systemen

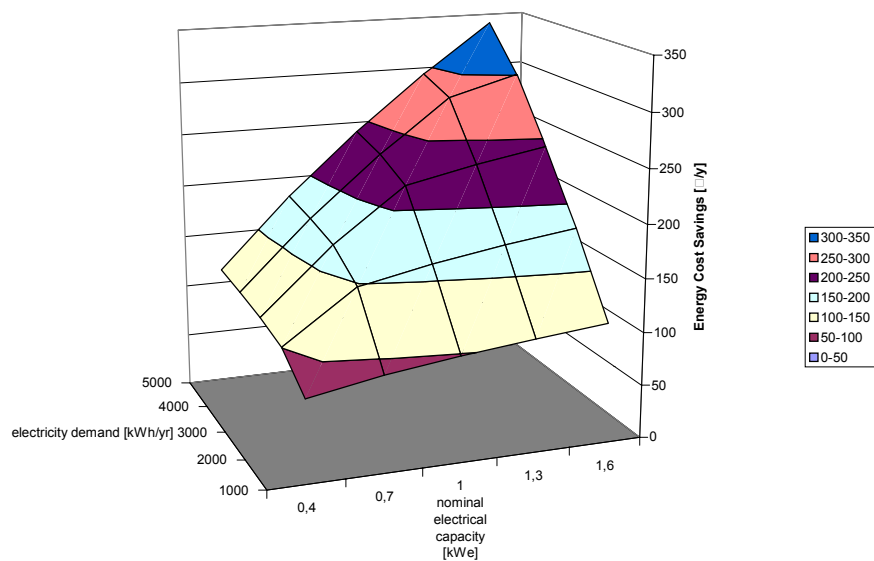
De energiekostenreducties van SOFC μ-WK systemen blijken nauwelijks gevoelig te zijn voor de hoogte van de warmtevraag, maar vrijwel alleen voor de elektriciteitsvraag. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 16.



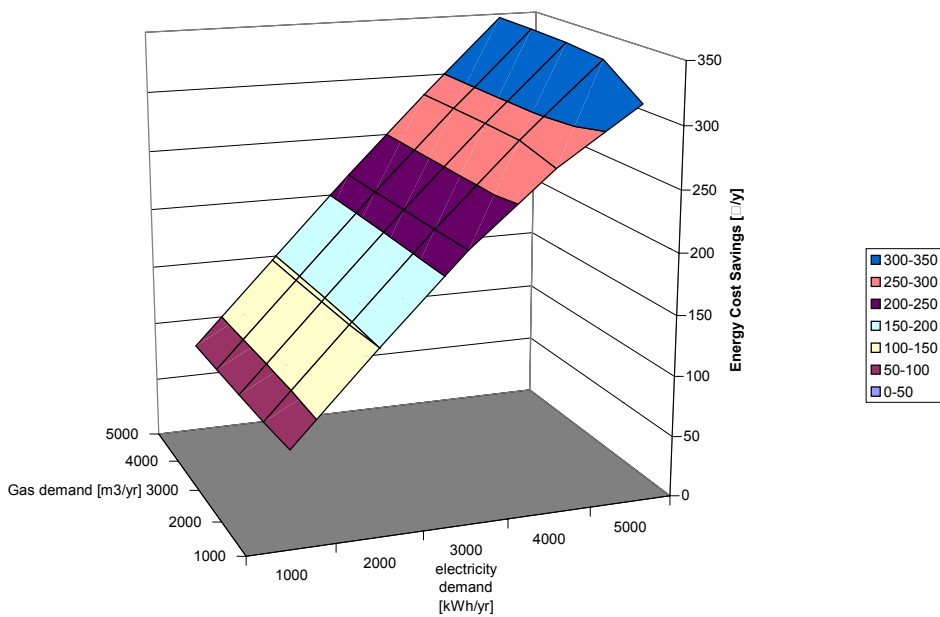
Figuur 16 Energiekostenreductie van een 1 kW_e SOFC μ-WK systeem in verschillende marktsegmenten [€/jr].

Uit Figuur 17 valt af te lezen dat ook bij SOFC μ-WK systemen het elektrisch vermogen het best afhankelijk kan worden gemaakt van de jaarlijkse elektriciteitsvraag. Wanneer bij een bepaalde vraag het vermogen wordt vergroot zal de DSF afnemen, waardoor de toename van de kostenreductie afvlakt. Het optimum lijkt weer de diagonaal te volgen van Figuur 17. In Figuur 18 is weergegeven hoe dan de figuur voor de verschillende marktsegmenten wordt.

Te zien is in Figuur 18 dat de energiekostenreductie van de SOFC nog minder afhankelijk is van de gasvraag dan die van de PEMFC. Alleen bij hoge vermogens en lage warmtevraag is er enige afname van de stijging te constateren.



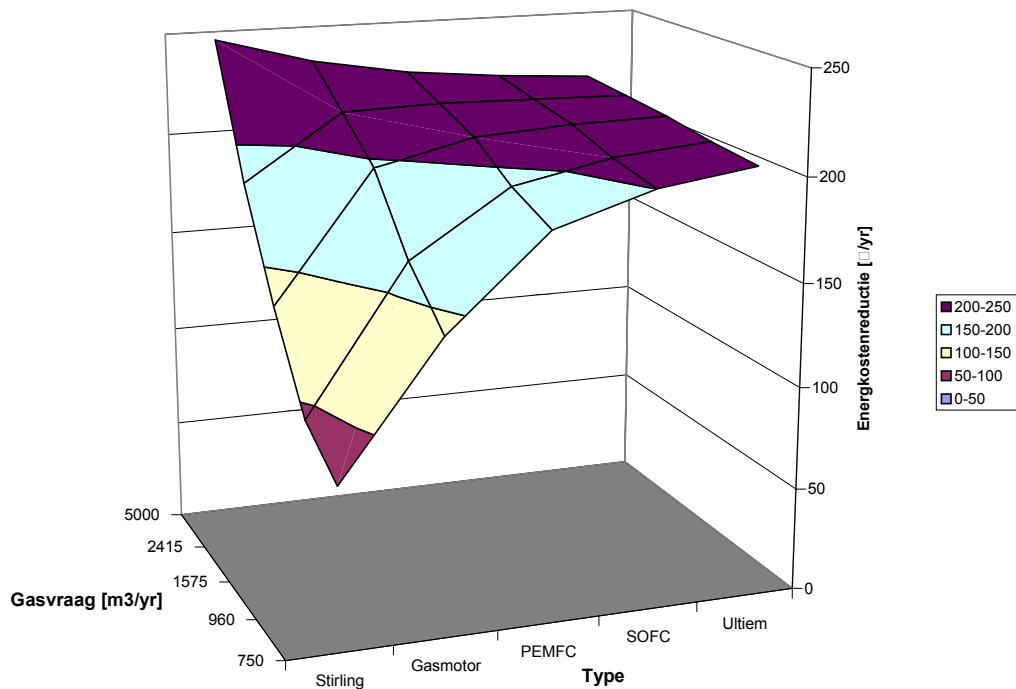
Figuur 17 Energiekostenreductie bij verschillende elektrische vermogens en elektriciteitsvragen [€/jr], en een gasvraag 1900 m³/jr.



Figuur 18 Energiekostenreductie bij toepassing van SOFC μ -WK systemen met aangepast vermogen in verschillende marktsegmenten [€/jr].

3.3 Vergelijking van verschillende technologieën.

In deze paragraaf zijn de verschillende in de voorgaande paragraaf besproken technologieën met elkaar vergeleken. De gevoeligheid van de verschillende typen voor de hoogte van de warmtevraag is weergegeven in Figuur 19. Hierin komt duidelijk de eerdere constatering naar voren dat de Stirling zeer gevoelig is voor de hoogte van de warmtevraag, en brandstofcelsystemen steeds minder naarmate het elektrisch rendement toeneemt.



Figuur 19 Energiekostenreductie van 1 kW_e μ -WK systemen verschillende technologieën bij verschillende warmtevragen en een elektriciteitsvraag van 4500 kWh/yr.

3.4 Conclusies

Uit het voorgaande kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Een hoog direct eigen gebruik van de door het μ -WK-systeem geproduceerde elektriciteit of een lage prijs voor tijdelijke “opslag” van elektriciteit op het net (verschil tussen terugleververgoeding en inkooprij van elektriciteit). Deze factoren zijn van doorslaggevend belang voor de economische haalbaarheid van μ -WK systemen in particuliere exploitatie. Wanneer beide laag zijn kan er zelfs sprake zijn van een energiekostenontsparring.
2. Type en nominaal vermogen. Voor gemiddelde elektriciteitsverbruiken is een nominaal elektrisch vermogen van een μ -WK systeem van 1 kW_e een goede keuze. Vanwege de modulaire opbouw en de hoge kosten van een stack wordt vermoed dat de investeringskosten van een μ -WK systeem toenemen met de systeemgrootte. Zo lang er een grote afhankelijkheid is, is het verstandig om bij afnemende elektriciteitsvraag voor kleinere systemen te kiezen, en omgekeerd. Bij Stirling μ -WK systemen is de afhankelijkheid van het formaat minder groot, en kan het vermogen relatief groot worden gekozen.
3. Gasvraag en type. Brandstofcel μ -WK systemen zijn minder gevoelig voor de hoogte van de gasvraag dan Stirling, wat wordt geïllustreerd in Figuur 19. Door de lage warmte/kracht-verhouding is er voor brandstofcellen meestal voldoende afzet voor de warmte mogelijk. De Stirling daarentegen realiseert vergelijkbare energiekostenreducties als de brandstofcellen systemen in de marktsegmenten met een duidelijk bovengemiddelde gasvraag. In Figuur 19 is aangenomen dat het aandeel directe levering van elektriciteit aan het huishouden voor alle typen gelijk is. Verwacht wordt echter dat brandstofcellen snellere belastingwisselingen aan kunnen dan Stirling systemen, zodat de laatste wellicht een lagere directe levering behalen. In situaties met een extreem laag gasverbruik (woningen met EPC ≤ 1 , appartementen) zal de SOFC de hoogste energiekostenreductie behalen, omdat zijn elektriciteitsproductie het minst van de gasvraag afhangt.

4. ENERGIEKOSTENREDUCTIE VAN μ -WK SYSTEMEN IN VERSCHILLENDE MARKTSEGMENTEN

In dit hoofdstuk wordt voor diverse marktsegmenten de jaarlijkse energiekostenreductie van verschillende micro-WK opties bepaald.

4.1 Marktsegmenten

In hoofdstuk 3 is geconstateerd dat het voor de energiekostenreductie zeer belangrijk is hoeveel elektriciteit en gas er wordt gebruikt. Om dit nader te kunnen onderzoeken zijn een aantal marktsegmenten gedefinieerd. Deze zijn samengevat in Tabel 7.

Tabel 7 Marktsegmenten.

	Elektriciteitsgebruik [kWh/jr]	Gasverbruik [m ³ /jr]	Stookseizoen [dg/jr]	Piekvermogen [kWth]
1&2pers.HH	1500	1900	150	6
Appartement	3200	1000	100	3,7
Rijwoning	3200	1900	120	8
Vrijstaand	3200	3000	150	11
Vinex-woning	4500	1000	80	4,6
Groot gezin	4500	1900	120	8
Grootverbruiker	4500	3000	160	10

Er zijn 3 klassen voor het elektriciteitsverbruik gedefinieerd, en 3 voor het gasverbruik. Dit zou leiden tot 9 marktsegmenten. Er is voor gekozen om 2 weg te laten. Het segment met laag elektriciteitsverbruik en hoog gasverbruik wordt weggelaten omdat wordt verwacht dat dit zeer klein zal zijn. Het segment met laag elektriciteitsverbruik en laag gasverbruik is ook weggelaten, omdat hier waarschijnlijk zeer weinig energiekosten te besparen zijn.

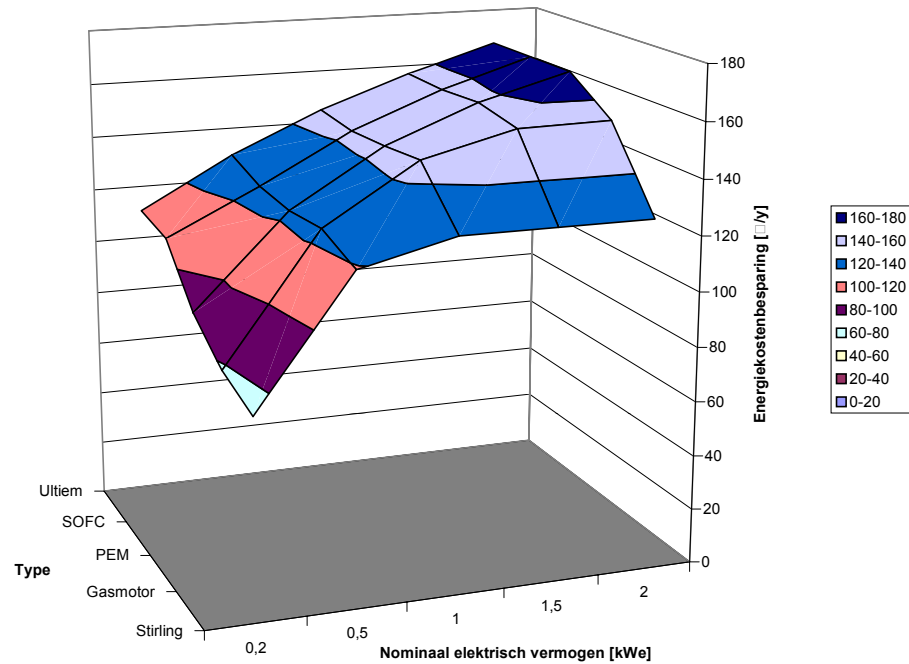
Een factor die nog van belang is voor de hoeveelheid warmte die in het huishouden kan worden afgezet is de lengte van het stookseizoen. De lengte van het stookseizoen wordt bepaald door het aantal dagen per jaar dat er vraag naar ruimteverwarming is. Het piekvermogen hangt hier deels mee samen. Het deel van het gevraagde vermogen voor ruimteverwarming dat het maximale thermisch vermogen van de μ -WK eenheid te boven gaat moet worden geleverd door de hulpbrander.

4.2 Effect van type en vermogen van de μ -WK op de kostenbesparing

Voor ieder marktsegment is onderzocht welke energiekostenreductie kan worden bereikt wanneer in het marktsegment een Stirling, PEMFC of SOFC μ -WK systeem wordt toegepast. Een van de dingen die hierbij van invloed is, is het vermogen van het μ -WK systeem. In de nu volgende paragrafen wordt onderzocht wat het effect van type systeem (rendement) en vermogen van het systeem is op de jaarlijkse kostenbesparing. Doel van deze analyse is om te onderzoeken of er voor de verschillende typen μ -WK systemen een vermogensgrootte is die voor vele marktsegmenten een optimale kostenbesparing oplevert.

4.2.1 1&2-persoons huishoudens

In Figuur 20 is getoond hoe de energiekostenreductie in dit marktsegment afhangt van het type en vermogen van het μ -WK systeem.



Figuur 20 Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ -WK systemen met verschillende vermogens in 1&2-persoons huishoudens

Opvallende dingen zijn:

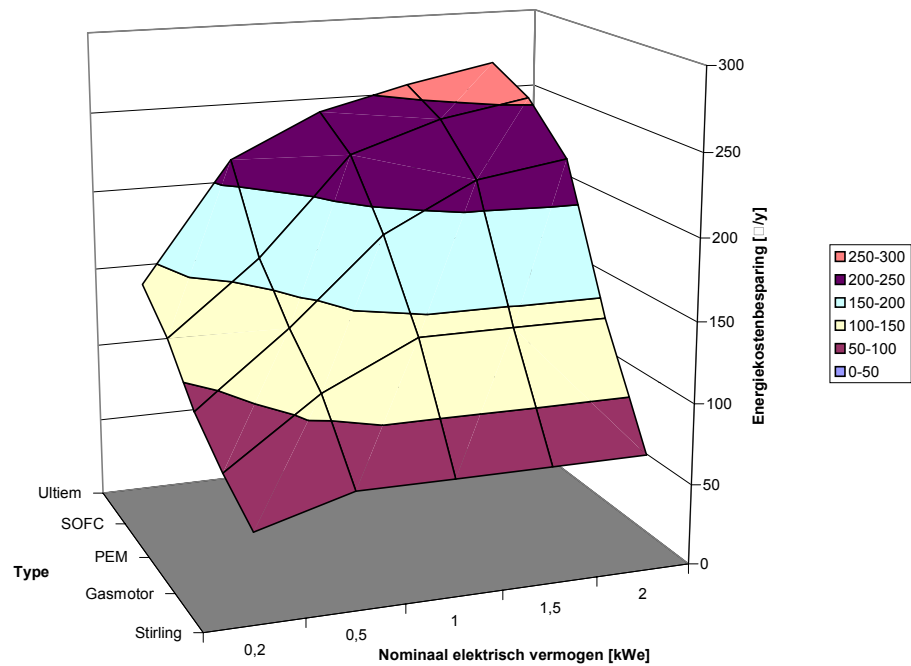
- Vanaf 1 kW_e heeft het rendement van de brandstofcel geen invloed meer. Bij toename van het vermogen tot 2 kW_e neemt de kostenbesparing toe van ongeveer 145 naar 165 €.
- De optimale grootte van een gasmotor systeem is ongeveer 1 kW_e.
- De grootste toename van de besparingen van een Stirling treden op bij toename van 0,2 naar 0,5 kW_e. Meer dan 1 kW_e heeft geen invloed meer
- Omdat voor gasmotor 1 kW_e de ideale grootte lijkt, wordt deze grootte voor het marktsegment 1&2-persoons huishoudens voor alle systemen aangehouden.

4.2.2 Appartement

In Figuur 21 is getoond hoe de energiekostenreductie in dit marktsegment afhangt van het type en vermogen van het μ -WK systeem.

Opvallende dingen zijn:

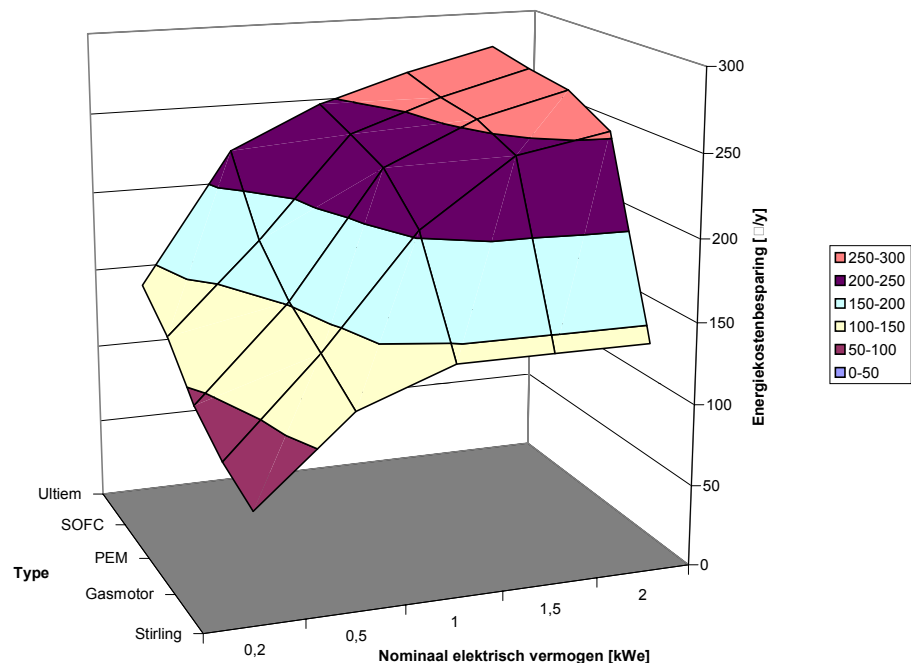
- Vanaf 1 kW_e vermindert de toename van de kostenbesparing van een SOFC systeem met toename van het vermogen.
- Bij PEMFC systemen treedt de vermindering van de toename tussen 1 en 1,5 kW_e op.
- Bij gasmotoren is boven 1 kW_e nauwelijks toename van de kostenreductie te zien
- Bij Stirling systemen is boven 0,5 kW_e al geen toename van de reductie meer te zien.
- Voor dit marktsegment lijkt 1 kW_e optimaal.



Figuur 21 Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ -WK systemen met verschillende vermogens in appartementen

4.2.3 Rijwoning

In Figuur 22 is getoond hoe de energiekostenreductie in dit marktsegment afhangt van het type en vermogen van het μ -WK systeem.



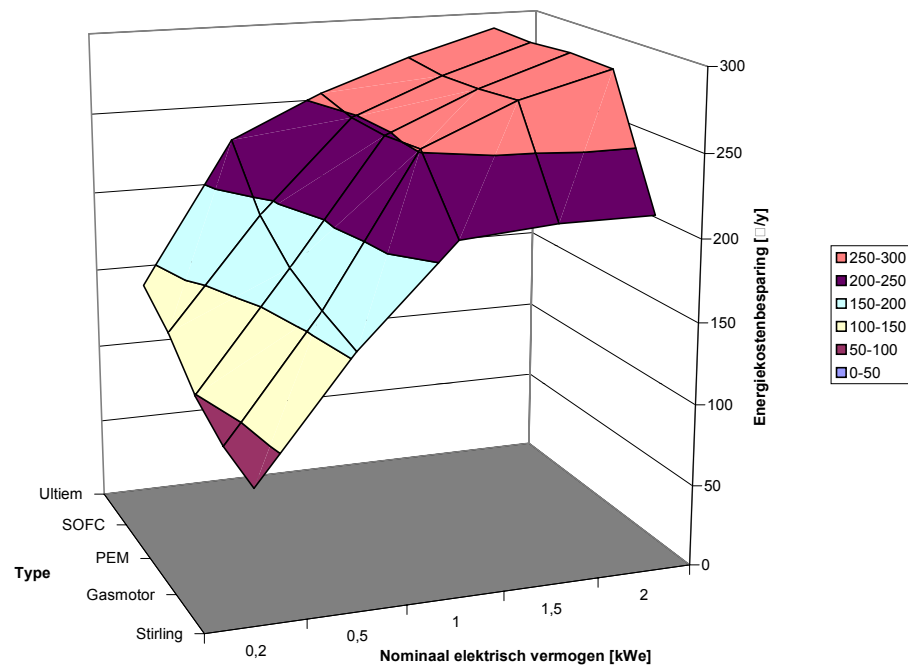
Figuur 22 Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ -WK systemen met verschillende vermogens in rijwoningen.

Opvallende dingen zijn:

- Vanaf 1 kW_e vermindert de toename van de kostenbesparing van een SOFC systeem met toename van het vermogen.
- Bij PEMFC systemen treedt de vermindering van de toename tussen 1 en 1,5 kW_e op.
- Bij gasmotoren is dat bij ongeveer 1,5 kW_e.
- Bij Stirling systemen is boven 1 kW_e geen toename van de reductie meer te zien. De toename tussen 0,5 en 1 kW_e is al niet zo groot meer als beneden 0,5 kW_e.
- Ook voor dit marktsegment lijkt 1 kW_e optimaal.

4.2.4 Vrijstaand

In Figuur 23 is getoond hoe de energiekostenreductie in dit marktsegment afhangt van het type en vermogen van het μ-WK systeem.



Figuur 23 Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ-WK systemen met verschillende vermogens in vrijstaande woningen

Opvallende dingen zijn:

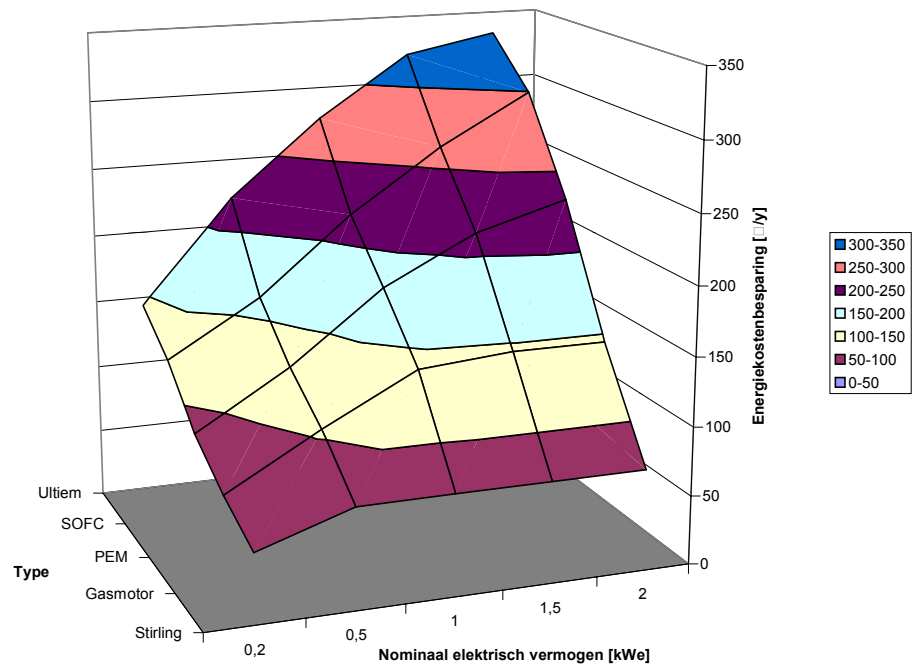
- Vanaf 1 kW_e vermindert de toename van de kostenbesparing van brandstofcel- en gasmotorsystemen met toename van het vermogen.
- Bij Stirling systemen is boven 1 kW_e geen toename van de reductie meer te zien.
- Ook voor dit marktsegment lijkt 1 kW_e optimaal.

4.2.5 Vinex-woning

In Figuur 24 is getoond hoe de energiekostenreductie in dit marktsegment afhangt van het type en vermogen van het μ-WK systeem.

Opvallende dingen zijn:

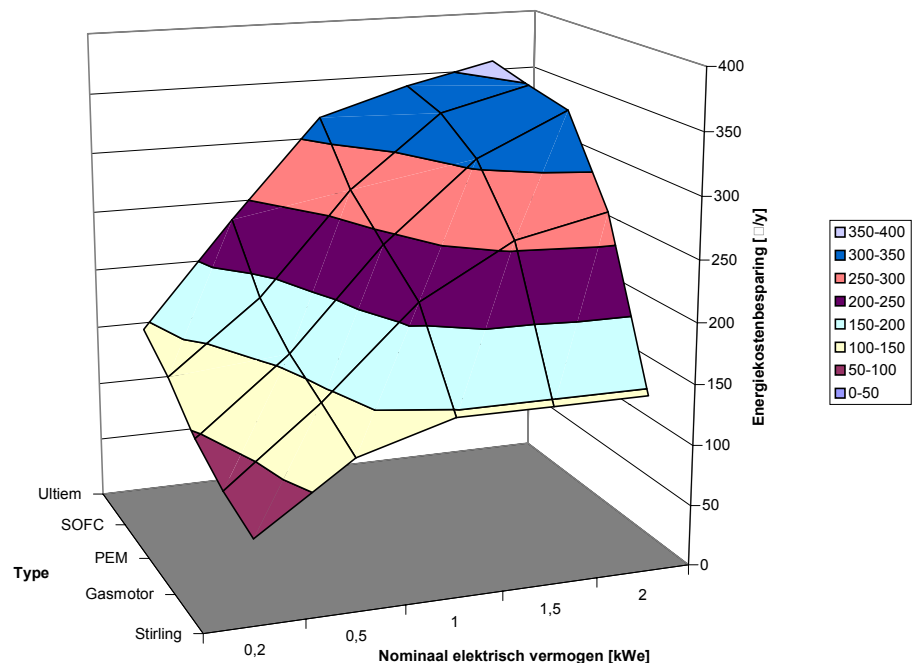
- De kostenbesparing van brandstofcellen blijft in dit marktsegment stijgen met toenemend vermogen tot 2 kW_e. Alleen “ultieme” systemen laten een lichte afvlakking zien.
- Vanaf 1 kW_e vermindert de toename van de kostenbesparing van gasmotorsystemen met toename van het vermogen.
- Bij Stirling systemen is boven 0,5 kW_e geen toename van de reductie meer te zien.
- Ook voor dit marktsegment kan het beste voor 1 kW_e worden gekozen.



Figuur 24 Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ -WK systemen met verschillende vermogens in vinex woningen

4.2.6 Groot gezin

In Figuur 25 is getoond hoe de energiekostenreductie in dit marktsegment afhangt van het type en vermogen van het μ -WK systeem.



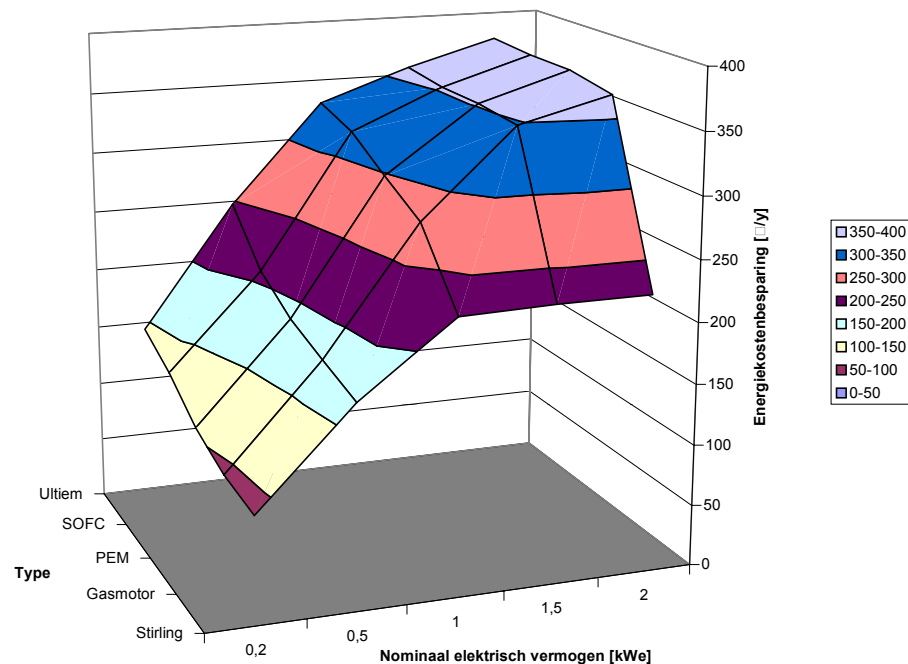
Figuur 25 Energiekostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ -WK systemen met verschillende vermogens in grote gezinnen

Opvallende dingen zijn:

- In dit marktsegment vermindert pas vanaf 1,5 kW_e de toename van de kostenbesparing van brandstofcel- en gasmotorsystemen met toename van het vermogen.
- Bij Stirling systemen is boven 1 kW_e geen toename van de reductie meer te zien.
- In dit marktsegment is 1,5 kW_e misschien een betere keuze dan 1 kW_e.

4.2.7 Grootverbruiker

In Figuur 26 is getoond hoe de energiekostenreductie in dit marktsegment afhangt van het type en vermogen van het μ-WK systeem.



Figuur 26 Energielkostenreductie bij toepassing van verschillende typen μ-WK systemen met verschillende vermogens in het marktsegment “grootverbruikers”

Opvallende dingen zijn:

- Vanaf 1 kW_e vermindert de toename van de kostenbesparing van SOFC systemen met toename van het vermogen.
- In dit marktsegment vermindert pas vanaf 1,5 kW_e de toename van de kostenbesparing van PEMFC- en gasmotorsystemen met toename van het vermogen.
- Vanaf 1,5 kW_e is er weinig verschil in energiekostenreductie tussen brandstofcel- en gasmotorsystemen.
- Bij Stirling systemen is boven 1 kW_e geen toename van de reductie meer te zien.
- Voor dit marktsegment lijkt 1 kW_e voor de Stirling optimaal.
- De overige systemen is 1,5 kW_e misschien een betere keuze dan 1 kW_e.

4.2.8 Keuze van systeemgrootte.

De gezien de kostenbesparing optimale systeemgrootten zijn in de volgende tabel samengevat. Hierbij is gestreefd naar een zo klein mogelijk systeem, zodat de investeringen zo laag mogelijk worden. Omdat het verband tussen investeringen en grootte nog niet onderzocht is, heeft geen optimalisatie plaatsgevonden.

Tabel 8 Vanuit energiekostenbesparing gezien optimale systeemgrootten in verschillende marktsegmenten.

	Stirling	Gasmotor	PEMFC	SOFC
1&2pers.HH	1	1	1	1
Appartement	0,5	1	1,5	1
Rijwoning	1	1,5	1	1
Vrijstaand	1	1	1	1
Vinex-woning	0,5	1	2	2
Groot gezin	1	1,5	1,5	1,5
Grootverbruiker	1	1,5	1 à 1,5	1

In deze tabel komt 1 kW_e het vaakst voor. Voor het onderling vergelijken van de verschillende technologieën voor de verschillende marktsegmenten lijkt daarom 1 kW_e een goede grootte. In de volgende paragraaf zijn de resultaten voor de verschillende technologieën samengevat.

4.3 Vergelijking van 1 kW_e μ-WK systemen in verschillende marktsegmenten

In de voorgaande paragraaf is bepaald dat voor alle marktsegmenten en typen μ-WK systemen 1 kW_e een goede keuze is. In deze paragraaf wordt een vergelijking per type 1 kW_e systeem voor verschillende marktsegmenten gemaakt.

Hoewel de ontwikkeling van gasmotor μ-WK systemen gestopt is, is in deze paragraaf de gasmotor μ-WK systemen toch opgenomen. Wellicht komt er in de toekomst nog eens een systeem met een elektrisch rendement in de orde van 20% beschikbaar.

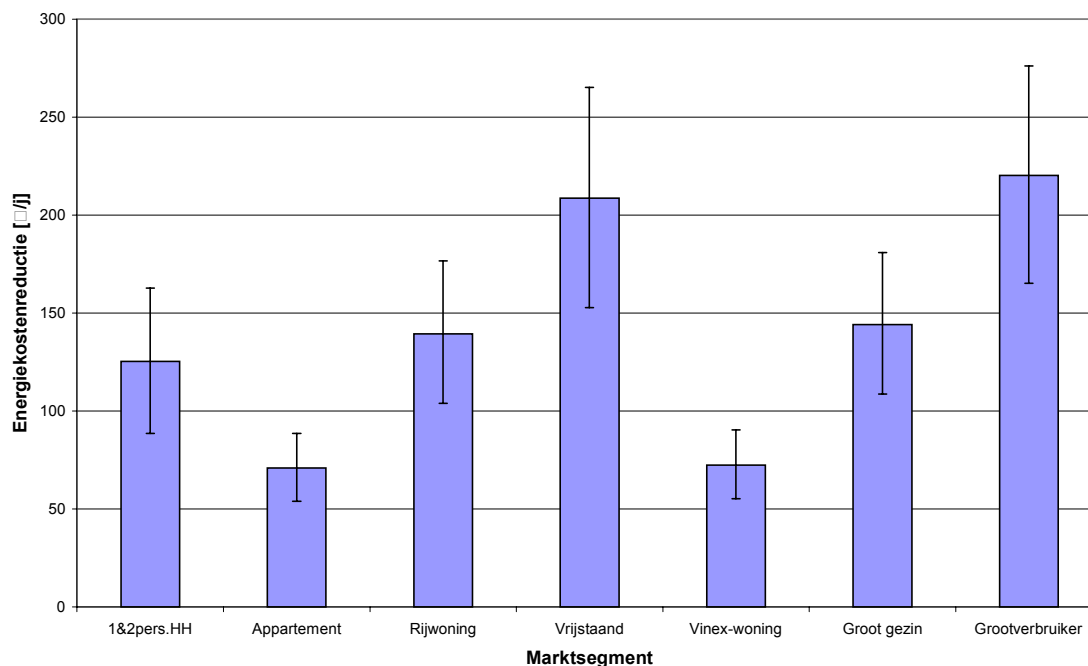
4.3.1 Stirling

In de volgende tabel zijn de energiekostenreducties ten gevolge van de toepassing van een 1 kW_e Stirling μ-WK systeem in diverse marktsegmenten weergegeven, samen met de mogelijke spreiding, uitgedrukt in 5% en 95% percentielen. Voor de beeldvorming zijn ook de APF en de DSF weergegeven, zonder hun onzekerheid weer te geven.

Tabel 9 Energiekostenreductie van een 1 kW_e Stirling μ-WK installatie

Marktsegment	5%	Gemiddelde	95%	APF	DSF
1&2pers.HH	87	125	166	0,85	0,31
Appartement	54	71	89	0,71	0,72
Rijwoning	104	139	177	0,74	0,64
Vrijstaand	149	207	265	0,75	0,58
Vinex-woning	55	72	90	0,49	0,78
Groot gezin	109	144	181	0,61	0,74
Grootverbruiker	164	222	281	0,72	0,71

In Figuur 27 zijn de resultaten van de tabel grafisch weergegeven in de vorm van een spreidingsdiagram



Figuur 27 Energiekostenreducties van een 1 kW_e Stirling μ-WK systeem in diverse marktsegmenten in €/jr.

In de figuur is goed te zien dat de energiekostenreductie van Stirling μ-WK systemen samenhangt met de hoogte van de warmtevraag. De hoogste energiekostenreducties worden zodoende bereikt in de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker. De marktsegmenten appartement en vinex hebben de laagste warmtevraag en leiden tot de laagste energiekostenreducties.

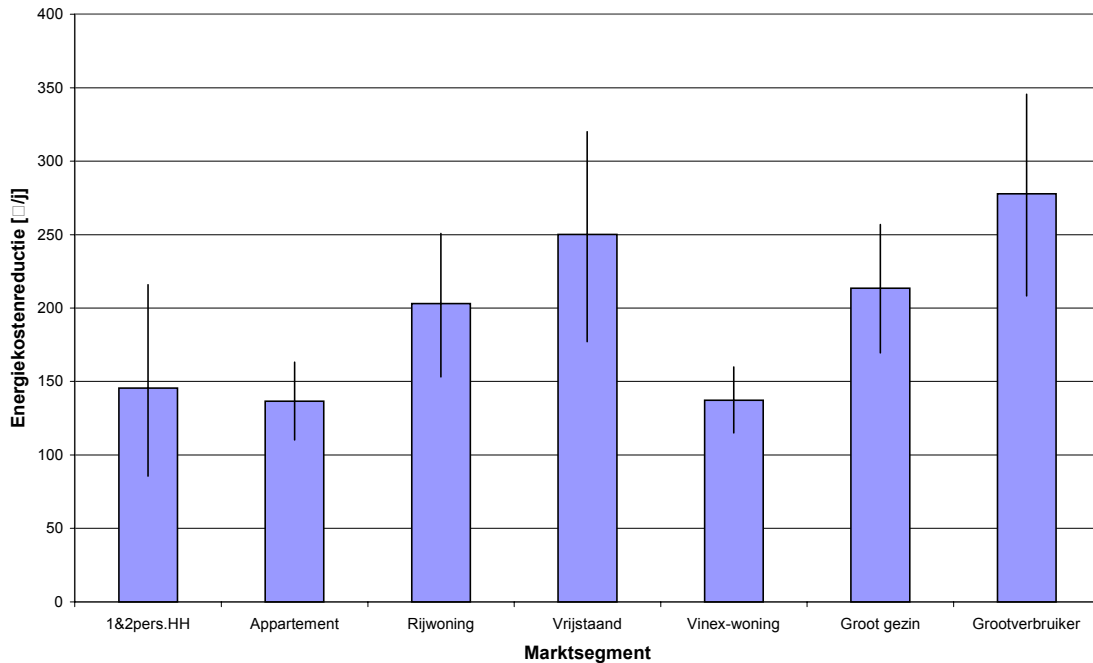
4.3.2 Gasmotor

In de volgende tabel zijn de energiekostenreducties ten gevolge van de toepassing van een 1 kW_e Gasmotor μ-WK systeem in diverse marktsegmenten weergegeven, samen met de mogelijke spreiding, uitgedrukt in 5% en 95% percentielen. Voor de beeldvorming zijn ook de APF en de DSF weergegeven, zonder hun onzekerheid weer te geven.

Tabel 10 Energiekostenreductie van een 1 kW_e Gasmotor μ-WK installatie

Marktsegment	5%	Gemiddelde	95%	APF	DSF
1&2pers.HH	85	146	216	0,83	0,35
Appartement	110	137	163	0,57	0,76
Rijwoning	153	203	251	0,69	0,72
Vrijstaand	177	250	320	0,74	0,63
Vinex-woning	115	137	160	0,39	0,82
Groot gezin	170	214	257	0,52	0,77
Grootverbruiker	208	278	346	0,64	0,74

In Figuur 28 zijn de resultaten van de tabel grafisch weergegeven in de vorm van een spreidingsdiagram



Figuur 28 Energiekostenreducties van een 1 kW_e Gasmotor μ -WK systeem in diverse marktsegmenten.

In Figuur 28 is goed te zien dat de energiekostenreductie van gasmotor μ -WK systemen samenhangt met de hoogte van de warmtevraag, maar minder dan bij de Stirling. De hoogste energiekostenreducties worden ook hier bereikt in de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker. De marktsegmenten appartement en vinex hebben de laagste warmtevraag en leiden tot de laagste energiekostenreducties.

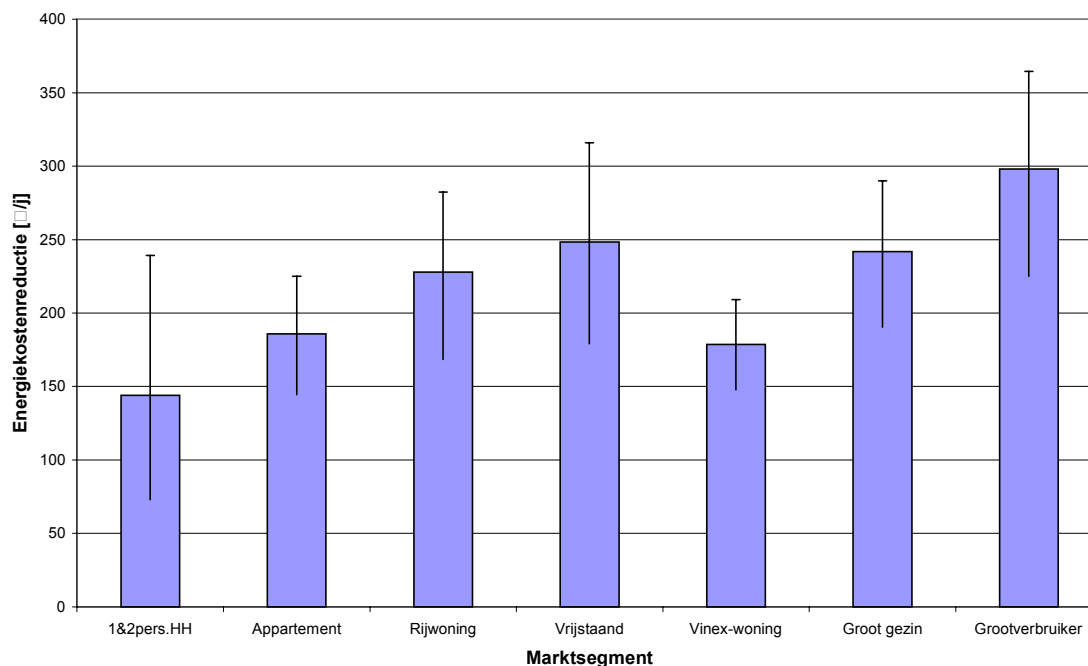
4.3.3 PEMFC

In de volgende tabel zijn de energiekostenreducties ten gevolge van de toepassing van een 1 kW_e PEMFC μ -WK systeem in diverse marktsegmenten weergegeven, samen met de mogelijke spreiding, uitgedrukt in 5% en 95% percentielen. Voor de beeldvorming zijn ook de APF en de DSF weergegeven, zonder hun onzekerheid weer te geven.

Tabel 11 Energiekostenreductie van een 1 kW_e PEMFC μ -WK systeem in diverse marktsegmenten

Marktsegment	5%	Gemiddelde	95%	APF	DSF
1&2pers.HH	73	143	234	0,83	0,36
Appartement	149	189	229	0,58	0,75
Rijwoning	175	233	289	0,71	0,72
Vrijstaand	183	247	311	0,74	0,64
Vinex-woning	152	182	213	0,40	0,81
Groot gezin	197	248	297	0,54	0,77
Grootverbruiker	235	306	377	0,66	0,73

In Figuur 29 zijn de resultaten van de tabel grafisch weergegeven in de vorm van een spreidingsdiagram



Figuur 29 Energiekostenreductie van een 1 kW_e PEMFC μ-WK systeem in diverse marktsegmenten

In Figuur 29 is te zien dat de energiekostenreductie van PEMFC μ-WK systemen nog steeds samenhangt met de hoogte van de warmtevraag, maar dat de PEMFC in marktsegmenten met een lagere warmtevraag duidelijk tot meer energiekostenbesparing leidt dan de Stirling. Het marktsegment met de laagste elektriciteitsvraag (1&2-persoons huishoudens) leidt gemiddeld tot de laagste besparingen. De spreiding is hier echter het grootst, zodat er binnen dit marktsegment niches te vinden zullen zijn waar meer dan 200 €/jr bespaard kan worden.

De grote spreiding in dit marktsegment wordt veroorzaakt door de grote onzekerheid in terugleververgoeding. Brandstofcellen in dit marktsegment zullen vanwege de lage elektriciteitsvraag relatief veel terugleveren, waardoor ze erg gevoelig worden voor het teruglevertarief.

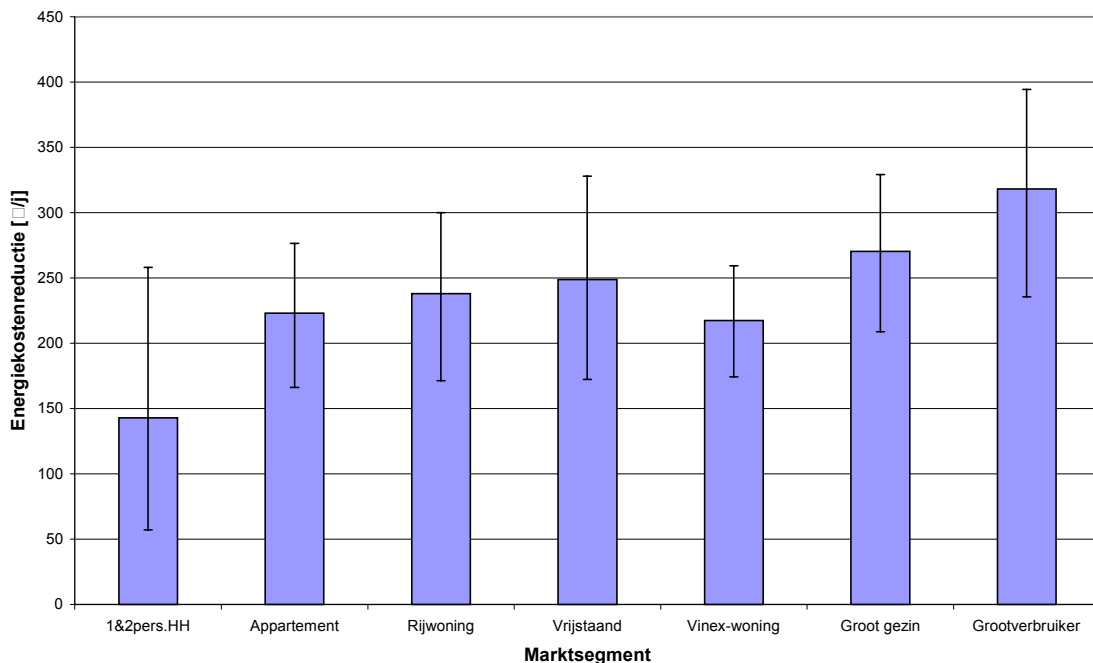
4.3.4 SOFC

In de volgende tabel zijn de energiekostenreducties ten gevolge van de toepassing van een 1 kW_e SOFC μ-WK systeem in diverse marktsegmenten weergegeven, samen met de mogelijke spreiding, uitgedrukt in 5% en 95% percentielen. Voor de beeldvorming zijn ook de APF en de DSF weergegeven, zonder hun onzekerheid weer te geven.

Tabel 12 Energiekostenreductie van een 1 kW_e SOFC μ-WK systeem in diverse marktsegmenten

Marktsegment	5%	Gemiddelde	95%	APF	DSF
1&2pers.HH	57	142	260	0,85	0,31
Appartement	169	226	280	0,71	0,72
Rijwoning	174	240	303	0,74	0,64
Vrijstaand	174	247	327	0,75	0,58
Vinex-woning	179	221	264	0,49	0,78
Groot gezin	214	276	336	0,61	0,74
Grootverbruiker	241	323	400	0,72	0,71

In Figuur 30 zijn de resultaten van de tabel grafisch weergegeven in de vorm van een spreidingsdiagram



Figuur 30 Energiekostenreductie van een 1 kW_e SOFC μ-WK systeem in diverse marktsegmenten

Ook hier valt de grote spreiding op van de energiekostenreductie in het 1&2-persoons marktsegment. De oorzaak is dezelfde als bij PEMFC: onzekerheid omtrent de hoogte van de terugleververgoeding. Ook is hier het marktsegment grootverbruiker het segment met de hoogste energiekostenreductie.

In de meest voorkomende marktsegmenten kan een energiekostenreductie van tenminste 200 € per jaar worden behaald, met een redelijke kans op 300 €/jr of hoger.

4.3.5 Vergelijking van de beschouwde typen 1kW_e μ-WK systemen in de verschillende marktsegmenten

Om binnen de verschillende marktsegmenten de beschouwde technieken te kunnen vergelijken zijn de gemiddeld verwachte energiekostenreducties⁷ bij elkaar in één figuur uitgezet.

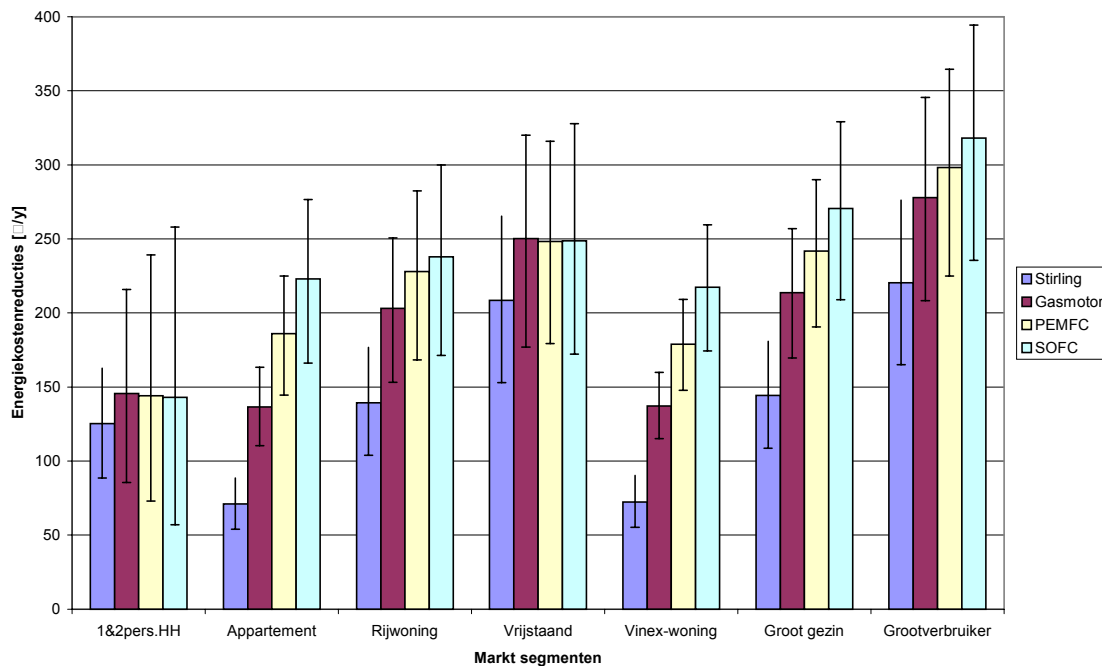
De hoogste energiekostenbesparingen worden bereikt wanneer SOFC systemen worden ingezet in het marktsegment grootverbruiker.

In alle marktsegmenten wordt de grootste besparing behaald met SOFC μ-WK systemen. De besparingen van PEMFC systemen, en in een aantal segmenten ook de gasmotoren, blijven hier slechts iets bij achter. Bij een ten opzichte van de warmtevraag relatief lage elektriciteitsvraag (1&2-persoons huishouden, vrijstaand) vallen de verschillen tussen gasmotor, PEMFC en SOFC bijna weg, wat zou betekenen dat het in deze marktsegmenten niet veel uit maakt voor welk systeem men kiest.

De Stirling behaalt in alle marktsegmenten een lagere besparing dan de brandstofcellen. Bij een relatief lage elektriciteitsvraag (1&2-persoons huishouden, vrijstaand) is de besparing van de Stirling echter niet veel lager dan die van brandstofcellen. In de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker kan de Stirling zijn hoogste besparingen genereren. In marktsegmenten met een

⁷ De reducties van primaire-energiegebruik en emissies volgen de hoogte van de jaarlijkse kostenbesparingen.

lage gasvraag (appartementen, vinex woningen) is de besparing van de Stirling zeer laag, wat ook al blijkt uit Figuur 19.



Figuur 31 Vergelijking van de energiekostenreducties van de beschouwde technieken in de verschillende marktsegmenten.

Omdat het te verwachten is dat de Stirling nog lange tijd goedkoper zal zijn dan brandstofcellen, zal de Stirling in de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker voorlopig niet te concurreren zijn. Toepassing van brandstofcellen zal dan ook vooral in de marktsegmenten rijwoning en groot gezin moeten worden gezocht. Voor vinex woningen en appartementen lijkt de SOFC de beste keus.

In absolute zin blijft voor alle technieken de besparing in het segment 1&2-persoons huishoudens achter bij de anderen. Alleen bij hoge terugleververgoedingen wordt μ -WK hier interessant, wat zichtbaar wordt in de grote onzekerheidsmarges voor dit marktsegment in Figuur 31.

5. MEERINVESTERINGSRUIMTE VAN μ -WK SYSTEMEN TEN OPZICHTE VAN HR-COMBIKETELS

Eén van de doelen van deze studie is om te bepalen hoeveel de micro-WK installatie extra mag kosten ten opzichte van een verwarmingssysteem gebaseerd op een HR-ketel. Dit is de meerinvesteringsruimte. Er wordt door een μ -WK systeem een meerinvesteringsruimte gecreëerd door de energiekostenreductie. De maximale meerinvesteringsruimte is die waarbij de extra jaarlijkse kapitaals- en onderhoudskosten ten gevolge van de μ -WK gelijk zijn aan de jaarlijkse energiekostenreductie.

5.1 Kapitaalslasten

De kapitaalslasten kunnen worden bepaald met behulp van een (break-even) annuïteit. De annuïteit is dat bedrag dat jaarlijks over de levensduur van een apparaat moet worden betaald wanneer het geld voor de investering wordt geleend, en de lening aan het eind van de levensduur precies is afgelost. Bij een rente van 5% en een levensduur van 15 jaar bedraagt de annuïteit 10% van de investering.

5% Lijkt een goed uitgangspunt voor de rente te zijn. Leningen voor investeringen in een woning zijn aftrekbaar voor de inkomstenbelasting, wat leidt tot nog lagere reële rentepercentages. Verder worden particuliere investeringen vaak gedekt uit eigen middelen. Dan kan worden gerekend met de rente die de particulier op een spaarrekening had kunnen krijgen. Maar ook had de particulier het geld kunnen beleggen, wat een hogere verwachting voor de rente oplevert. De overheid gaat in het belastingstelsel (box 3) uit van een gemiddeld rendement van 4% op eigen vermogen van particulieren. Met hetzelfde recht zou dit als rentepercentage genomen mogen worden, omdat de particulier dit bedrag niet kan sparen of beleggen. Een meer vermogende particulier betaalt over zijn gespaard en belegd vermogen een heffing van 30% over het fictieve rendement van 4%. De effectieve rente voor de vermogende particulier bedraagt dus 2,8%. Verwacht mag worden dat de “early adopters” onder de vermogende particulieren te vinden zijn.

In de berekening van de annuïteit wordt uitgegaan van 15 jaar. Dat is gelijk aan de gemiddelde levensduur van een verwarmingssysteem, die tegenwoordig 15 jaar bedraagt. Deze levensduur zal ook van μ -WK worden geëist. Voor Stirling μ -WK systemen wordt deze levensduur zeker als reëel beschouwd. Bij brandstofcellen systemen moet tussentijds misschien de stack worden gewisseld. Dat kan in de onderhoudskosten worden meegenomen. Van de rest van het systeem (hulpketel, warmtewisselaar, regeling, DC/AC-invertor en dergelijke) mag ook een levensduur van 15 jaar worden verwacht.

De annuïteit bij een levensduur van 15% en verschillende rentepercentages is samengevat in de volgende tabel.

Tabel 13 Waarden van de annuïteit (jaarlijkse betaling als fractie van de investering) bij verschillende rentepercentages en een levensduur van 15 jaar

Rente	Annuïteit
2,8%	8,3%
4,0%	9,0%
5,0%	9,6%
6,0%	10,3%

Hieruit blijkt dat de aflossingscomponent een redelijk groot deel van de annuïteit uitmaakt, en dat de annuïteit niet zeer gevoelig is voor de hoogte van de rente. Wij stellen voor uit te gaan van een jaarlijkse betaling van 10% van de meerinvestering.

5.2 Jaarlasten

Kentallen van onderhoudskosten worden vaak uitgedrukt als percentage van de investeringskosten. Afhankelijk van de aard van de techniek en het ontwikkelingsstadium wordt vaak uitgegaan van jaarlijks 3 à 5% van de investeringskosten. Op deze manier zouden de jaarlasten uitkomen op 12 à 15% van de meerinvesteringskosten. De exploitant verliest geen geld op de meerinvestering wanneer de jaarlijkse energiekostenbesparing gelijk is aan de extra jaarlasten ten gevolge van toevoeging van de μ -WK aan het verwarmingssysteem. Dan zou de meerinvesteringsruimte 6 à 8 maal de jaarlijkse kostenbesparing bedragen.

5.3 Terugverdientijd

Een ander criterium is de terugverdientijd. De engelse afkorting is SPOT: simple pay-out time. Dit is de het aantal malen dat de jaarlijkse besparing in de investering past. Een particulier is vaak over te halen met een SPOT van 5 jaar. Dit betekent dat dan de meerinvesteringsruimte 5 maal de jaarlijkse kostenbesparing zou bedragen.

Omgekeerd geldt bij een SPOT van 5 jaar dat de jaarlijkse besparing 20% van de meerinvestering bedraagt. Aangezien de kapitaalslasten, berekend met de annuïteit, van de meerinvestering 10% bedraagt, zou dat ruimte laten voor 10% onderhoudskosten. Vanwege de onzekerheid over de levensduur van de stack lijkt het ons verstandig met 10% onderhoudskosten rekening te houden, en daarom van de SPOT = 5 jaar uit te gaan.

Of deze benadering terecht is voor een Stirling kan worden betwijfeld, vanwege het waarschijnlijk ontbreken van meerkosten voor onderhoud, hetgeen de rentabiliteit verder verhoogt. Echter: particulieren denken bij het doen van grote uitgaven voor energiebesparing in termen van terugverdientijden, waarbij 5 jaar acceptabel klinkt. 10 jaar klinkt heel wat onaantrekkelijker. Verder zal een jaarlijkse kostenbesparing van 200 euro bij een terugverdientijd van 10 jaar tot een meerinvesteringsruimte van 2000 € leiden. De vraag is of particulieren bereid zijn een dergelijke uitgave in één keer te doen.

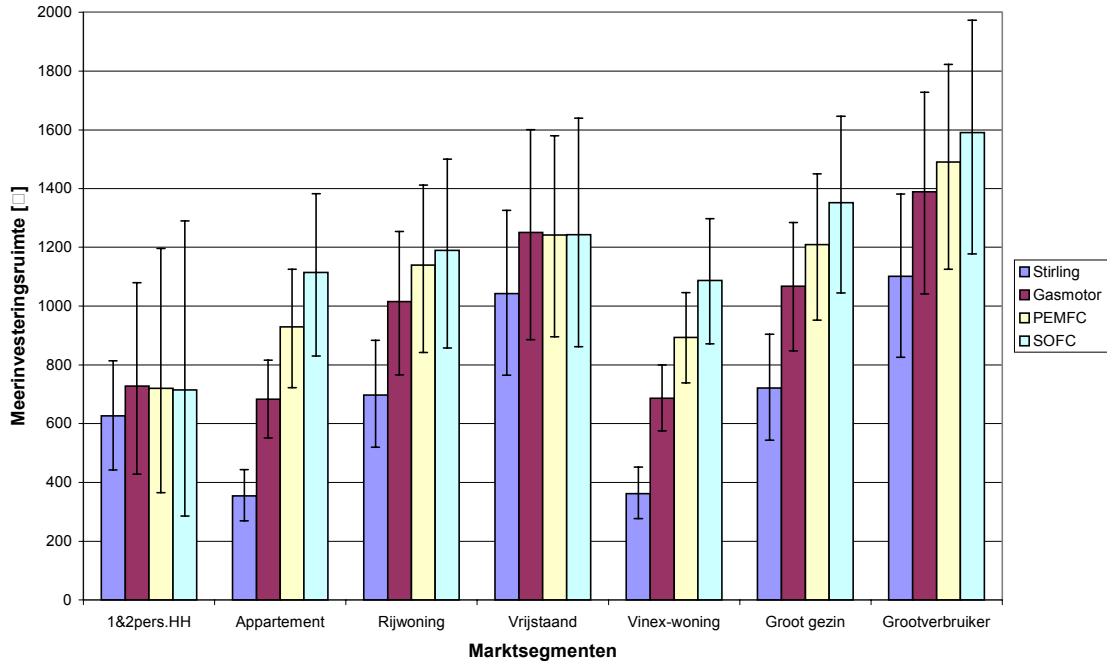
5.4 Meerinvesteringsruimte voor de particulier in de diverse marktsegmenten.

Met behulp van de jaarlijkse energiekostenbesparing uit Hoofdstuk 4 en de SPOT van 5 jaar kunnen voor de diverse technologieën de meerinvesteringsruimtes in de diverse marktsegmenten worden bepaald. Er is al in ruime mate rekening gehouden met onzekerheden in de jaarlijkse energiekostenbesparingen, zodat het ons niet nodig lijkt variatie in de geëiste SPOT in rekening te brengen. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 32.

In Figuur 32 is de kans aangegeven dat de meerinvesteringsruimte voor de particulier van een bepaalde technologie in een bepaald marktsegment een zekere waarde overschrijdt. Er is bijvoorbeeld te zien dat in het marktsegment grootverbruikers (4500 kWh/jr, 3000 m³/jr) er meer dan 50% kans is op een meerinvesteringsruimte voor brandstofcellen van 1500 €, inclusief BTW, en er een 5% kans is op een meerinvesteringsruimte van 2000 € voor een SOFC systeem.

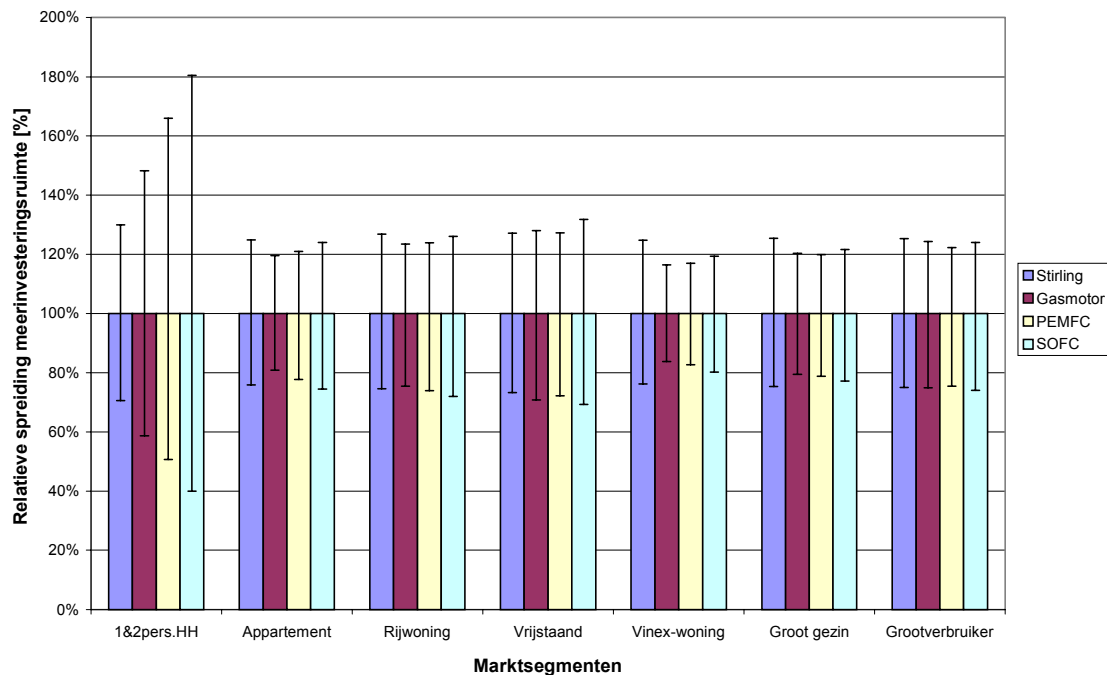
Van de vier beschouwde technieken heeft de Stirling in alle marktsegmenten de laagste meerinvesteringsruimte. In de marktsegmenten met hoge gasvraag (vrijstaand, grootverbruiker) is het relatieve nadeel echter beperkt, en bedraagt de beschikbare meerinvesteringsruimte respectievelijk 1037 en 1108 €, beide +/- 290 €. Bij nog hogere gasvraag kan de Stirling in het voordeel zijn, wat ook blijkt uit Figuur 19.

In de marktsegmenten 1&2-persoons huishoudens, rijwoningen en vrijstaand is de verwachtingswaarde voor PEMFC en SOFC even hoog, in de andere voor SOFC iets hoger. De spreiding is voor SOFC over het algemeen iets hoger dan voor PEMFC, wat betekent dat bij selectieve plaatsing voor SOFC een nog iets hogere investeringsruimte beschikbaar is. Selectieve plaatsing wil zeggen dat binnen een marktsegment een selectie wordt gemaakt van woningen waar de hoogste energiekostenbesparing kan worden gerealiseerd.



Figuur 32 Meerinvesteringsruimtes van verschillende μ -WK systemen in diverse marktsegmenten in Euro bij een SPOT van 5 jaar. Zie paragraaf 4.1 voor de verklaring van de marktsegmenten.

De relatieve spreiding is weergegeven in Figuur 33:

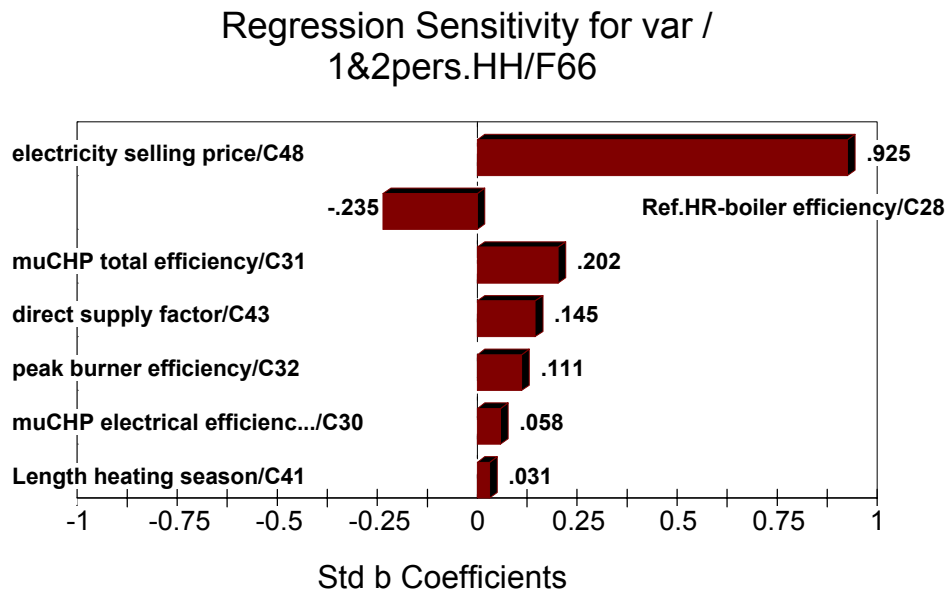


Figuur 33 Relatieve spreiding in de meerinvesteringsruimten van verschillende μ -WK technologieën in de beschouwde marktsegmenten.

De gemiddelde spreiding in de meerinvesteringsruimten bedraagt $-27\%/+29\%$. Bij 1&2-persoons huishoudens is de spreiding duidelijk veel groter dan bij alle andere marktsegmenten. Dit komt doordat in dit marktsegment de elektriciteitsvraag laag is. Daardoor speelt teruglevering een grote rol. Omdat er is uitgegaan van een grote mogelijke spreiding in de

terugleververgoeding, heeft deze grote gevolgen voor de spreiding in meerinvesteringsruimte. De rol van de terugleververgoeding is duidelijk zichtbaar in Figuur 34.

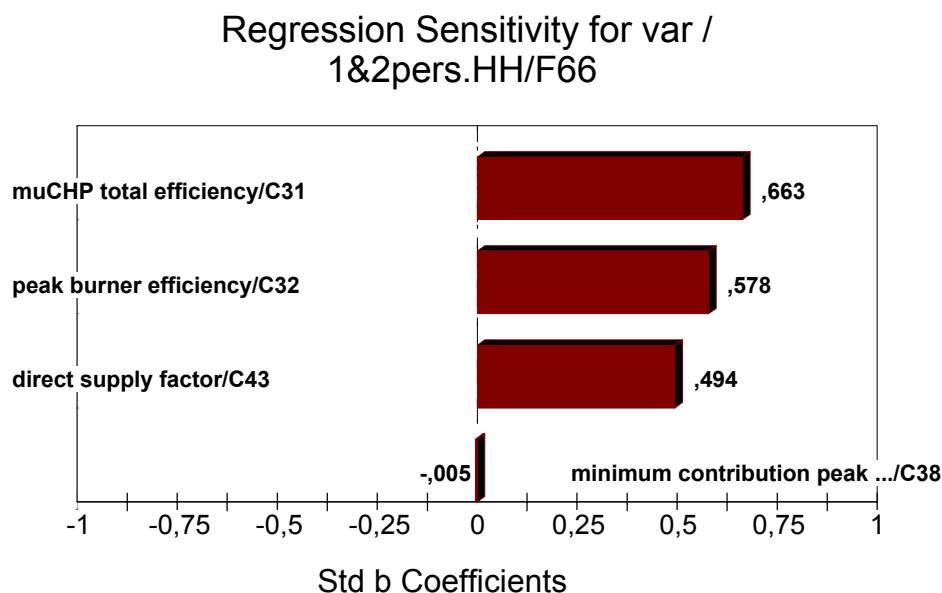
De spreiding van de andere marktsegmenten ontloopt elkaar niet zo veel. Men kan daar rekenen met een spreiding van +/- 25%.



Figuur 34 Invloeden van spreiding in invoergegevens op de investeringsruimte van SOFC μ -WK systemen in 1&2-persoons huishoudens.

5.5 Beïnvloedbare parameters

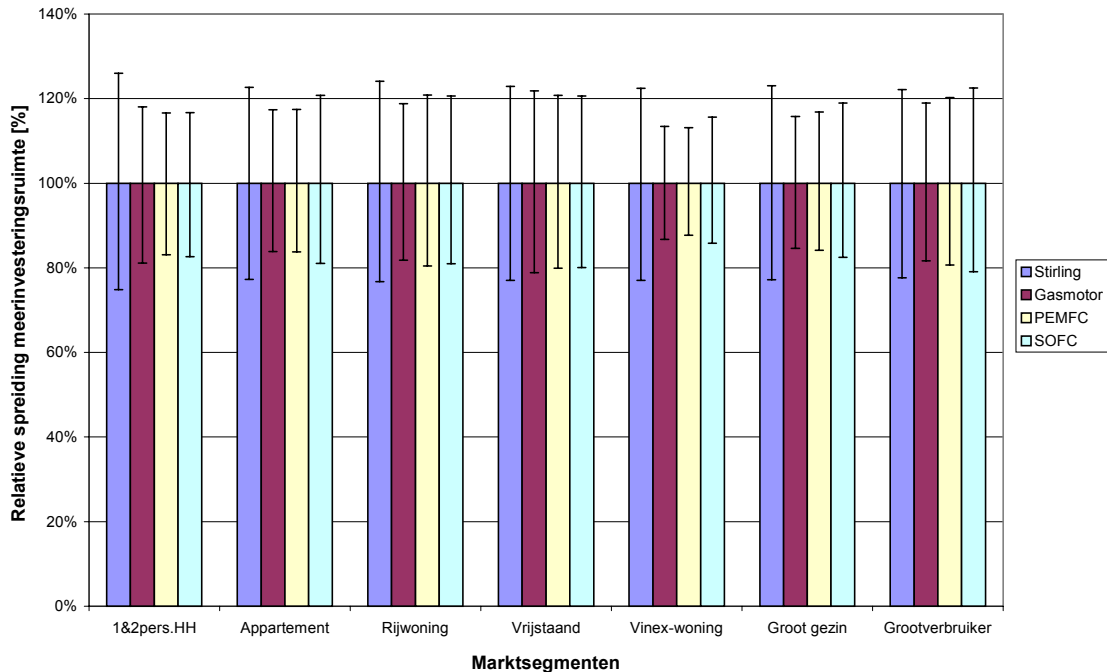
De parameter met de grootste invloed, de terugleververgoeding is niet beïnvloedbaar. Ook het rendement van de referentieketel hangt niet af van mogelijke verbeteringen aan μ -WK systemen. Om te weten welke van de in bovenstaand tornadodiagram geschetste parameters beïnvloed kunnen worden om de meerinvesteringsruimte te vergroten, is onderstaand diagram gemaakt.



Figuur 35 De invloed van beïnvloedbare parameters op de meerinvesteringsruimte van een SOFC μ -WK systeem in 1&2-persoons huishoudens.

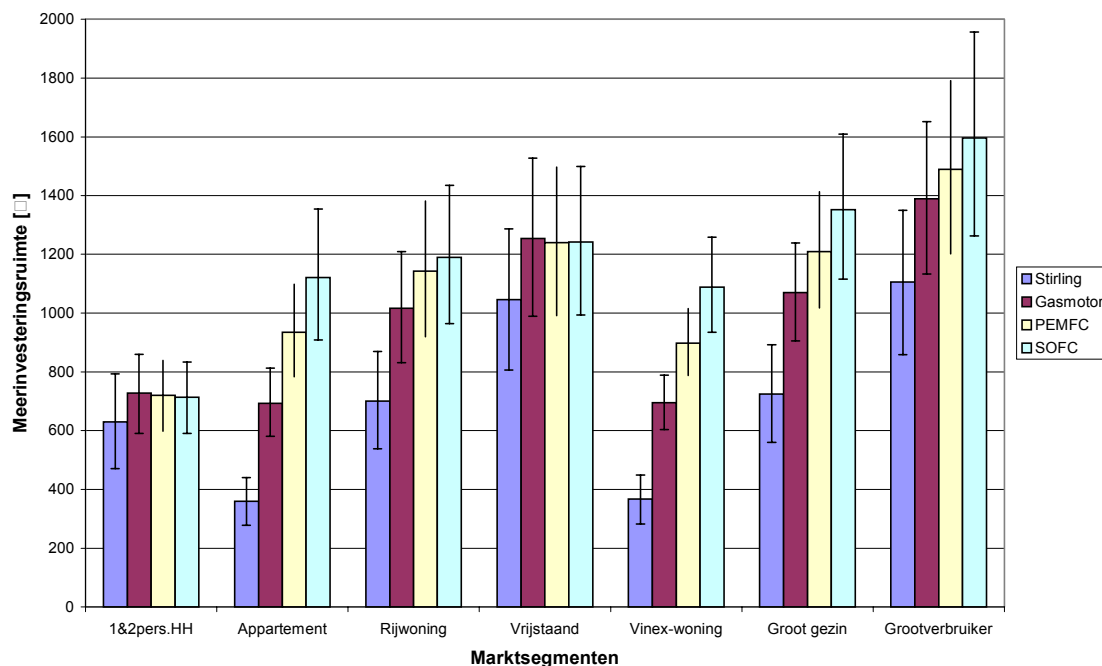
Als externe onzekerheidsfactoren weggelaten worden blijken er maar drie factoren er echt toe te doen. Het blijkt dat het totaalrendement en het rendement van de hulpbrander de belangrijkste invloedsfactoren zijn. De direct supply factor DSF komt pas op de derde plaats.

Duidelijk is dat externe factoren waarop men vanuit het μ -WK oogpunt geen invloed kan uitoefenen een grote invloed op de spreiding kunnen hebben. Daarom is in onderstaand figuur de spreiding voor de verschillende technieken in de beschouwde marktsegmenten weergegeven voor het geval dat de externe factoren constant zijn gemaakt.



Figuur 36 Spreiding in de resultaten van de meerinvesteringsberekeningen wanneer externe factoren constant worden gesteld.

Vergelijking met Figuur 33 toont dat de gemiddelde spreiding daalt van ruim 25% naar 19%. Ook is de spreiding in de meerinvesteringsruimte in het marktsegment 1&2-persoons huishoudens van dezelfde grootteorde geworden als die van de andere marktsegmenten. Deze aanpassing heeft geen invloed op de verwachtingswaarden van de meerinvesteringsruimten. De aangepaste meerinvesteringsruimten zijn getoond in Figuur 37.



Figuur 37 Meerinvesteringsruimtes met alleen spreiding in interne factoren.

5.6 Meerinvesteringsruimtes

De verwachtingswaarden voor de meerinvesteringsruimtes voor de verschillende technieken in de beschouwde marktsegmenten zijn samengevat in Tabel 14. De spreiding is getoond in Figuur 32. In Figuur 37 is de spreiding getoond zonder externe factoren.

Tabel 14 Verwachtingswaarden voor meerinvesteringsruimtes van de beschouwde technologieën in de verschillende marktsegmenten

	Stirling	Gasmotor	PEMFC	SOFC
1&2pers.HH	626	728	720	715
Appartement	355	683	930	1115
Rijwoning	697	1015	1139	1190
Vrijstaand	1043	1250	1242	1243
Vinex-woning	362	686	894	1087
Groot gezin	721	1068	1209	1352
Grootverbruiker	1101	1389	1490	1590

De Stirling zal vooral worden toegepast in de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker, waar de meerinvesteringsruimte bij een terugverdientijd (SPOT) van 5 jaar ongeveer 1050 euro kan bedragen. Een kanttekening die hierbij moet worden gemaakt is dat verwacht wordt dat voor de Stirling geen meerkosten voor het onderhoud verwacht worden ten opzichte van HR-ketels, wat betekent dat bij een SPOT van 10 jaar de particulier niet toelegt op de exploitatie. In principe zou dit een verdubbeling van de meerinvesteringsruimte kunnen betekenen. De vraag is echter of particulieren bereid zijn een dergelijke uitgave in één keer te doen.

Kansrijke marktsegmenten voor brandstofcellen zijn rijwoningen, vrijstaande woningen en grote gezinnen. De meerinvesteringsruimte voor PEMFC systemen kan hier ruim 1200 euro bedragen, en voor SOFC systemen 1250 euro. Appartementen vormen een extra marktsegment voor SOFC systemen, waar de meerinvestering ruim 1100 euro kan bedragen.

6. CONCLUSIES

In dit hoofdstuk zijn de voornaamste conclusies uit de voorgaande hoofdstukken samengevat.

6.1 Marginale kosten, opbrengsten en CO₂-reductie

1. De marginale kostprijs (MKP) per kWh_e van elektriciteit uit μ -WK per type is samengevat in Tabel 15.

Tabel 15 Marginale kostprijs van elektriciteit uit diverse typen μ -WK installaties, en CO₂ reductie

		Stirling	Gasmotor	PEMFC	SOFC
Elektrisch rendement	[-]	10%	20%	30%	40%
Totaal rendement ⁸	[-]	100%	95%	90%	85%
Thermisch rendement HR-ketel	[-]	100%			
Netto marginale kostprijs elektriciteit	€/kWh	4,9	6,2	6,6	6,8
Vermeden CO ₂	kg/kWh	0,41	0,36	0,35	0,34

2. De marginale kostprijs hangt vooral af van het totaalrendement van de μ -WK installatie.
3. De grootste financiële besparing voor de bewoner wordt behaald met het vermijden van inkoop van elektriciteit door het zo veel mogelijk direct benutten van de elektriciteit afkomstig van de μ -WK. De waarde van de geproduceerde elektriciteit is dan 16,6 €/kWh (inkoopprijs), de opbrengsten zijn dan gelijk aan het verschil tussen deze waarde en de marginale kostprijs uit Tabel 15.
4. Als de terugleververgoeding (waarde voor het energiebedrijf plus REB teruggave) lager is dan de marginale kostprijs zijn de opbrengsten negatief, en zal de consument in het geval van afwezigheid van elektriciteitsvraag de voorkeur geven aan warmteopwekking met de hulpketel. Dit is echter uit energiebesparingsoogpunt ongewenst.
5. Bij een elektrisch rendement boven 30% is de marginale kostprijs van elektriciteit zonder warmtebenutting lager dan de inkoopprijs. Dan wordt het financieel interessant om ook als er geen warmtevraag is elektriciteit te produceren voor eigen gebruik (vermeden inkoop), terwijl de warmte wordt geloosd. Zo lang het elektrisch rendement lager is dan dat van de centrale elektriciteitsopwekking is dit uit energiebesparingsoogpunt ongewenst.
6. De overheid verleent vrijstelling van REB op gas voor warmtekrachtinstallaties met een elektrisch rendement boven 30%, en meer dan 60 kW_e vermogen. Er wordt gepleit voor een zelfde REB vrijstelling voor micro warmtekracht, die ook voor lagere rendementen geldt. Maar dan wordt het “dumpen” van warmte interessant vanaf 20% elektrisch rendement. Verder werkt dit vooral in het voordeel van laag-E-rendement μ -WK, en het is een voor de overheid zeer dure CO₂ reductiemaatregel. Beter is de REB op gas te handhaven en bij teruglevering de REB op elektriciteit (gedeeltelijk) terug te geven. De marginale kostprijs is dan nog zodanig dat dumpen van warmte niet snel interessant is.
7. Gezien het voorgaande is financieel gezien de aanbevolen bedrijfsstrategie:
 - Elektriciteitsvraagvolgend, om maximale vermeden inkoop te genereren.
 - Tot en met een elektrisch rendement van 30% warmtevaaggelimeerd: elektriciteit inkopen als er geen warmtevraag is. Om milieuredenen is warmtevaaggelimeerdheid aanbevolen tot het elektrisch rendement van de μ -WK het parkrendement (\pm 42%) te boven gaat.
 - Als er geen elektriciteitsvraag is wordt de warmtevraag ingevuld met de hulpketel wanneer de terugleververgoeding lager is dan de marginale kostprijs van elektriciteit uit de μ -WK

⁸ Totaalrendement daalt met toenemend elektrisch rendement

- Als de terugleververgoeding wel hoger is dan de marginale kostprijs wordt de warmtevraag met de μ -WK ingevuld. Wel zal er worden getracht de warmtelevering te verschuiven naar momenten met eigen elektriciteitsvraag door middel van warmte-opslag.

6.2 Invloedsfactoren

De volgende factoren hebben grote invloed op de energiekostenbesparing van μ -WK systemen.

1. Direct gebruik en terugleververgoeding. Een hoog direct eigen gebruik van de door het μ -WK-systeem geproduceerde elektriciteit of een lage prijs voor tijdelijke “opslag” van elektriciteit op het net (verschil tussen terugleververgoeding en inkoopprijs van elektriciteit) zijn van doorslaggevend belang voor de economische haalbaarheid van μ -WK systemen in particuliere exploitatie. Wanneer beide laag zijn kan er zelfs sprake zijn van een energiekostenontsparring.
2. Type en nominaal vermogen. Voor gemiddelde elektriciteitsverbruiken is een nominaal elektrisch vermogen van een μ -WK systeem van 1 kW_e een goede keuze. Zo lang de investeringskosten van een μ -WK systeem afhangen van de systeemgrootte is het verstandig om bij afnemende elektriciteitsvraag voor kleinere systemen te kiezen, en omgekeerd.
3. Warmtevraag en type. Brandstofcel μ -WK systemen zijn minder gevoelig voor de hoogte van de warmtevraag dan Stirling, wat wordt geïllustreerd in Figuur 19. De Stirling daarentegen realiseert vergelijkbare energiekostenreducties als de brandstofcelsystemen in de marktsegmenten met een duidelijk bovengemiddelde gasvraag. In situaties met een extreem laag gasverbruik (woningen met EPC ≤ 1 , appartementen) zal de SOFC de hoogste energiekostenreductie behalen, omdat zijn rentabiliteit het minst van de gasvraag afhangt.

6.3 Energiekostenreducties van 1 kW_e μ -WK systemen in verschillende marktsegmenten

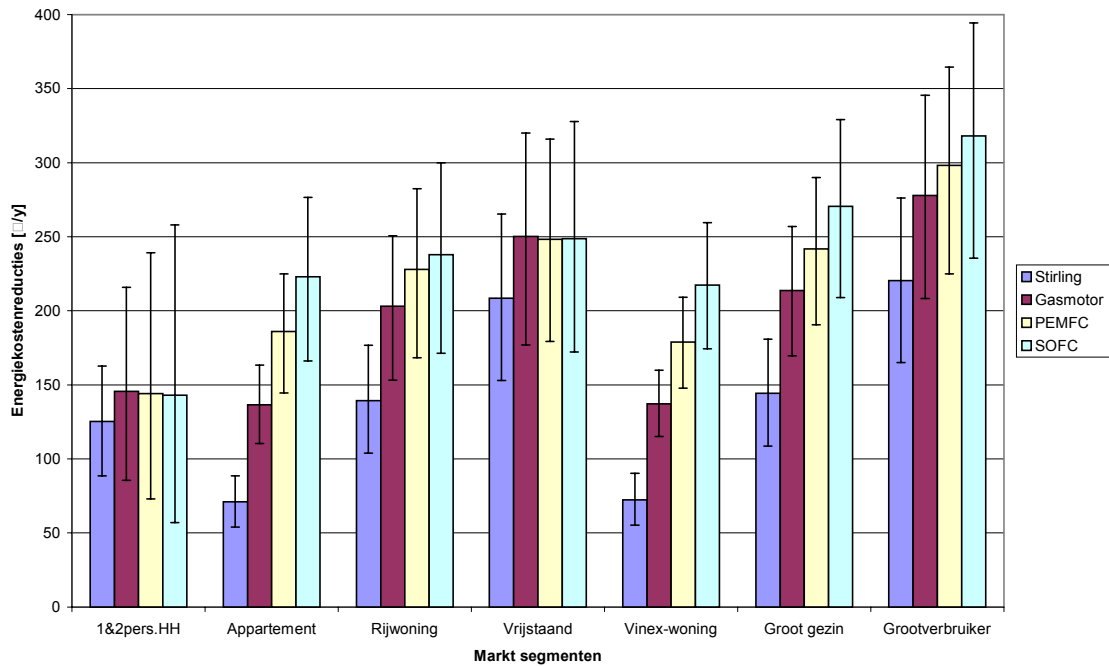
Uit analyses van energiekostenreducties per marktsegment bij variërende grootte en type blijkt dat een systeem van 1 kW_e in alle marktsegmenten redelijk tot goed voldoet. Om binnen de verschillende beschouwde marktsegmenten de μ -WK systemen te kunnen vergelijken zijn de gemiddeld te verwachten energiekostenreducties van 1 kW_e systemen bij elkaar in één figuur uitgezet.

In alle marktsegmenten wordt de grootste besparing behaald met SOFC μ -WK systemen. De besparingen van PEMFC systemen, en in een aantal segmenten ook de gasmotoren, blijven hier slechts iets bij achter. Bij een ten opzichte van de warmtevraag relatief lage elektriciteitsvraag (1&2-persoons huishouden, vrijstaand) vallen de verschillen tussen gasmotor, PEMFC en SOFC bijna weg, wat zou betekenen dat het in deze marktsegmenten niet veel uit maakt voor welk systeem men kiest.

De Stirling behaalt in alle marktsegmenten een lagere besparing dan de brandstofcellen. Bij een relatief lage elektriciteitsvraag (1&2-persoons huishouden, vrijstaand) is de besparing van de Stirling echter niet veel lager dan die van brandstofcellen. In de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker kan de Stirling zijn hoogste besparingen genereren. In marktsegmenten met een lage gasvraag (appartementen, vinex woningen) is de besparing van de Stirling zeer laag.

Omdat het te verwachten is dat de Stirling nog langere tijd goedkoper zal zijn dan brandstofcelsystemen, zal deze niet in de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker beconcurrereerd kunnen worden. Toepassing van brandstofcellen zal dan ook vooral in de marktsegmenten rijwoning en groot gezin moeten worden gezocht, waar de energiekostenreductie van de Stirling duidelijk lager is dan in de segmenten vrijstaand en grootverbruiker. Voor vinex woningen en appartementen lijkt de SOFC de beste kansen te hebben.

In absolute zin blijft voor alle technieken de besparing in het segment 1&2-persoons huishoudens achter bij de anderen. Alleen bij hoge terugleververgoedingen kan μ -WK hier interessant zijn, wat zichtbaar is in de grote onzekerheidsmarges in Figuur 38.



Figuur 38 Vergelijking van de energiekostenreducties van de beschouwde 1 kW_e technieken in de verschillende marktsegmenten in Euro per jaar.

6.4 Meerinvesteringsruimtes

De meerinvesteringsruimtes kunnen uit de energiekostenreducties worden bepaald door een terugverdientijd (SPOT, simple pay-out time) van 5 jaar aan te nemen.

De verwachtingswaarden voor de meerinvesteringsruimtes voor de verschillende technieken in de beschouwde marktsegmenten die dan ontstaan zijn samengevat in Tabel 16. De spreiding is getoond in Figuur 32. In Figuur 37 is de spreiding getoond zonder externe factoren.

Tabel 16 Verwachtingswaarden voor meerinvesteringsruimtes van de beschouwde technologieën in de verschillende marktsegmenten

	Stirling	Gasmotor	PEMFC	SOFC
1&2pers.HH	626	728	720	715
Appartement	355	683	930	1115
Rijwoning	697	1015	1139	1190
Vrijstaand	1043	1250	1242	1243
Vinex-woning	362	686	894	1087
Groot gezin	721	1068	1209	1352
Grootverbruiker	1101	1389	1490	1590

De Stirling zal vooral worden toegepast in de marktsegmenten vrijstaand en grootverbruiker, waar de meerinvesteringsruimte bij een terugverdientijd van 5 jaar ongeveer 1100 euro zou kunnen bedragen. Een kanttekening die hierbij moet worden gemaakt is dat voor de Stirling geen meerkosten voor het onderhoud worden verwacht ten opzichte van HR-ketels, wat betekent dat bij een SPOT van 10 jaar de particulier niet toelegt op de exploitatie. In principe

zou dit een verdubbeling van de meerinvesteringsruimte kunnen betekenen. De vraag is echter of de particulier bereid is een dergelijke uitgave in één keer te doen.

Kansrijke marktsegmenten die voor brandstofcellen overblijven zijn rijwoningen, vrijstaande woningen en grote gezinnen. In deze marktsegmenten is het relatieve verschil tussen Stirling en brandstofcellen groter dan in de eerstgenoemde twee segmenten. De meerinvesteringsruimte voor PEMFC systemen zou in deze drie segmenten ruim 1200 euro kunnen bedragen, en voor SOFC systemen 1250 euro. Appartementen en vinex woningen vormen een extra marktsegment voor SOFC systemen, waar de meerinvestering ruim 1100 euro zou mogen bedragen.

7. AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK

7.1 Nader onderzoek naar vermeden inkoop van elektriciteit

In dit rapport is gebleken dat de vermeden inkoop van elektriciteit van cruciaal belang is voor het creëren van een meerinvesteringsruimte. Een betere bepaling van de hoogte van het aandeel vermeden inkoop in het totale elektriciteitsverbruik (de avoided purchase factor APF) zou meer duidelijkheid over de meerinvesteringsruimte kunnen scheppen. Ook zouden mogelijkheden geïdentificeerd moeten worden waarmee de APF verhoogd zou kunnen worden. In deze paragraaf wordt uiteengezet hoe men de APF zou kunnen bepalen, en hoe men het effect van APF verhogende maatregelen zou kunnen kwantificeren.

7.1.1 Bepaling APF.

Bij de bepaling van een APF van een μ -WK systeem in een bepaald marktsegment kan bijvoorbeeld van TOPICS gebruik worden gemaakt. Hiervoor zijn vraagpatronen van warmte en elektriciteit nodig. Hiervoor kan de patronengenerator worden gebruikt, waar bij DEGO aan wordt gewerkt. Maar ook zijn de zogenaamde EBA patronen bruikbaar. Deze zijn beschikbaar bij Schoon Fossiel. Het probleem is dat deze een tijdsresolutie van 5 minuten hebben, waardoor de snelle belastingwisselingen, en de energie die hiermee gemoeid is, niet naar voren komen, en de APF te hoog zal uitvallen. Groot voordeel van de EBA patronen is dat elektriciteit en warmtevraagpatroon gecorreleerd zijn.

Door de tijdsresolutie een aantal malen te halveren kan een indruk worden verkregen of er een minimumwaarde van de APF is, en zo ja hoe veel.

7.1.2 Verhoging APF

Ook bij de bepaling van het effect van APF verhogende maatregelen kan TOPICS worden gebruikt. Hierbij wordt gedacht aan regelstrategieën, en toepassing van W- en/of E-opslag.

7.2 Naar kostentargets voor componenten.

De voorgaande hoofdstukken hebben geresulteerd in meerkostentargets voor complete systemen, inclusief BTW, installatiekosten, en marges voor tussenhandel. Vanuit deze targets zal in een volgend project worden getracht kostentargets voor deelsystemen en componenten te bepalen. In dit hoofdstuk wordt uiteengezet welke methode hiervoor kan worden gehanteerd.

7.2.1 Probleem.

Uit het voorgaande hoofdstuk is bekend wat de uiteindelijke consumentenkostprijs van het μ -WK systeem mag bedragen, afhankelijk van de verlangde terugverdientijd. Gezocht wordt echter naar targets voor de kostprijs van componenten waaruit het systeem is opgebouwd. Het probleem kan aldus worden gesplitst in een vertaling van de meerkostentargets naar een integraal systeemkostentarget, en een verdeling daarvan over de componenten. Probleem bij het laatste is hoe de targets te verdelen zodanig dat voor alle componenten een vergelijkbare onderzoeksinspanning nodig is.

7.2.2 Voorstel voor aanpak.

Uit de probleemstelling volgt al dat de vertaling naar componentenkostentargets in twee stappen kan verlopen:

1. Vertaling van de meerinvesteringsruimte voor de particulier naar een integraal systeemkostentarget.

2. Toerekening van het integrale systeemkostentarget naar de componenten.

Ad 1: hier kan de meerinvesteringsruimte worden verminderd met overige kosten zoals BTW, installatiekosten en marges voor fabrikant en tussenhandel. Voor deze verschillende kostenposten bestaan richtwaarden.

Ad 2: er kan worden uitgegaan van de huidige verdeling van de kosten over de componenten van prototypen, of van wat men nu zou begroten voor de bouw van een prototype. Vervolgens kan voor iedere component worden geschat wat het tempo is waarmee de kostprijs van de component per jaar daalt⁹. Hierbij kan wellicht gebruik worden gemaakt van Learning Curves. Zo kan voor ieder jaar in de toekomst een schatting worden gemaakt van de optelsom van alle componentenkostprijzen. Wanneer deze optelsom gelijk wordt aan het onder 1) bepaalde integrale kostprijs target (of kleiner) zijn de componenttargets bij min of meer gelijke R&D inspanning bekend.

LITERATUUR

Laag,P.C.v.d. and G.J.Ruijg (2002): *Micro-Warmtekrachtsystemen voor de energievoorziening van Nederlandse huishoudens*; ECN-C--02-006, Petten.

⁹ Voor zover betrekking hebbend op “specialties”. In massa gefabriceerde componenten zullen deze kostendaling niet meer vertonen.