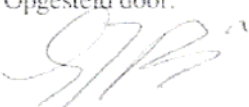
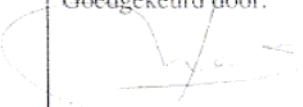
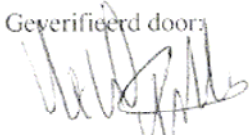
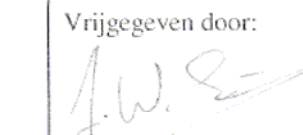


# OPTIMALE INZET VAN MICRO-WK SPANNINGSVELD TUSSEN ECONOMIE EN ECOLOGIE

Onderdeel van het basisproject kleinschalige  
 warmtekracht 2004

G.J. Ruijg

J.S. Ribberink

Revisies		
A		
B		
Opgesteld door:  G.J. Ruijg	Goedgekeurd door:  R.K.A.M. Mallant	ECN-Schoon Fossiel Werkeenheden: Systemen en Technologie- Assessments
Geverifieerd door:  M. Weeda	Vrijgegeven door:  J.W. Erisman	

December 2004

## Verantwoording

Dit rapport beschrijft de resultaten van het werk dat uitgevoerd is in het kader van het ECN projecten 7.0010 (Kleinschalige warmtekracht 2004).

## Abstract

The discrepancy between ecological and economical optimisation of privately owned PEM, SOFC and Stirling residential cogeneration systems has been assessed. In 2003 it is found that in case of (too) low or uncertain feed back tariffs, small electricity load following systems of about 1 kW<sub>e</sub> are economically optimal (Ruijg, Ribberink, 2004). However, half of the energy saving potential is not utilised. Ecologically optimal systems are larger, and produce more electricity than can be used in the household, so feed back is essential. Influences of size, heat or electricity storage, feed back tariffs and various control strategies have been taken in account. Finally, government instruments have been identified which can make the ecological optimal systems feasible.

## Trefwoorden

Microwarmtekracht, energiebesparing, CO<sub>2</sub>-reductie, rentabiliteit, energieopslag, regelstrategie, optimalisatie, terugleverprijs.

# INHOUD

LIJST VAN TABELLEN	4
LIJST VAN FIGUREN	5
SAMENVATTING	6
1. INLEIDING	9
2. PROBLEEMSTELLING	9
3. DOELSTELLING	9
4. AANPAK	10
5. LEESWIJZER	10
6. RESULTATEN	11
6.1 Maximale energiebesparing	11
6.1.1 Volledige warmtedekking	11
6.1.2 Gedeeltelijke warmtedekking	15
6.2 Micro- en macro-economische aspecten	16
6.2.1 Marginale kostprijs van elektriciteit uit micro-wk.	17
6.2.2 Benodigde vergoeding voor teruggeleverde elektriciteit.	17
6.2.3 Terugleverprijs	19
6.2.4 Mogelijkheden voor een terugleverprijs boven de marginale kostprijs	21
7. CONCLUSIES	28
BIJLAGE A BENODIGDE BUFFERGROOTTES BIJ VOLLEDIGE WARMTEDEKKING	30
A.1 Rechtstreekse warmtevraag	30
A.2 Warmtevraag als gevolg van optimaliserende regeling	32
A.3 Volledige dagbuffering	34
A.4 Patroonafhankelijkheid	34
BIJLAGE B SCHEMA TERUGGELEVERDE KWH, PARTICULIERE EXPLOITATIE	35
REFERENTIES	37

## LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1.1	<i>Potentiëlen voor primaire energiebesparing en CO<sub>2</sub>-emissiereductie van micro-wk opties in vergelijking met gescheiden opwekking van warmte in een HR-ketel, en elektriciteit in een aardgasgestookte STEG of een "gemiddeld park centrale".</i>	6
Tabel 6.1	<i>Karakteristieken van micro-wk technologieën (LHV)</i>	11
Tabel 6.2	<i>Maximale primaire energiebesparing door toepassing van micro-wk systemen, bij verschillende rendementen van de centrale elektriciteitsproductie (huishouden A).</i>	12
Tabel 6.3	<i>Vermogens, productie, vollasturen en besparingen door toepassing van micro-wk systemen, bij verschillende rendementen van de centrale elektriciteitsproductie en optimaliserende klokregeling (huishouden A).</i>	13
Tabel 6.4	<i>Vermogens, productie, vollasturen en besparingen bij volledige dagbuffering (huishouden A).</i>	14
Tabel 6.5	<i>Warmte dekking bij verschillende groottes van een PEM micro-wk systeem [kW<sub>e</sub>] en buffer [kg] (<math>\Delta T=20K</math>)</i>	16
Tabel 6.6	<i>Rendementen van micro-wk installaties en marginale kostprijs van elektriciteit uit micro-wk, incl. Energiebelasting en BTW</i>	17
Tabel 6.7	<i>Warmte dekking, PEbesparing en Energiekostenreductie(EKR) van PEM micro-wk systemen met verschillende vermogens en buffers, bij verschillende terugleverprijzen.</i>	18
Tabel 6.8	<i>Voorbeeld van termijnmarktprijzen [€/MWh]</i>	20
Tabel 6.9	<i>Gemiddelde APX prijzen [€/MWh]</i>	20
Tabel 6.10	<i>Percentage spotmarktprijzen boven MKP</i>	21
Tabel 6.11	<i>CO<sub>2</sub> index en gemiddelde blauwe stroom vergoeding voor verschillende micro-wk systemen.</i>	24
Tabel 6.12	<i>Resulterende stimulering per geproduceerde kWh in het geval van Energiebelasting vrijstelling van aardgas voor micro-wk</i>	25
Tabel 6.13	<i>Waarde van vermeden CO<sub>2</sub> van micro-wk.</i>	25
Tabel 6.14	<i>Bijstookfactor en bijbehorende Energiebelasting voor verschillende micro-wk systemen</i>	26
Tabel 7.1	<i>Energiebesparingspotentiëlen van micro-wk systemen bij verschillende referentierendementen en brandstofmix</i>	28
Tabel A.1	<i>Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van PEM (30%/60%)</i>	30
Tabel A.2	<i>Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van SOFC (40%/45%).</i>	30
Tabel A.3	<i>Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van Stirling (10%/90%) micro-wk</i>	31
Tabel A.4	<i>Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van HR-PEM (30%/70%) micro-wk.</i>	31
Tabel A.5	<i>Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van PEM (30%/60%) micro-wk met een optimaliserende regeling.</i>	32
Tabel A.6	<i>Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van SOFC (40%/45%) micro-wk met een optimaliserende regeling.</i>	32
Tabel A.7	<i>Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van Stirling (10%/90%) micro-wk met een optimaliserende regeling.</i>	33
Tabel A.8	<i>Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van HR-PEM (30%/70%) micro-wk met een optimaliserende regeling.</i>	33

Tabel A.9	<i>Verband tussen vermogen, additionele buffergrootte en warmte dekking van een PEM (30%/60%) micro-wk bij volledige dagbuffering.</i>	34
Tabel A.10	<i>Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van PEM (30%/60%) micro-wk, huishouden B.</i>	34
Tabel B.1	<i>Schema teruggeleverde kWh, huidige situatie (Scheepers, 2004)</i>	35
Tabel B.2	<i>Schema teruggeleverde kWh, gewenste situatie (Scheepers, 2004)</i>	36

## LIJST VAN FIGUREN

Figuur 6.1	<i>Vermogens en buffergroottes van micro-wk systemen met volledige warmte dekking door de micro-wk. Voor een verklaring van de curves "Pth" en "Pth+opt": zie tekst.</i>	14
Figuur 6.2	<i>Cumulatieve verdeling van APX spotmarktprijzen.</i>	21

## SAMENVATTING

In dit rapport worden de resultaten gepresenteerd van een analyse naar het spanningsveld tussen de economie en ecologie (energiebesparing en emissiereductie) van micro-warmtekrachtsysteem (micro-wk) in particuliere exploitatie.

Vanuit ecologisch standpunt zou men alle in een huishouden gevraagde warmte met een micro-wk willen opwekken, want dat leidt tot maximale energiebesparing, en daarmee tot maximale reductie van CO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-emissie. Hiervoor zijn systemen nodig met een thermisch vermogen dat in de richting gaat van dat van de huidige HR-ketels. Dit kan leiden tot systemen met een aanzienlijk elektrisch vermogen, zeker bij gebruik van technologieën met een hoog elektrisch rendement, zoals brandstofcellen. Dergelijke systemen genereren veel meer elektriciteit dan in het huishouden gebruikt kan worden. Voor maximale energiebesparing zou deze elektriciteit aan het net moeten worden geleverd. De economische waarde van deze elektriciteit kan echter zo laag zijn, dat de exploitant verlies lijdt op de productie voor teruglevering. Het is dan voordeliger voor de exploitant zijn warmtebehoefte met een (HR-)ketel te voldoen. Uit een studie naar economische optimalisatie binnen de huidige marktsituatie is naar voren gekomen dat een micro-wk systeem met een elektrisch vermogen van circa 1 kW<sub>e</sub> het meest aantrekkelijk lijkt (Ruijg, Ribberink, 2004). Met zo'n systeem kan echter slechts 50 tot 70% van de benodigde warmte worden geleverd via warmtekracht, waardoor het potentieel voor energiebesparing en CO<sub>2</sub> reductie niet volledig kan worden benut (Tabel 1.1).

In deze studie is onderzocht met welke combinatie van micro-wk systeem, warmtebuffer en regelstrategie de warmtevraag in een huishouden wél volledig zou kunnen worden gedekt. Hiertoe zijn simulaties uitgevoerd met behulp van gemeten vraagpatronen voor aardgas en elektriciteit van twee voor Nederland representatief geachte huishoudens. Deze patronen beslaan een heel jaar, met telkens 10 minuten tussen de opeenvolgende meetpunten. Het bleek dat volledige warmte dekking tot grote micro-wk systemen en/of zeer grote buffers leidt. Er is daarom gekozen voor verder onderzoek een gematigd formaat systeem te modelleren met een thermisch vermogen van 10 kW<sub>th</sub> en een buffer van 100 liter, waarmee meer dan 99% van de gevraagde warmte kan worden geleverd. De consequentie dat op sommige dagen de gewenste opwarmingsnelheid niet wordt gehaald wordt voor lief genomen, en met geavanceerde klokregelingen kan in de praktijk op zulke koude dagen worden geanticipeerd. De energiebesparing en CO<sub>2</sub>-reductie die met dergelijke micro-wk systemen kan worden behaald is voor verschillende referentiesituaties weergegeven in Tabel 1.1. De referentiesituaties hebben betrekking op de centrale elektriciteitsproductie. Met STEG wordt een elektrisch referentierendement bedoeld van 54%, inclusief netverliezen. Met Park wordt 42% inclusief netverliezen bedoeld, en de CO<sub>2</sub> emissie wordt betrokken op de gemiddelde brandstofmix. Ter vergelijking zijn onder "maximaal economisch voordeel" ook de besparingspotentiëlen weergegeven voor 1 kW<sub>e</sub> systemen (Ruijg, Ribberink, 2004).

Tabel 1.1 *Potentiëlen voor primaire energiebesparing en CO<sub>2</sub>-emissiereductie van micro-wk opties in vergelijking met gescheiden opwekking van warmte in een HR-ketel, en elektriciteit in een aardgasgestookte STEG of een "gemiddeld park centrale".*

	Maximaal ecologisch voordeel				Maximaal economisch voordeel			
	STEG		Park		STEG		Park	
Micro-wk optie ( $\eta_e/\eta_{th}$ )	Energie	CO <sub>2</sub>	Energie	CO <sub>2</sub>	Energie	CO <sub>2</sub>	Energie	CO <sub>2</sub>
Stirling (10/90%)	8%	8%	12%	18%	8%	8%	12%	18%
PEM (30/60%)	13%	13%	24%	37%	6%	6%	12%	20%
SOFC (40/45%)	16%	16%	29%	43%	6%	6%	12%	21%

Hieruit blijkt dat voor brandstofcelsystemen een groot besparingspotentieel zou blijven liggen wanneer teruglevering naar het net niet mogelijk, of economisch verliesgevend zou zijn. Omdat de 1 kW<sub>e</sub> Stirlingsystemen vanwege hun hoge W/K verhouding al een groot deel van de warmtevraag kunnen dekken, verschilt het besparingspotentieel van maximaal ecologisch en economisch voordeel niet veel.

Vervolgens is de economie van dergelijke elektriciteit terugleverende systemen onderzocht. Een particuliere exploitant van een bestaand micro-wk systeem zal zeker geen elektriciteit terug gaan leveren wanneer de gaskosten voor een teruggeleverde kilowattuur hoger zijn dan de prijs die hij voor een kilowattuur krijgt. De gaskosten per kilowattuur wordt de marginale kostprijs genoemd, en varieert bij de huidige energieprijzen van 5,4 €/kWh voor Stirling en HR-PEM, tot 7,4 €/kWh voor SOFC. Er is bepaald dat om een particuliere exploitant te verleiden tot investering in een zwaarder systeem dan alleen voor eigen gebruik, een terugleverprijs van ruim boven de 10 €/kWh nodig is.

Naast de particuliere exploitant zijn energiebedrijven en de overheid betrokken partijen bij teruglevering van elektriciteit uit micro-wk. Energiebedrijven zijn betrokken omdat zij de teruggeleverde elektriciteit kunnen afnemen en doorverkopen aan anderen. De overheid is betrokkene omdat micro-wk bijdraagt aan de overheidsdoelstellingen voor energiebesparing, CO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-reductie. Er wordt verwacht dat energiebedrijven niet bereid zullen zijn meer dan 90% te betalen van de prijs van elektriciteit op de termijnmarkt, vanwege de administratieve lasten die gepaard gaan met de inkoop van vele verschillende aanbieders, en (enige) onzekerheid omtrent het tijdstip waarop elektriciteit wordt geleverd. Gezien een gemiddelde termijnmarkt prijs voor dagstroom van 5,6 €/kWh kan van de kant van energiebedrijven niet meer dan 5 €/kWh worden verwacht. De overheid moet daarom bepalen of ze bereid is het gat van meer dan 5 €/kWh te dichten. De mogelijkheden daarvoor moeten worden gezocht in het bestaande beleidsinstrumentarium, zoals Energiebelasting EB, milieukwaliteit elektriciteitsproductie MEP, of energiepriemieregeling EPR. Vooral nog lijkt een MEP-achtige vergoeding op teruggeleverde elektriciteit de aangewezen route boven bijvoorbeeld een Energiebelasting vrijstelling op ingekocht aardgas.





## 1. INLEIDING

Eén van de voornaamste bevindingen uit het Engine-micro-wk werk 2003 is dat in een particulier exploitatie scenario de economisch meest optimale regelstrategie vooralsnog niet overeenkomt met de ecologisch meest optimale regelstrategie (Ruijg, Ribberink, 2004). De economisch meest optimale strategie was alleen produceren voor eigen elektriciteitsverbruik, en niet terugleveren.

In dit rapport worden de resultaten beschreven van een onderzoek naar een gewenste verandering van de randvoorwaarden voor micro-wk, zo dat de ecologisch meest voordelige regelstrategie ook economisch de meest voordelige wordt. Met andere woorden: hoe kan de consument worden verleid een micro-wk systeem aan te schaffen, waarmee hij meer elektriciteit produceert dan hij zelf kan gebruiken, en er extra energiebesparing wordt behaald?

## 2. PROBLEEMSTELLING

Het optimale vermogen van de brandstofcel wordt bepaald door de balans tussen enerzijds een zo groot mogelijke dekking van de eigen elektriciteitsbehoefte en anderzijds een zo minimaal mogelijke elektriciteitsexport naar het net (Ruijg, Laag, 2003). De fluctuaties in zowel warmte- als elektriciteitsvraag in een huishouden zijn evenwel bijzonder groot. Het ontwerpen van een systeem dat deze fluctuaties zowel in omvang als in tijd kan volgen is niet haalbaar. Onder de huidige randvoorwaarden moet een substantieel deel van de warmtevraag van de woning door de piekbrander ingevuld worden. De energiebesparing en emissiereductie van het micro-wk systeem ligt daardoor beduidend lager dan wanneer er een grote brandstofcel toegepast zou worden, die zou voorzien in de totale warmtebehoefte van het huishouden en daarbij zowel de elektriciteitsbehoefte van het eigen huishouden, als die van één of enkele burens zou kunnen dekken. De potentie van de brandstofceltechnologie wordt nu nog niet goed zichtbaar.

Onder de huidige economische randvoorwaarden (tarieven gas en elektriciteit, terugleverprijs, etc.) bestaat het economisch meest rendabele brandstofcel micro-wk systeem uit de combinatie van een relatief kleine brandstofcel en een grote piekbrander.

## 3. DOELSTELLING

Doel van dit project is zichtbaar maken dat de potentie voor energiebesparing en emissiereductie van micro-wk ten gevolge van de huidige economische randvoorwaarden maar ten dele benut wordt, en voorstellen doen ter verbetering deze situatie.

## 4. AANPAK

Het realiseren van bovengenoemde doelstelling is de volgende wijze aangepakt:

- Het bepalen van de maximale energiebesparing bij optimale inzet van micro-wk brandstofceltechnologie. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van bij ECN aanwezige patronen voor de vraag naar gas en elektriciteit van een zestal voor de Nederlandse situatie representatief geachte huishoudens. Een van de belangrijkste parameters in deze optimalisatie is de vermogensgrootte van de brandstofcel, maar ook aspecten als eisen aan de brandstofcellen (b.v. load following gedrag) en de combinatie met warmteopslag komen aan de orde.
- Het identificeren van de hiervoor noodzakelijke veranderingen in de tarievenstructuur en eventueel de regelgeving.

## 5. LEESWIJZER

In dit rapport wordt eerst de maximaal mogelijke energiebesparing behandeld (6.1). Vervolgens wordt gekeken naar de technische haalbaarheid van de maximale besparing, of buffer en/of brandstofcel niet fysiek te groot worden voor toepassing in een huishouden (6.1.1). Dan wordt een praktisch haalbare grootte van het systeem bepaald (6.1.2).

Micro en macro economische aspecten van micro-wk worden daarna onderzocht met de marginale kostprijs als uitgangspunt (6.2.1), waarmee benodigde prijzen voor teruggeleverde elektriciteit worden bepaald (6.2.2). Tenslotte worden mogelijkheden geïdentificeerd om deze terugleverprijzen te realiseren (6.2.4).

## 6. RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de analyses van maximale energiebesparing beschreven, alsmede de veranderingen in de tarievenstructuur die hiervoor nodig worden geacht.

### 6.1 Maximale energiebesparing

Met micro-wk wordt de maximale energiebesparing bereikt wanneer alle warmte door het micro-wk systeem wordt geleverd, en de inzet van de hulpketel niet nodig is. Dit is uiteraard het geval wanneer het thermisch vermogen van het micro-wk systeem het maximaal gevraagde thermisch vermogen overtreft. Maar 100% levering door het micro-wk systeem is ook mogelijk bij lagere thermische vermogens, wanneer warmte gebufferd wordt. Voordelen daarvan zijn dat het systeem kleiner en daarmee goedkoper kan worden, en dat de eisen aan de regelbaarheid van het systeem afnemen.

#### 6.1.1 Volledige warmtedekking

Om een schatting te maken welke combinaties van buffergrootte en thermisch vermogen tot 100% levering kunnen leiden, zijn simulaties uitgevoerd met behulp van twee sets van gemeten vraagpatronen voor warmte en elektriciteit. Deze patronen zijn ontleend aan een dataset die bij ECN beschikbaar is, en die is verkregen door metingen bij huishoudens gedurende twee jaren. De beide gebruikte patronen betreffen rijwoningen. Huishouden A verbruikt per jaar 1870 m<sup>3</sup> aardgas en 3260 kWh elektriciteit, wat ongeveer overeenkomt met het landelijk gemiddelde. Huishouden B verbruikt 2280 m<sup>3</sup> aardgas en 2200 kWh elektriciteit per jaar. Dit patroon is gekozen als vergelijking, om patroonafhankelijkheid van de bevindingen te onderzoeken. Het betreft een huishouden van één persoon, die veel thuis is.

Er is een Excel-model ontwikkeld, waarmee kan worden bepaald bij welke thermische vermogens volledige dekking wordt verkregen. Vervolgens is onderzocht welke buffergrootte nodig is om zo groot mogelijke dekking door het micro-wk systeem te handhaven bij steeds kleiner thermisch vermogen van de micro-wk. De resultaten zijn weergegeven in bijlage A. De rendementen van de verschillende beschouwde micro-wk systemen zijn weergegeven in Tabel 6.1.

Tabel 6.1 *Karakteristieken van micro-wk technologieën (LHV)*

Technologie	Elektrisch rendement	Thermisch rendement	Totaal rendement
Stirling	10%	90%	100%
PEM	30%	60%	90%
PEM-HR	30%	70%	100%
SOFC	40%	45%	85%

Voor het rendement van een (eventuele) hulpketel wordt 100% aangehouden. Dit is ook het rendement van de ketel die in het referentiegeval de volledige warmtevraag dekt.

Met Stirling wordt een vrije zuiger Stirling micro-wk systeem bedoeld, zoals er één van 1 kW<sub>e</sub> door Enatec (ECN) wordt ontwikkeld. Doordat de technologie is gebaseerd op de HR-ketel, waaraan een Stirling motor wordt toegevoegd, is het totaalrendement hiermee vergelijkbaar. Andere ontwikkelaars van Stirling micro-wk systemen zijn Microgen, een dochter van British Gas, die ook een vrije zuiger Stirling machine ontwikkelt, en Whispertech uit Nieuw-Zeeland, die een kinematisch (dus niet-vrije zuiger, de beweging wordt mechanisch gestuurd) systeem heeft ontwikkeld.

PEM is een micro-wk systeem, gebaseerd op Proton Exchange Membrane brandstofcellen. Dit zijn lage temperatuur ( $\pm 70$  °C) brandstofcellen, die waterstof als brandstof nodig hebben. Daarom worden deze systemen uitgerust met een brandstofvoorbereider, die aardgas

transformeert tot een waterstofrijk gas. Bij dergelijke systemen mag op een elektrisch rendement rond 30% worden gerekend. Voor een totaal rendement van 90% is een voorschot op de toekomst genomen, momenteel wordt 85% als ontwikkeldoel aangehouden. In Europa ontwikkelt Vaillant een 4.7 kW<sub>e</sub> systeem, in Japan is een honderdtal veldtesten gaande. PEM-HR is een virtueel systeem dat is geïntroduceerd om het positieve effect van een hoog totaalrendement te illustreren.

SOFC is een micro-wk systeem dat is gebaseerd op vast oxide (Solid Oxide) brandstofcellen, waarin op hoge temperatuur (900 °C, mogelijk dalend naar 600 °C) aardgas rechtstreeks als brandstof kan worden gebruikt. SOFC technologie verkeert in een vroeg stadium van ontwikkeling. Er wordt een hoog elektrisch rendement van verwacht, omdat brandstofvoorbereiding achterwege kan blijven, of op restwarmte kan worden gebaseerd. Een 100 kW<sub>e</sub> proefinstallatie in Duiven-Westervoort liet zelfs een elektrisch rendement van 50% zien. Vanwege een grote overmaat lucht, nodig voor koeling van de brandstofcellen, wordt verwacht dat het totaalrendement wat achter zal blijven bij de andere typen micro-wk systemen. Sulzer-Hexis is momenteel de enige ontwikkelaar van SOFC micro-wk systemen, met een honderdtal veldtestvaardige systemen.

De besparingen die maximaal kunnen worden behaald met deze micro-wk systemen zijn berekend met behulp van de patronen, door een micro-wk systeem aan te nemen dat een thermisch vermogen heeft dat even hoog is als het hoogst voorkomende vermogen in het patroon. Ook kunnen de besparingen dan rechtstreeks uit de rendementen worden berekend op basis van de jaarvragen naar elektriciteit en warmte. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 6.2. Het effect van het rendement van de centrale elektriciteitsproductie, het parkrendement, is onderzocht voor 42% (het huidige gemiddelde) en 54%. Dit laatste rendement is de best beschikbare technologie op dit moment (57,5%), inclusief netverliezen, en wordt aangehouden als referentierendement in de subsidieregeling Milieukwaliteit Elektriciteitsproductie (MEP). Aangezien het hier gasgestookt vermogen betreft is de CO<sub>2</sub> reductie gelijk aan de primaire energie besparing. 42% is het huidige gemiddelde rendement van centrale elektriciteitsproductie in Nederland (dat door de jaren heen kan fluctueren). Het wordt als referentierendement aangehouden in de Energie Prestatie Normering (EPN) en de Energiepremieregeling EPR. De CO<sub>2</sub> reductie is hier groter en apart vermeld, omdat een deel van de elektriciteit met kolen wordt geproduceerd. Voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de brandstofmix van de centrale elektriciteitsopwekking wordt uitgegaan van 77 kg/GJ<sub>PE</sub> (Ruijg, Laag, 2003)

Tabel 6.2 *Maximale primaire energiebesparing door toepassing van micro-wk systemen, bij verschillende rendementen van de centrale elektriciteitsproductie (huishouden A).*

Centraal rendement	Elektrisch vermogen kW <sub>e</sub>	Vollast uren(eq) h/y	E-productie kWh/y	PE-besparing 54%	CO <sub>2</sub> -reductie 54%	PE-besparing 42%	CO <sub>2</sub> -reductie 42%
Stirling	2.4	760	1809	8%	8%	12%	18%
PEM	10.7	760	8142	13%	13%	24%	37%
PEM-HR	9.2	760	6979	20%	20%	29%	40%
SOFC	19.0	760	14475	16%	16%	29%	43%

De elektriciteitsopbrengst is ontleend aan de warmtevraag van huishouden A. De volgende dingen vallen op:

1. De bij huishouden A behorende elektriciteitsvraag is 3260 kWh/y, zodat alle systemen behalve de Stirling hoe dan ook aan het net terug moeten leveren. De SOFC produceert zelfs meer dan vier maal de eigen behoefte.
2. De Stirling haalt de laagste besparing. Vanwege zijn W/K verhouding van 9 is de elektrische opbrengst duidelijk lager dan de anderen, zodat er minder centrale elektriciteitsproductie vermeden wordt.

3. Het aantal equivalente vollasturen bedraagt slechts 760 uur per jaar, waar een 1 kW<sub>e</sub> elektriciteitsvraagvolgend brandstofcel systeem bijna 3000 equivalente vollasturen haalt (Ruijg, Ribberink, 2004).
4. Uit de verschillen tussen de “normale” PEM en de PEM-HR blijkt het belang van het thermisch rendement.
5. Bij een parkrendement van 42% ontlopen de besparingen van SOFC en PEM-HR elkaar niet veel, en kan de besparing oplopen tot 29%.
6. Het lagere totaalrendement van de SOFC wordt gecompenseerd door het hogere elektrische rendement, wat vooral bij laag centraal rendement van invloed is. Het CO<sub>2</sub> reductiepotentieel is dan nog groter, en kan oplopen tot boven 40%.

De maximaal bereikbare besparingspercentages zijn onafhankelijk van het patroon, wat ook blijkt uit vergelijking van tabel A.1 en A.10. De benodigde vermogens, buffergroottes en equivalente vollasturen verschillen echter, en zijn zonder patronen niet te bepalen.

De beschouwde patronen zijn ontstaan als gevolg van een ouderwetse ketelregeling: een handbediende aan/uit kamerthermostaat. Moderne klokthermostaten zijn uitgerust met optimalisatie: ze anticiperen op de voorgeprogrammeerde thermostaatstanden, en regelen modulerend. De ketel wordt zo veel eerder gestart als nodig om op het geprogrammeerde tijdstip de gewenste temperatuur bereikt te hebben, en hierbij wordt het vermogen teruggeregeld om een hoger rendement te bereiken. In deze analyse is getracht deze effecten te reconstrueren door niet real time te simuleren, maar de warmtevraag twee uur vooruit te middelen. Met tapwater wordt hiermee wel een fout geïntroduceerd: anders dan een optimaliserende ketelregeling moet tapwater achteruit gemiddeld worden. Aangezien het gebruikte patroon geen onderscheid tussen ruimteverwarming en tapwater kent, en tapwater de kleinste component in de warmtevraag is, is er voor gekozen het gehele patroon twee uur vooruit te middelen. Hierdoor is een faseverschuiving van ongeveer een uur geïntroduceerd. Het resultaat van deze middeling is dat het maximaal gevraagde thermisch vermogen lager wordt. De resulterende elektrische vermogens en vollasturen zijn weergegeven in Tabel 6.3.

Tabel 6.3 *Vermogens, productie, vollasturen en besparingen door toepassing van micro-wk systemen, bij verschillende rendementen van de centrale elektriciteitsproductie en optimaliserende klokregeling (huishouden A).*

	Elektrisch vermogen kW <sub>e</sub>	Vollast uren(eq) h/y	E-productie kWh/y	PE-besparing 54%	CO <sub>2</sub> -reductie 54%	PE-besparing 42%	CO <sub>2</sub> -reductie 42%
Centraal rendement							
Stirling	1.7	1085	1809	8%	8%	12%	18%
PEM	7.5	1085	8142	13%	13%	24%	37%
HR-PEM	6.4	1085	6979	20%	20%	29%	40%
SOFC	13.3	1085	14475	16%	16%	29%	43%

De benodigde vermogens van de micro-wk systemen nemen af, en daarmee neemt het aantal equivalente vollasturen toe. De maximale besparingspercentages blijven gelijk.

Bovenstaande bevindingen zijn gebaseerd op berekeningen met systemen met voldoende vermogen om het hoogst gevraagde thermisch vermogen te leveren. In vervolg hierop is onderzocht of volledige warmtedekking bij lagere vermogens mogelijk is, en hoe groot de warmtebuffer dan zou moeten zijn.

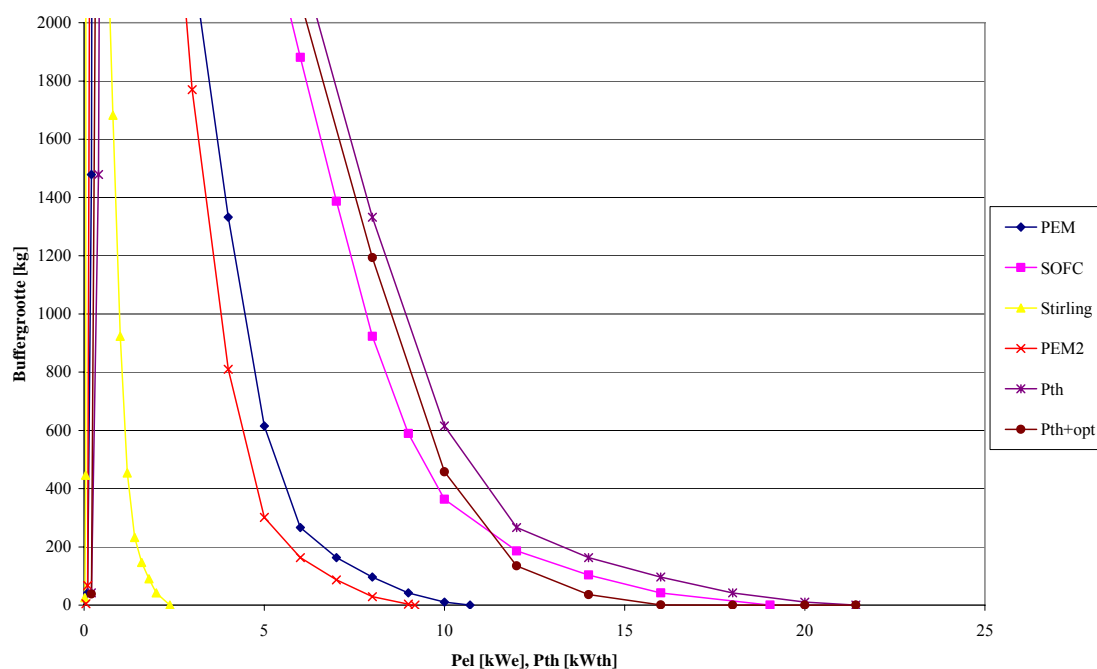
In bijlage A.3 is tegenover de hierboven beschouwde bufferloze micro-wk systemen die in staat zijn het hoogst gevraagde vermogen te leveren het andere uiterste geanalyseerd, namelijk volledige dagbuffering. Hiertoe zijn de waarden van de 10 minuten patronen gemiddeld over 24 uur. Effectief is dus gerekend met etmaalgemiddelde vermogens. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 6.4.

Tabel 6.4 *Vermogens, productie, vollasturen en besparingen bij volledige dagbuffering (huishouden A).*

Centraal rendement	Elektrisch vermogen kW <sub>e</sub>	Vollast uren(eq) h/y	E-productie kWh/y	PE-besparing 54%	CO <sub>2</sub> -reductie 54%	PE-besparing 42%	CO <sub>2</sub> -reductie 42%
Stirling	0.6	3037	1809	8%	8%	12%	18%
PEM	2.7	3037	8142	13%	13%	24%	37%
HR-PEM	2.3	3037	6979	20%	20%	29%	40%
SOFC	4.8	3037	14475	16%	16%	29%	43%

Het resultaat is dat het benodigde vermogen voor 100% warmtedekking van bijvoorbeeld een PEM met een factor 4 daalt tot 5.4 kW<sub>th</sub>. Het aantal equivalente vollasturen stijgt tot 3000. Uiteraard blijft het besparingspercentage hetzelfde. Uit tabel A.5 (en ook uit de hierna gepresenteerde Figuur 6.1) kan worden afgelezen dat voor volledige dagbuffering met 6 kW<sub>th</sub> en optimaliserende regeling een buffer nodig is van meer dan 2 m<sup>3</sup>, wat betekent dat volledige dagbuffering zeer moeilijk te realiseren is.

Vervolgens is voor vele vermogens oplopend tot de hiervoor berekende vermogens bij geen buffering het verband tussen elektrisch vermogen en benodigde buffergrootte berekend voor de verschillende onderzochte micro-wk systemen en huishouden A. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 6.1. Deze figuur geldt voor een buffertemperatuurverschil tussen vol en leeg van 20 K. Bij andere temperatuurverschillen kan de buffergrootte worden aangepast. Zo kan bij 40 K temperatuurverschil de buffer half zo groot worden.



Figuur 6.1 *Vermogens en buffergroottes van micro-wk systemen met volledige warmtedekking door de micro-wk. Voor een verklaring van de curves "Pth" en "Pth+opt": zie tekst.*

Bij afnemend vermogen zal de benodigde buffergrootte toenemen, tot maximaal bijna 5000 kWh. Bij een temperatuurverschil van 20 K komt dit overeen met 210 m<sup>3</sup>, wat een wel zeer grote buffer betekent. Het bijbehorende thermisch vermogen van de micro-wk is 1,9 kW<sub>th</sub>. De micro-wk werkt dan continu op vol vermogen. Verschillen in vraag en aanbod van warmte worden dan met seizoensbuffering opgevangen. Beneden dit vermogen is de micro-wk niet

meer in staat alle gevraagde warmte te produceren. De hulpbrander wordt noodzakelijk, en tegelijkertijd daalt de buffergrootte die nodig is om alle geproduceerde warmte op te slaan.

Ter vergelijking is ook het verband tussen thermisch vermogen en benodigde buffergrootte weergegeven ( $P_{th}$  in Figuur 6.1). Dit is voor alle systemen hetzelfde, omdat het steeds gaat om de vraag of het thermische vermogen van het micro-wk systeem voldoende is om het momentaan gevraagde thermisch vermogen te voldoen. Als er geen buffer is, heeft huishouden A 22 kW thermisch vermogen nodig. De warmte/kracht verhouding van het gekozen micro-wk systeem bepaalt dan het benodigde elektrisch vermogen. Bij een buffer van 200 kg daalt het benodigde thermisch vermogen naar 13 kW<sub>th</sub>. Omgekeerd kan worden afgelezen dat een 5 kW<sub>e</sub> PEM systeem, dat dan een thermisch vermogen van 10 kW<sub>th</sub> heeft, voor volledige warmte dekking een buffer van 600 kg nodig heeft.

Tenslotte is in Figuur 6.1 middels de lijn voor  $P_{th+opt}$  het verband weergegeven tussen benodigd vermogen en buffergrootte bij toepassing van een optimaliserende regeling. Er is te zien dat de voor volledige dekking benodigde buffergrootte in het voor deze analyse interessante gebied (tot 5 kWh<sub>th</sub> buffering = 200 kg) tot 3½ kWh<sub>th</sub> kleiner wordt. Bij 20 K temperatuurverschil betekent dit een 130 à 160 kg lichtere buffer. Evenzo daalt het benodigde thermische vermogen bij dezelfde buffergrootte met ongeveer 2 kW<sub>th</sub>.

In deze beschouwing is er van uitgegaan dat een systeem in staat is de belastingwisselingen volledig te volgen. Wanneer een warmtebuffer aanwezig is zal dit geen probleem zijn, zolang de buffer niet leeg is. Er wordt verondersteld dat de door deze vereenvoudiging geïntroduceerde afwijkingen klein zijn.

Uit deze beschouwingen kan in het algemeen worden geconcludeerd dat volledige warmte dekking vanuit de micro-wk niet praktisch is. Het streven naar volledige warmte dekking leidt óf tot zeer grote vermogens, en bijbehorend lage bedrijfstijden, óf tot zeer grote buffers.

### 6.1.2 Gedeeltelijke warmte dekking

In de voorgaande paragraaf is geconcludeerd dat volledige warmte dekking in bestaande woningen niet haalbaar is zonder zeer grote micro-wk systemen of buffers te installeren. De vraag is nu of een systeem met minder vermogen of een kleinere buffer ook kan voldoen. Om het effect te kunnen bepalen is in Tabel 6.5 de warmte dekking van huishouden A weergegeven als resultaat van verschillende groottes van PEM micro-wk systeem en warmtebuffer.

Hierbij is van 20 Kelvin temperatuurverschil tussen lege en volle buffer uitgegaan. Ter vergelijking is ook het thermisch vermogen weergegeven. Te zien is dat voor thermische vermogens vanaf ongeveer 10 kW<sub>th</sub> en 100 kg buffer de afgeronde waarde van de warmte dekking al niet meer van 100% valt te onderscheiden. Dus voor de laatste halve procent dekking moet zeer veel extra vermogen of buffercapaciteit worden toegevoegd. Op basis van deze tabel en de aanname dat met een betere (optimaliserende klokthermostaat-) regeling een dekking van (afgerond) 99% voldoende zal zijn, wordt voor het vervolg van het project een PEM micro-wk systeem gekozen van 5 kW<sub>e</sub>, met een 100 liter waterbuffer. Zo'n systeem levert meer dan 8000 kWh elektriciteit, zodat er zeker zal moeten worden teruggeleverd.

Tabel 6.5 Warmte dekking bij verschillende groottes van een PEM micro-wk systeem [ $kW_e$ ] en buffer [kg] ( $\Delta T=20K$ )

Vermogen buffer [kg]											
$kW_e$	$kWh$	2153	1033	344	172	86	43	22	10	0	
10	20	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
9	18	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
8	16	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
7	14	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
6	12	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
5	10	100%	100%	100%	100%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
4	8	100%	100%	99%	97%	96%	95%	95%	95%	95%	95%
3	6	100%	99%	92%	89%	87%	86%	85%	85%	85%	85%
2	4	98%	90%	77%	72%	70%	69%	68%	68%	68%	68%
1	2	72%	69%	56%	51%	49%	47%	47%	46%	46%	46%
0.5	1	45%	44%	42%	38%	35%	33%	32%	32%	31%	31%
0.25	0.5	26%	26%	26%	26%	24%	23%	22%	21%	20%	20%
0.1	0.2	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	10%	10%

In het voorgaande is bepaald dat bij een referentierendement van de centrale elektriciteitsproductie van 54% een PEM systeem met volledige warmte dekking 13% energiebesparing realiseert. Een lagere warmte dekking betekent minder energiebesparing. Zo behaalt een 1  $kW_e$  PEM systeem in warmtevraagvolgend bedrijf een warmte dekking van 46% en een besparing van 8%. In elektriciteitsvraagvolgend bedrijf loopt dit zelfs terug tot 26% en 5% (Ruijg, Ribberink, 2004). Uit besparingsoogpunt verdienen daarom grotere systemen, die naast dekking van eigen verbruik ook terugleveren aan het net, de voorkeur boven systemen die worden gedimensioneerd op eigen elektriciteitsvraag. In de volgende paragraaf zal worden onderzocht hoe een exploitant van een micro-wk systeem verleid zou kunnen worden tot teruglevering, en beter nog: de installatie van een groter systeem dan 1  $kW_e$ .

## 6.2 Micro- en macro-economische aspecten

Investeringsruimte voor micro-wk wordt gecreëerd door besparing op de jaarlijkse energierekening. Deze wordt bepaald door het saldo van vermeden inkoop van elektriciteit, plus de prijs die wordt ontvangen voor teruggeleverde elektriciteit, minus de extra aardgasinkoop. Deze laatste noemen we hier terugleverprijs. Van deze posten kent de vermeden inkoop van elektriciteit de hoogste prijs per eenheid, namelijk ongeveer 17 €/kWh. Het ligt daarom voor de hand om in een particulier exploitatiescenario te proberen de vermeden inkoop te maximaliseren. Dit kan worden bereikt door een micro-wk systeem elektriciteitsvraagvolgend te bedrijven. In 2003 is berekend dat hiermee jaarlijks twee à driehonderd euro op de energierekening kan worden bespaard<sup>1</sup>, en dat het in geval van een PEM systeem leidt tot minimaal 7% energiebesparing (Ruijg, Ribberink, 2004). In paragraaf 6.1 is aangetoond dat een hogere energiebesparing mogelijk is. Deze hogere energiebesparing zal slechts gerealiseerd kunnen worden door teruglevering van elektriciteit aan het net. In de volgende paragrafen wordt onderzocht wat nodig is om de particuliere exploitant tot teruglevering, of liever nog het installeren van een groter systeem te verleiden.

<sup>1</sup> Hierbij is er van uit gegaan dat er geen Energiebelasting wordt betaald over de kilowatturen die rechtstreeks in het huishouden worden gebruikt. Volgens de huidige regels zou dat wel moeten (Postbus 51, 2004). Dan zou echter twee maal belasting worden betaald: bij de aankoop van het gas, en bij de benutting van de stroom. Wij gaan er van uit dat de regelgeving hoe dan ook zó wordt aangepast dat deze situatie niet blijft bestaan.



### 6.2.1 Marginale kostprijs van elektriciteit uit micro-wk.

Wanneer een particuliere exploitant zijn micro-wk installatie uitsluitend voor eigen verbruik laat werken, is de energiebesparing beperkt ten opzichte van het geval dat de warmtevraag maatgevend is. In het laatste geval zal meer elektriciteit worden geproduceerd dan het huishouden zelf nodig heeft. In deze paragraaf wordt onderzocht welke minimumprijs een particulier wil hebben voordat hij zijn micro-wk installatie elektriciteit laat terugleveren aan het net.

In het algemeen zal een producent stoppen met produceren zodra de kosten die samenhangen met de productie van een extra eenheid product de baten van verkoop van dat product overstijgen. Zo zal ook de particuliere exploitant van een micro-wk systeem geen elektriciteit meer produceren wanneer de waarde hiervan lager is dan de aardgaskosten. De kosten die samenhangen met de productie van een extra eenheid (kilowattuur) worden samengevat onder de noemer marginale kostprijs MKP.

Voor het produceren van een eenheid elektriciteit met micro-wk moet aardgas worden ingekocht. Echter, bij de inzet van de benodigde hoeveelheid aardgas komt warmte vrij. Deze warmte heeft de waarde van de hoeveelheid aardgas die anders in de (hulp)ketel had moeten worden ingezet om deze warmte te produceren. Deze waarde mag worden afgetrokken van de aardgaskosten. Zodoende bedraagt de marginale kostprijs per kWh de kosten van de benodigde hoeveelheid gas, minus de opbrengsten van de warmte.

$$MKP = \frac{NGkst}{\eta_{el}} * \left( 1 - \frac{\eta_{th}}{\eta_{ketel}} \right)$$

De waarde van de MKP blijkt af te hangen van het elektrisch en thermisch rendement van het micro-wk systeem, het rendement van de referentieketel, dat hier op 100% is gesteld, en van de gasprijs, die in deze berekening op 47,17 €/m<sup>3</sup> (= 5,36 €/kWh<sub>PE</sub>) is gesteld, inclusief Energiebelasting en BTW (NUON N.V., 2004; Continuum, 2004). De uitkomsten voor diverse warmtekrachtssystemen zijn weergegeven in Tabel 6.6.

Tabel 6.6 *Rendementen van micro-wk installaties en marginale kostprijs van elektriciteit uit micro-wk, incl. Energiebelasting en BTW*

		Stirling	Gasmotor	PEM	SOFC	PEM-HR
E.rendement	(LHV)	10%	20%	30%	40%	30%
W.rendement	(LHV)	90%	75%	60%	45%	70%
Gaskosten	€/ kWh <sub>e</sub>	53.6	26.8	17.9	13.4	17.9
Warmteopbrengst	€/ kWh <sub>e</sub>	48.3	20.1	10.7	6.0	12.5
MKP	€/ kWh <sub>e</sub>	5.36	6.70	7.15	7.37	5.36

De marginale kostprijs van elektriciteit uit micro-wk is lager naarmate het totaalrendement hoger is, vanwege de hogere warmteopbrengst. Dat de marginale kostprijs van elektriciteit uit Stirling en PEM-HR gelijk zijn is min of meer toeval, en komt doordat hun totaalrendement gelijk is aan dat van de referentieketel. Bij een andere waarde van het referentierendement ontstaan hier afwijkingen.

Om de energiebesparing te vergroten ten opzichte van productie uitsluitend voor eigen verbruik zal er voor moeten worden gezorgd dat de terugleverprijs minimaal hoger is dan de in Tabel 6.6 vermelde marginale kostprijs. Om de exploitanten te verleiden tot het installeren van meer vermogen dan strikt nodig om het eigen elektriciteitsverbruik te dekken moet de terugleverprijs zo hoog zijn dat er investeringsruimte voor extra vermogen door ontstaat. Hoeveel dit moet worden wordt in de volgende paragraaf onderzocht.

### 6.2.2 Benodigde vergoeding voor teruggeleverde elektriciteit.

Zoals hiervoor beschreven is een terugleverprijs (TLP) hoger dan de marginale kostprijs een noodzakelijke voorwaarde om een consument tot terugleveren te verleiden. Welke gevolgen de terugleverprijs heeft voor de jaarlijkse energiekostenreductie van een 30/60% PEM systeem, kan worden afgelezen uit Tabel 6.7. Hiertoe zijn de kostenreducties berekend bij 5 €/kWh,

7,15 €/kWh, wat gelijk is aan de marginale kostprijs voor productie van elektriciteit met behulp van een PEM systeem, en 10,4 €/kWh. Deze laatste waarde is een schatting van de minimale vergoeding die nodig is om de consument te verleiden te investeren in een terugleverend systeem. De schatting is later in deze paragraaf toegelicht. Ter vergelijking is in de eerste rij de energiekostenreductie weergegeven van een 5 kW<sub>e</sub> systeem met 600 liter buffer, dat de gevraagde warmte volledig dekt.

Tabel 6.7 *Warmte dekking, PE besparing en Energiekostenreductie (EKR) van PEM micro-wk systemen met verschillende vermogens en buffers, bij verschillende terugleverprijzen.*

	Pel kW <sub>e</sub>	Pth kW <sub>th</sub>	W- buffer kg	W- dekking %	PE besparing %	PE red2 %	CO <sub>2</sub> reductie %	Terugleverprijs [€/kWh]		
								5 EKR1 €/jr	7.15 EKR2 €/jr	10.4 EKR3 €/jr
W-vrg volgend	5	10	615	100%	13%	24%	37%	79	209	405
Geen buffers	5	10	0	99%	13%	24%	37%	96	221	410
W-vrg volgend	3	6	0	85%	12%	22%	34%	121	221	373
	2.5	5	0	77%	12%	21%	33%	134	221	352
	2	4	0	68%	11%	20%	31%	147	219	326
	1	2	0	46%	8%	16%	25%	175	210	263
E-vrg volgend	1	2	0	26%	5%	10%	18%	210	210	210
W-buffer	5	10	86	99%	13%	24%	37%	95	221	412
W-vrg volgend	3	6	86	87%	12%	22%	35%	117	221	379
	2.5	5	86	79%	12%	21%	33%	130	221	359
	2	4	86	70%	11%	20%	32%	145	220	334
	1	2	86	49%	9%	16%	26%	178	216	275
E-vrg volgend	1	2	86	31%	6%	12%	20%	251	251	251
E-buffer	5	10	0	99%	13%	24%	37%	139	253	426
W-vrg volgend	3	6	0	85%	12%	22%	34%	163	253	389
	2.5	5	0	77%	12%	21%	33%	177	253	368
	2	4	0	68%	11%	20%	31%	192	253	343
	1	2	0	46%	8%	16%	25%	223	246	281
E-vrg volgend	1	2	0	33%	7%	12%	21%	246	246	246
W&E-buffers	5	10	86	99%	13%	24%	37%	137	253	428
W-vrg volgend	3	6	86	87%	12%	22%	35%	160	253	395
	2.5	5	86	79%	12%	21%	33%	173	253	375
	2	4	86	70%	11%	20%	32%	189	253	350
	1	2	86	49%	9%	16%	26%	223	251	292
E-vrg volgend	1	2	86	34%	7%	13%	21%	260	260	260

Er valt op dat toevoeging van een warmtebuffer en/of extra vermogen weliswaar leidt tot een hogere warmte dekking, en daarmee PE besparing, maar dat die bij een terugleverprijs gelijk aan de marginale kostprijs niet leidt tot energiekostenreductie. Dit geldt zeker bij de overgang van 1 kW<sub>e</sub> elektriciteitsvraagvolgend naar 1 kW<sub>e</sub> warmtevraagvolgend. De toevoegingen leiden

blijkbaar niet tot productie op betere momenten (met eigen elektriciteitsvraag), en daarmee ook niet tot een lagere vermeden inkoop. Een regelsysteem zal er daarom op gericht moeten zijn productie voor eigen verbruik meer voorrang te geven dan de hier gebruikte eenvoudige regelstrategie (Tillemans, Groot, 2002).

In Tabel 6.7 is verder te zien dat een terugleverprijs ruim boven de marginale kostprijs moet liggen wil het financieel interessant zijn om elektriciteit terug te leveren. In het hier gekozen voorbeeld van 10,4 €/kWh, levert het 25 tot 40 euro per jaar op om over te gaan van een elektriciteitsvolgende naar een warmtevraagvolgende regelstrategie. Verder is er bij deze prijs ongeveer 90 €/jaar beschikbaar om de meerinvestering in een 2 kW<sub>e</sub> systeem in plaats van 1 kW<sub>e</sub> mogelijk te maken. Of 10,4 €/kWh een voldoende hoge terugleverprijs is om de extra investering in een 5 kW<sub>e</sub> systeem mogelijk te maken kan als volgt worden afgeschat. In 2003 is op basis van 250 €/j energiekostenreductie en 5 jaar terugverdientijd een investeringsruimte van 1250 € geschat voor een elektriciteitsvraagvolgend 1 kW<sub>e</sub> PEM micro-wk systeem (Ruijg, Ribberink, 2004). Stel dat dit kostprijdoel wordt gehaald (eventueel met hulp van subsidie, zoals Energiepremieregeling EPR), en dat de kostprijs exponentieel toeneemt met het vermogen tot de macht 0,6. De kostprijs van een 5 kW<sub>e</sub> systeem bedraagt dan 3250 €, de meerkosten ten opzichte van een 1 kW<sub>e</sub> systeem 2000 €. De hulpketel kan dan vervallen, wat een reductie van 1200 euro oplevert. Een systeem met hetzelfde (tapwater) comfort als het voorgestelde systeem kost weliswaar tot 2000 €, maar onderdelen zoals een buffervat en toebehoren moeten ook in de prijs van een micro-wk systeem worden meegenomen, en vallen in deze berekening buiten de systeemgrens. De netto meerkosten van een 5 kW<sub>e</sub> systeem ten opzichte van een 1 kW<sub>e</sub> systeem zijn dan 800 €. Jaarlijks moeten de toegevoegde 4 kW<sub>e</sub> dan 160 € energiekostenreductie opleveren. Met het voor dit project ontwikkelde model is bepaald dat in het geval van huishouden A een terugleverprijs van 10,4 €/kWh nodig is. Omdat bij een 2 kW<sub>e</sub> systeem de hulpketel niet kan vervallen is dan volgens dezelfde redenering een terugleverprijs van 11,8 €/kWh nodig.

Wel moet hierbij worden aangetekend dat in deze beschouwingen is uitgegaan van een eenvoudige warmtevraagvolgende regelstrategie. Er kunnen waarschijnlijk betere regelstrategieën ontwikkeld worden die de vermeden inkoop kunnen maximaliseren, waardoor de systemen al economisch worden bij iets lagere terugleverprijzen. Maar aan de conclusie dat er een terugleverprijs nodig is die duidelijk boven de marginale kostprijs ligt zal naar verwachting daardoor niet veel veranderen.

Mogelijkheden voor het creëren van een voldoende hoge terugleverprijs (10,4 €/kWh of meer) worden in de volgende paragrafen onderzocht.

### 6.2.3 Terugleverprijs

De waarde van de teruggeleverde elektriciteit wordt bepaald door de vermeden inkoopprijs van degene die de teruggeleverde elektriciteit afneemt. In de meeste gevallen zal dat een energiebedrijf zijn. Een energiebedrijf koopt zijn elektriciteit op zeer grote schaal in, en betaalt daarvoor een prijs die voornamelijk zal afhangen van termijnmarkten zoals Endex ([www.endex.nl](http://www.endex.nl)). Ook zal een energiebedrijf een deel van zijn energie inkopen op de spotmarkt ([www.apx.nl](http://www.apx.nl)). Er mag van worden uitgegaan dat een energiebedrijf voor stroom van vele producenten nog eens 10% minder over heeft dan voor stroom die hij op grote schaal bij één aanbieder kan kopen, want dit vraagt natuurlijk extra administratieve inspanningen en dergelijke (Scheepers, 2004).

De spotmarktprijzen kunnen sterk schommelen. De prijzen op de termijnmarkten worden beïnvloed door de spotmarktprijzen, en omgekeerd. Een voorbeeld van de hoogte van termijnmarktprijzen is weergegeven in Tabel 6.8. De gemiddelde spotmarktprijzen van de afgelopen jaren zijn samengevat in Tabel 6.9.

Tabel 6.8 *Voorbeeld van termijnmarktprijzen [€/MWh]*

Wed, Product	23 Jun 2004 Base Load	17:00 Peak Load
Jul-04	32.38	47.65
Aug-04	37.49	56.90
Sep-04	39.37	56.54
Q3-04	36.49	53.90
Q4-04	40.74	56.21
Q1-05	44.33	63.11
Q2-05	37.64	51.69
<i>Gemiddeld</i>	<i>39.80</i>	<i>56.23</i>
Cal-05	40.52	55.63
Cal-06	38.58	53.24

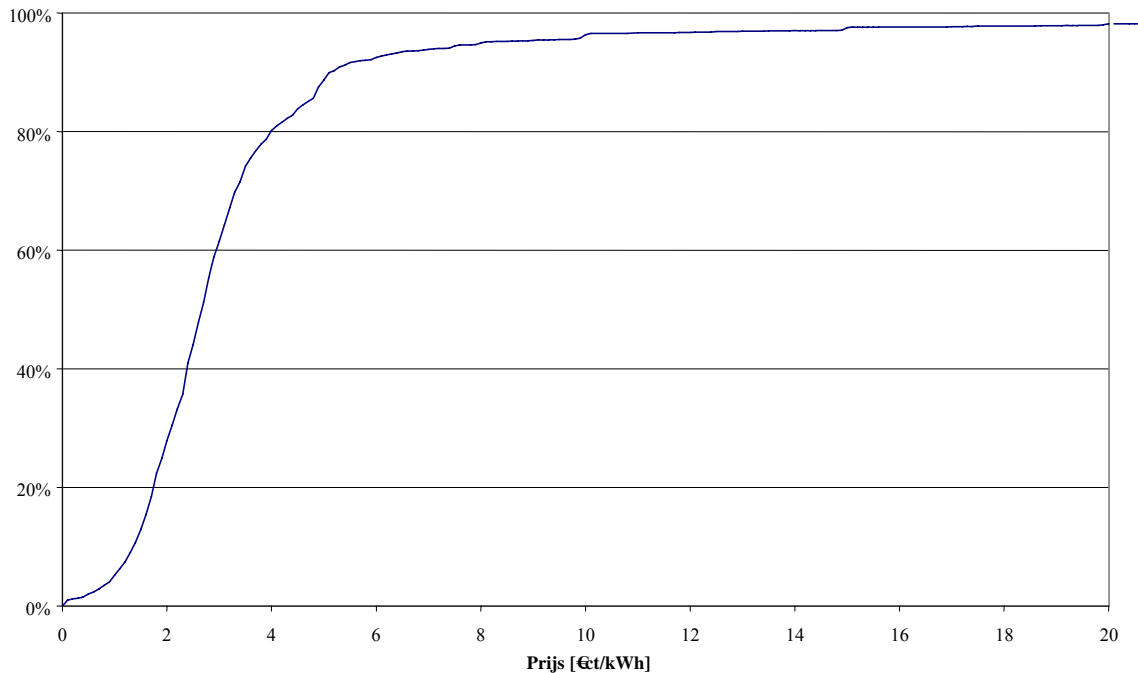
Tabel 6.9 *Gemiddelde APX prijzen [€/MWh]*

	Alle uren	Plateau uren	Dal uren
Alle jaren	37.55	46.99	18.67
1999	26.69	31.06	17.97
2000	48.31	59.69	25.53
2001	33.46	41.50	17.38
2002	29.99	38.53	12.90
2003	46.47	60.68	18.06
2004	31.58	37.55	19.63

Er is te zien dat gedurende plateau uren (van 7:00 tot 23:00) de gemiddelde APX prijs 4,8 €/kWh bedroeg. De verschillen van jaar tot jaar kunnen echter groot zijn. De gemiddelde plateau prijs over de eerste vier maanden van 2004 bedroeg slechts 3,6 €/kWh, terwijl de gemiddelde plateau prijs over heel 2002 nog geen 3,9 €/kWh was. Daarentegen waren de prijzen in 2003 erg hoog, getuige het plateaugemiddelde van 6,1 €/kWh. Blijkbaar voorzien de handelaren voor de tweede helft van 2004 en de eerste helft van 2005 hogere prijzen dan tot nog toe, het niveau van 2003 komt weer in beeld (Tabel 6.8). Wanneer wordt verondersteld dat de micro-wk systemen zodanig worden geregeld dat teruglevering tijdens plateau-uren plaatsvindt mag van de energiebedrijven zo'n 5 €/kWh worden verwacht.

Naast de vermeden inkoop prijs spaart het energiebedrijf kosten uit voor transport en systeemdiensten, zoals het aanhouden van regel- en reservevermogen, blackstart-voorzieningen en de overige systeemdiensten (DTe). Meestal zal een energiebedrijf ingekochte energie via het lokale laagspanningsnet door kunnen leveren, zodat voor midden- en hoogspanning vergoeding uitgespaard zou kunnen worden. Of dit werkelijk voordeel oplevert is echter moeilijk te achterhalen, en wordt daarom niet meegerekend. In 2003 kregen tuinders van netbeheerders een vergoeding voor uitgespaarde netkosten van 0,1 €/kWh (Productschap Tuinbouw, 2004)

De zomer van 2003 heeft duidelijk laten zien dat spotmarktprijzen sterk kunnen variëren. Met behulp van de historische data kan worden weergegeven hoeveel procent van de tijd de spotmarktprijs boven een bepaald criterium was, bijvoorbeeld boven de marginale kostprijs van elektriciteit uit micro-wk installatie. Dit kan worden geïllustreerd door de cumulatieve fractie uit te zetten tegen de prijs, wat is weergegeven in Figuur 6.2.



Figuur 6.2 *Cumulatieve verdeling van APX spotmarktprijzen.*

Uit Figuur 6.2 kan bijvoorbeeld worden afgelezen dat 90% van de op de spotmarkt gerealiseerde prijzen beneden 6 €ct/kWh ligt, dus 10% erboven. In Tabel 6.10 is aangegeven welk percentage van de spotmarktprijzen boven de marginale kostprijs van de verschillende beschouwde micro-wk technologieën ligt.

Tabel 6.10 *Percentage spotmarktprijzen boven MKP*

		Stirling	Gasmotor	PEM	SOFC	PEM-HR
MKP	€ct/kWh	5.36	6.70	7.15	7.37	5.36
Percentage hoger		8.9%	6.4%	6.1%	6.0%	8.9%
Gem.prijs	€ct/kWh	15.92	19.85	20.60	20.72	15.92
Opbrengst (1kW <sub>e</sub> )	€/jr	83	74	71	70	83

Of dit werkelijk leidt tot teruglevering hangt ervan af of er nog ruimte in de warmtebuffer is op het moment dat de spotmarktprijs boven de MKP uitkomt.

Uit het voorgaande blijkt dat de marginale kostprijzen van micro-wk systemen zoals weergegeven in Tabel 6.6 hoger zijn dan de gemiddelde APX prijs tijdens plateau-uren, en dat de APX prijs slechts een beperkt deel van de tijd hoger is dan de MKP. Dit betekent dat een energiebedrijf slechts een deel van de tijd, en in beperkte mate, voor teruggeleverde stroom een prijs zal willen bieden die hoger is dan de MKP. Voor nog hogere terugleverprijzen, nodig voor investeringen in zwaardere systemen, geldt dit in nog sterkere mate. Daarom zullen er aanvullende vergoedingen nodig zijn voor terugleverende exploitanten van micro-wk systemen om de energiebesparing te vergroten.

#### 6.2.4 Mogelijkheden voor een terugleverprijs boven de marginale kostprijs

In de vorige paragraaf is gebleken dat de benodigde terugleverprijs vrijwel altijd hoger is dan de inkoopkosten die een energiebedrijf kan uitsparen. Als er van wordt uitgegaan dat een energiebedrijf hoogstens bereid is een termijnmarktprijs minus 10% te betalen voor

teruggeleverde stroom<sup>2</sup>, en dat er een gemiddelde terugleverprijs van minimaal 7,2 €/kWh nodig is om een particuliere exploitant te verleiden tot teruglevering van elektriciteit uit een bestaand systeem, is er door de weeks en overdag een gat van minimaal 2,2 €/kWh. 's Nachts en in het weekend wordt dit zelfs nog groter. Om een particuliere exploitant te verleiden tot investering in terugleverende systemen is eerder bepaald dat er zelfs een terugleverprijs ruim boven 10 €/kWh nodig is (paragraaf 6.2.2).

In deze paragraaf worden mogelijkheden verkend om de terugleverprijs te verhogen. Ook zal het probleem van de "dubbele Energiebelasting" aan de orde komen. Energiebelasting (EB) is vanaf 1 januari 2004 geïntroduceerd en is een samenvoeging van de voormalige brandstofbelasting (BSB) en regulerende energiebelasting REB (Productschap Tuinbouw, 2004). Hoewel nog vaak gebruikt bestaat de term REB officieel niet meer.

In bijlage B zijn alle getraceerde betrokkenen bij teruglevering samengevat, met de voor- en nadelen die zij bij elektriciteitsproductie met micro-wk hebben, en hun eventuele belangen (Scheepers, 2004). Beschouwde betrokkenen zijn:

- De particuliere exploitant van de micro-wk is al uitvoerig aan de orde geweest.
- Met "buurman" wordt de afnemer bedoeld van de teruggeleverde stroom. Alles speelt zich voor hem aan de andere kant van de meter af, en er verandert dus merkbaar niet veel voor hem.
- Het netwerkbedrijf is een partij die wel beïnvloed wordt door micro-wk, maar die niet veel invloed heeft. Hij kan niet veel anders doen dan de verhouding tussen vaste en variabele vergoeding proberen aangepast te krijgen.
- Het E-bedrijf is de afnemer van de teruggeleverde stroom. Van hem kan worden verwacht dat hij minder over heeft voor de stroom dan wat hij betaalt op de termijnmarkten en APX.
- De overheid is betrokken via Energiebelasting en BTW, en heeft belang bij de energiebesparing, emissiereductie, en leveringszekerheidsvergroting die het gevolg zijn van toepassing van micro-wk.
- Grote E-producenten, voor wie de kleine producten concurrenten zijn.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat naast de particuliere exploitant en het energiebedrijf de overheid de derde betrokkene is met duidelijk belang bij en invloed op teruglevering. Belangen van de overheid zijn energiebesparing, CO<sub>2</sub> reductie en leveringszekerheid. Als wordt afgezien van het verplichten van energiebedrijven om stroom uit micro-wk af te nemen tegen hogere prijzen dan die van de termijnmarkt, is de overheid de enige belanghebbende die het gat van minimaal 2,2 €/kWh kan overbruggen.

Mogelijkheden hiertoe moeten waarschijnlijk worden gezocht in de bestaande regelingen. Consequentie is dat er een meter moet zijn die de teruglevering registreert. Elektriciteitsmeters die tegenwoordig worden geplaatst zijn hier ivm mogelijke PV al mee uitgerust. Of er moet een tweede gasmeter komen voor een hulpbrander. Verder is het van belang dat de te kiezen regeling zo eenvoudig mogelijk is, om de transactiekosten (administratieve lasten) te beperken. Gezien het mogelijk grote aantal installaties en het in vergelijking met grote WKK installaties lage aantal kWh per installatie wordt anders de uitvoering van de regeling zeer duur (Scheepers, 2004).

Mogelijkheden die de regelingen bieden om de terugleverprijs te verhogen zijn:

- 1) Vrijstelling van BTW afdracht voor teruggeleverde stroom.
- 2) De "Blauwe Stroom" vergoeding uit de MEP regeling
- 3) Teruggave van Energiebelasting over teruggeleverde stroom
- 4) Vrijstelling van Energiebelasting op aardgas voor micro-wk toepassingen.
- 5) Een vast bedrag per teruggeleverde kilowattuur, gebaseerd op:
  - a) Een vergoeding per uitgespaarde eenheid CO<sub>2</sub>
  - b) De Energiebelasting op het aan deze kWh bestede gas volgens een referentierendement

---

<sup>2</sup> Een dergelijke korting is al van toepassing voor grote WKK. Voor kleine zal die waarschijnlijk hoger uitvallen.

- c) Een constante vergoeding, gebaseerd op bijvoorbeeld onrendabele top.
- d) Rechtstreekse doorverkoop aan "de burens".

Deze mogelijkheden worden hieronder besproken:

Ad 1) Vrijstelling van BTW afdracht voor teruggeleverde stroom. Een energiebedrijf dat op de termijnmarkt of de APX stroom koopt, betaalt hierover 19% BTW aan zijn leverancier. De leverancier draagt deze BTW weer over aan de belastingdienst, onder aftrek van de door de leverancier betaalde BTW. Wanneer de leverancier een huishouden is, zou dit huishouden de BTW ook moeten innen en aan de belastingdienst moeten afdragen, ware het niet dat een huishouden zelf geen BTW mag aftrekken over het voor de productie ingekochte gas. Het zou dus redelijk zijn het huishouden deze BTW te laten houden. Zou een energiebedrijf gemiddeld 5 €/kWh betalen voor teruggeleverde stroom, dan zou het huishouden een extra 0,95 € per teruggeleverde kilowattuur ontvangen. Samen met de voorgestelde MEP vergoeding uit onderdeel 2) zou dit voor Stirling al voldoende zijn om in ieder geval de marginale kosten goed te maken.

Ad 2) "Blauwe stroom" is de aanduiding voor dat deel van de elektriciteit uit een warmtekrachtinstallatie dat als CO<sub>2</sub>-vrij mag worden beschouwd (Ribberink, 2002). In mei 2004 heeft ECN het Ministerie van Economische Zaken geadviseerd de "blauwe stroom vergoeding" voor teruggeleverde stroom uit WKK in de regeling Milieukwaliteit Elektriciteitsproductie MEP op 2,58 €/kWh te stellen (Donkelaar, Harmsen & Scheepers, 2004). In een brief aan de Tweede Kamer heeft de minister van EZ voorgesteld het tarief 2,6 €/kWh te maken (Brinkhorst, 2004). De fractie van de elektriciteitsproductie waarover de vergoeding van 2,6 €/kWh wordt gegeven, wordt bepaald door de CO<sub>2</sub> index, die wordt bepaald met de formule:

$$CO_2 - index = 1 - \frac{(B * Kb - W * KRW)}{P * KRE}$$

waarin:

- B = de hoeveelheid verbruikte brandstof in m<sup>3</sup>.
- Kb = de emissiefactor van de gebruikte brandstof. Voor aardgas is dit 1,776 kg/Nm<sup>3</sup>.
- W = de hoeveelheid opgewekte warmte in GJ.
- KRW = de emissie van de referentieketel, is gelijk aan 1,776 / η<sub>th</sub> kg/Nm<sup>3</sup>. = 56,1 kg/GJ
- P = de opgewekte elektriciteit en/of mechanische energie in MWh.
- KRE = de emissie van de referentieinstallatie voor elektriciteitsopwekking, was in 2004 voor micro-wk 373,1 kg/MWh (Brinkhorst, 2003).

In het geval van aardgasgedreven micro-wk zijn alle emissiefactoren betrokken op aardgas, en kan de vergelijking worden vereenvoudigd tot:

$$CO_2 - index = 1 - \frac{\eta_{eref}}{\eta_e} * \left(1 - \frac{\eta_{th}}{\eta_{thref}}\right)$$

- η<sub>eref</sub> = het referentierendement voor elektriciteitsopwekking, was in 2004 54%
- η<sub>e</sub> = het elektrisch rendement van de micro-wk installatie
- η<sub>th</sub> = het thermisch rendement van de micro-wk installatie
- η<sub>thref</sub> = het thermisch rendement van de referentie (HR)-ketel, was in 2004 100.1%

De CO<sub>2</sub>-indexen voor verschillende micro-wk systemen en de gemiddelde MEP-vergoedingen voor teruggeleverde elektriciteit die daarvan het gevolg zijn, zijn samengevat in Tabel 6.11

Tabel 6.11 *CO<sub>2</sub> index en gemiddelde blauwe stroom vergoeding voor verschillende micro-wk systemen.*

Systeem	Stirling	Gasmotor	PEM	SOFC	PEM-HR	
E.rendement	10%	20%	30%	40%	30%	
W.rendement	90%	75%	60%	45%	70%	
CO <sub>2</sub> -index	46%	32%	28%	26%	46%	
Vergoeding gemiddeld over alle teruglevering	€ct/kWh	1.2	0.8	0.7	0.7	1.2

Ter vergelijking: een bestaande gasmotor heeft een CO<sub>2</sub>-index van 24%, een nieuwe tuindersgasmotor 29,5% (Donkelaar, Harmsen & Scheepers, 2004). De MEP vergoeding mag worden opgeteld bij de APX vergoeding van het energiebedrijf. Samen met BTW vrijstelling zou dit in principe voldoende zijn om een exploitant van een Stirling micro-wk systeem, gericht op dekking van het eigen verbruik, tot terugleveren te verleiden. Dit omdat Stirling de laagste MKP heeft, en omdat het bij Stirling om kleine hoeveelheden elektriciteit gaat. Voor brandstofcelsystemen blijft het echter onvoldoende.

Ad 3) Teruggave van Energiebelasting (EB) over teruggeleverde stroom. Een probleem bij het terugleveren van stroom op momenten dat het huishouden niet alle door de micro-wk geproduceerde stroom nodig heeft, is dubbele heffing van Energiebelasting. Als een huishouden stroom produceert, betaalt het Energiebelasting over het daarvoor benodigde gas (zie Tabel 6.14). Als het huishouden die stroom teruglevert, is er dus al een keer Energiebelasting betaald. Als het huishouden vervolgens op een ander moment meer stroom nodig heeft dan het zelf produceert, koopt het stroom bij van het net, en betaalt daar dan weer Energiebelasting over. Voor zover de stroom eerder teruggeleverd is, wordt dan 2 maal Energiebelasting betaald: de eerste keer toen bij de gas inkoop voor de stroom- en warmteproductie, en de tweede keer bij het weer inkopen van teruggeleverde elektriciteit. Hetzelfde geldt ook als de teruggeleverde stroom vervolgens door "de burens" wordt gebruikt. Het zou dus redelijk zijn om Energiebelasting terug te geven over teruggeleverde stroom, zodat dubbele Energiebelasting betaling wordt voorkomen. Als de volle elektriciteits EB wordt teruggegeven wordt, betekent dit een vergoeding bovenop de vergoeding van het energiebedrijf van 7,78 €ct/kWh (in 2004). Bij een minimale vergoeding van het energiebedrijf van 3,4 €ct/kWh krijgt de consument 11,2 €ct/kWh. Bij een maximale vergoeding van 5,1 €ct/kWh wordt het 12,9 €ct/kWh. Dit is altijd boven de marginale kostprijs, zodat teruglevering altijd interessant is zolang er warmtevraag is. Ook ontstaat op deze manier waarschijnlijk voldoende investeringsruimte om de micro-wk installatie op de warmtevraag in plaats van op de elektriciteitsvraag te dimensioneren. Men zou de hoeveelheid waarover Energiebelasting wordt teruggegeven kunnen beperken tot de hoeveelheid die virtueel "op het net wordt opgeslagen". Dan wordt echter meer produceren dan het eigen verbruik niet gestimuleerd. Tot de invoering van de MEP regeling was teruggave van Energiebelasting de manier van stimulering van duurzame energie. Met de MEP regeling is de Energiebelasting teruggaveregeling nog niet afgeschaft, maar is het tarief op nul gesteld. De regeling is daarom nog steeds bruikbaar (Scheepers, 2004).

Ad 4) Gas voor grote WKK installaties van bijvoorbeeld tuinders is vrijgesteld van Energiebelasting (EB) (Productschap Tuinbouw, 2004). Voor exploitanten van micro-wk installaties bestaat deze EB vrijstelling voor gas (nog) niet. Er wordt gepleit om deze vrijstelling ook voor micro-wk te laten gelden. Een dergelijke regeling zou in het voordeel zijn van systemen met hoge warmte/krachtverhoudingen, zoals wordt geïllustreerd in Tabel 6.12. De reden hiervoor is dat per geproduceerde kWh elektriciteit een Stirling meer gas nodig heeft dan een SOFC. Omdat de Stirling ook de meeste warmte produceert (hoogste totaalrendement), zijn de marginale kosten ook het laagst, zodat de stimulering eigenlijk hier het minst nodig is. EB vrijstelling voor aardgas komt vrijwel neer op het subsidiëren van de warmteproductie.



Tabel 6.12 *Resulterende stimulering per geproduceerde kWh in het geval van Energiebelasting vrijstelling van aardgas voor micro-wk*

Type	Stirling	Gasmotor	PEM	SOFC	PEM-HR
E-rendement	10%	20%	30%	40%	30%
W-rendement	90%	75%	60%	45%	70%
Stimulering €ct/kWh	19.34	9.67	6.45	4.83	6.45

Energiebelasting vrijstelling van aardgas voor micro-wk zou voor de overheid een dure regeling worden, omdat de vergoeding op deze manier niet alleen over teruggeleverde kilowatturen gegeven wordt, maar over alle geproduceerde kilowatturen. In dit rapport is al getoond dat vermeden inkoop kilowatturen een marge van 8 tot 12 €ct/kWh hebben, zodat zulke kilowatturen niet zo'n extra stimulering nodig hebben. Verder moet er een aparte gasmeter worden geplaatst voor een eventueel aanwezige hulpbrander/ketel.

Als variant is het mogelijk vervolgens de door de micro-wk geproduceerde stroom die direct in het huishouden afgenomen wordt ook met Energiebelasting te belasten. Dan kunnen alle bedragen uit Tabel 6.12 worden verlaagd met het Energiebelasting tarief voor elektriciteit (7,78 €ct/kWh). Voordeel is dat op deze manier dubbele energiebelastingheffing wordt voorkomen. Nadeel is dat deze maatregel dan neerkomt op het goedkoper maken van warmteproductie in plaats van elektriciteitsproductie, wat extra warmteverbruik in de hand werkt. Ook de doelstelling van deze analyse: voor micro-wk met hoog elektrisch rendement een terugleverprijs creëren die teruglevering economisch mogelijk maakt, wordt dan ook niet voldaan. Verder moet er een meter worden geplaatst die niet de teruglevering maar de productie meet.

Ad 5) Een vast bedrag per teruggeleverde kWh. Dit heeft als voordeel boven vergoeding per m<sup>3</sup> aardgas dat er geen stimulering wordt gegeven over de elektriciteit voor eigen gebruik, en niet over de geproduceerde warmte. Met behulp van de rendementen kan worden berekend dat de consument door zelf elektriciteit te produceren 5 à 6 €ct/kWh op zijn Energiebelasting bespaart. Verder zijn moderne elektriciteitsmeters zelf al in staat teruglevering te meten, terwijl er bij stimulering per m<sup>3</sup> een extra gasmeter nodig is (Scheepers, 2004).

Ad 5a) Een vergoeding voor uitgespaarde CO<sub>2</sub> per teruggeleverde kWh, ongeveer volgens de huidige generieke MEP-regeling. De CO<sub>2</sub> reductie per kWh opgewekt met micro-wk, berekend volgens de MEP methodiek, varieert van 0,17 kg/kWh voor Stirling en HR-PEM tot 0,10 kg/kWh voor SOFC (Tabel 6.13). Hierbij is uitgegaan van de emissiewaarde 0,3731 kg/kWh uit de MEP-regeling (dit is gebaseerd op aardgastestookte opwekking met 54% rendement) (Brinkhorst, 2003). Wanneer men aanneemt dat een volledig CO<sub>2</sub>-vrije kilowattuur 7,7 €ct/kWh waard is (de MEP-vergoeding voor wind op land), kan de waarde per kWh uit de verschillende typen micro-wk eenvoudig worden bepaald.

Tabel 6.13 *Waarde van vermeden CO<sub>2</sub> van micro-wk.*

	Stirling	Gasmotor	PEM	SOFC	PEM-HR
E.rendement	10%	20%	30%	40%	30%
W.rendement	90%	75%	60%	45%	70%
Vermeden CO <sub>2</sub> kg/kWh	0.17	0.12	0.10	0.10	0.17
Waarde vermeden CO <sub>2</sub> €ct/kWh	3.5	2.5	2.1	2.0	3.5

Deze waarden zijn beduidend hoger dan de Blauwe Stroom vergoeding van Tabel 6.11.

Dat de waarde het hoogst is voor Stirling en PEM-HR vindt zijn oorzaak in het hoge totaalrendement (elektrisch plus thermisch = 100%) van deze systemen.

Het zou betekenen dat de Stirling, die al de laagste marginale kosten heeft, ook nog eens de hoogste stimulering zou krijgen, terwijl de primaire energie besparing voor dergelijke systemen laag is. Verder is de vergoeding voor de andere systemen aan de lage kant om teruglevering te stimuleren.

Ad 5b) De Energiebelasting op het aan deze kWh bestede gas volgens een referentierendement. Men kan per teruggeleverde kWh bepalen hoeveel gas een bepaald type micro-wk systeem extra nodig heeft om die kWh te produceren, door de aan het micro-wk systeem toe te voeren hoeveelheid gas te verminderen met de hoeveelheid die nodig zou zijn om de beschikbaar komende warmte op te wekken met een HR-ketel. Berekent men dit als percentage, dan ontstaat de al lang bekende bijstookfactor. De extra toe te voeren (bij te stoken) hoeveelheid aardgas en de daarmee gemoeide extra Energiebelasting zijn samengevat in Tabel 6.14. Te zien is dat voor de systemen met 100% totaalrendement (elektrisch plus thermisch) de bijstook 0,11 m<sup>3</sup>/kWh is. Bij een Energiebelasting voor aardgas van 17.0 €/m<sup>3</sup> is dan de Energiebelasting per kWh uit eigen productie 1,93 €ct.

Tabel 6.14 *Bijstookfactor en bijbehorende Energiebelasting voor verschillende micro-wk systemen*

	Stirling	Gasmotor	PEM	SOFC	PEM-HR
Bijstookfactor	11%	33%	67%	122%	43%
Bijstook m <sup>3</sup> /kWh	0.11	0.14	0.15	0.16	0.11
Bijbehorende EB €/kWh	1.93	2.42	2.58	2.66	1.93

Uit vergelijking van Stirling en PEM-HR kan worden afgelezen dat vooral het totaalrendement hierop van invloed is. Er kan één van deze systemen als referentiesysteem worden gekozen. Neemt men de 30/60 PEM als referentie voor de rendementen van micro-wk systemen, wordt de stimuleringsbijdrage bij teruglevering uit alle systemen 2,58 €/kWh. Dit kan voldoende zijn om door de week overdag de teruglevering te stimuleren, maar ruimte voor investering in extra vermogen ontstaat er niet door.

Ad 5c) Een MEP-achtige regeling in de vorm van een constant bedrag per kWh, bijvoorbeeld gebaseerd op onrendabele top. In het voorgaande is reeds betoogd dat de vergoeding uit mogelijkheid 5b weliswaar voldoende kan zijn om de consument die al een micro-wk systeem heeft tot terugleveren te verleiden, maar niet voldoende is om de consument te verleiden om te investeren in extra grote micro-wk, om zo de energiebesparing en opwekcapaciteit te vergroten. Wanneer de overheid het belang van micro-wk hoog genoeg acht, kan ze de stimulering op voldoende hoogte brengen door een willekeurig bedrag te vergoeden. Volgens Europese regels mag ze hiertoe tot de helft van de onrendabele top gaan (Donkelaar, Harmsen & Scheepers, 2004). Hoe hoog de onrendabele top is, komt pas tot uiting wanneer de systemen op de markt verschijnen. Overigens is het een vraag in hoeverre de EU zal vasthouden aan het 50% criterium, want uit het EU directive blijkt dat de EU grote waarde aan de optie hecht. In paragraaf 6.2.2 is met het voor dit project ontwikkelde model bepaald dat in het geval van huishouden A een terugleverprijs van 10,4 €/kWh nodig is, wat naast hoogstens 5 €/kWh van het energiebedrijf minimaal 5,4 €/kWh stimulering nodig maakt.

Ad 5d) Rechtstreekse doorverkoop aan "de burens" is voor een particuliere exploitant een manier om een veel hogere prijs voor zijn elektriciteit te krijgen. Voor "burens" is elektriciteit net zoveel waard als voor de bewoner zelf. Men zou doorlevering "naar de burens" via het lokale laagspanningsnet kunnen institutionaliseren. Hiervoor moet regelgeving ten aanzien van energiebelasting en transportvergoeding worden aangepast, en moet een voorziening voor ongelijktijdigheid worden georganiseerd.

Met name wanneer "de burens" een warmtepomp hebben zijn de voordelen groot, omdat de elektriciteitsvraag van de warmtepomp vrijwel synchroon loopt met het op warmtevraag gebaseerde aanbod door het micro-wk systeem. Ook ontstaat zo een zeer zuinig energiesysteem. Voor de exploitant van een warmtepomp is de waarde van de elektriciteit meestal gelijk aan het nachstroomtarief, dat in 2005 14 €/kWh zal bedragen, inclusief transport, energiebelasting en BTW. In tijden van grote warmtevraag zal de warmtepomp ook buiten de daluren in bedrijf zijn, en heeft de exploitant van de warmtepomp nog meer voor de elektriciteit over.

De mogelijkheden die tot nu toe zijn geïdentificeerd hebben als nadeel dat ze afzonderlijk meestal te laag zijn om investeringen in terugleverende systemen rendabel te maken (behalve 3 en mogelijk 5d). Sommige maatregelen, zoals Energiebelasting-vrijstelling voor aardgas, bevoordelen vooral de systemen met de laagste elektrisch rendement. De maatregel is daarmee bijna een subsidie op warmteproductie in plaats van warmtekracht. Deze systemen hebben ook de laagste marginale kostprijs, en hebben daarmee de stimulering het minst nodig. Een soort micro-wk specifieke MEP-achtige regeling in de vorm van een constante, door de overheid te kiezen stimuleringsbijdrage (mogelijkheid 5c), eventueel in combinatie met vrijstelling van BTW afdracht (mogelijkheid 1), lijkt de minste nadelen te hebben. Omdat moderne elektriciteitsmeters de teruglevering al apart registreren, hoeft er niets meer aan de bemetering te worden aangepast, en is ook de benodigde administratie van dergelijke regelingen eenvoudig.

## 7. CONCLUSIES

Uit voorgaande beschouwingen kan onder andere worden geconcludeerd:

1. Het maximum in energiebesparing, CO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-reductie (ecologisch voordeel) bij micro-wk systemen wordt bereikt indien 100% van de warmtevraag wordt gedekt met in co-productie verkregen warmte. De omvang van deze maximale besparing hangt af van de micro-wk-technologie, het referentierendement en de brandstofmix van de centrale elektriciteitsproductie, en is voor enkele mogelijkheden weergegeven in Tabel 7.1.
2. De systemen met hoog elektrisch rendement (PEMFC, SOFC) leveren bij volledige warmtedekking meer elektriciteit dan in het huishouden zelf wordt gebruikt. Om het besparingspotentieel te kunnen benutten moet dan elektriciteit worden teruggeleverd aan het net. Ook bij Stirling systemen zal sprake zijn van enige uitwisseling met het net, vanwege tijdsverschillen tussen warmte- en elektriciteitsvraag.
3. Wanneer de terugleverprijs onvoldoende hoog is om teruglevering economisch rendabel te maken zal de consument de elektriciteitsproductie beperken tot eigen gebruik (Ruijg, Ribberink, 2004), en de overige warmtebehoefte met de hulpbrander voldoen. Een deel van het besparingspotentieel zal dan onbenut blijven, wat is weergegeven in Tabel 7.1 onder maximaal economisch voordeel.

Tabel 7.1 *Energiebesparingspotentiëlen van micro-wk systemen bij verschillende referentierendementen en brandstofmix*

Micro-wk optie ( $\eta_e/\eta_{th}$ )	Maximaal ecologisch voordeel				Maximaal economisch voordeel			
	STEG <sup>3</sup>		Park		STEG		Park	
	Energie	CO <sub>2</sub>	Energie	CO <sub>2</sub>	Energie	CO <sub>2</sub>	Energie	CO <sub>2</sub>
Stirling (10/90%) <sup>4</sup>	8%	8%	12%	18%	8%	8%	12%	18%
PEM (30/60%)	13%	13%	24%	37%	6%	6%	12%	20%
SOFC (40/45%)	16%	16%	29%	43%	6%	6%	12%	21%

De percentages achter de micro-wk typen geven de aangenomen elektrische en thermische rendementen weer.

4. Voor een huishouden met een gemiddelde energievraag lijkt het mogelijk te zijn om met een systeem met een thermisch vermogen van 10 kW<sub>th</sub> en een buffer van 100 liter (bijvoorbeeld een 1 kW<sub>e</sub> Stirling of een 5 kW<sub>e</sub> PEM micro-wk systeem) volledige warmtedekking via warmtekracht te behalen. Dan wordt wél de maximale besparing van Tabel 7.1 behaald.
5. De marginale kostprijs van elektriciteit uit micro-wk loopt uiteen van 5,4 €/kWh uit Stirling tot 7,4 €/kWh uit SOFC. Dit betekent dat de terugleverprijs minimaal deze waarde moet hebben om de consument bij teruglevering zijn aardgaskosten te vergoeden. Pas boven deze prijs bestaat er voor de consument een prikkel om terug te leveren.
6. Als het meerprijsdoel van 1250 € voor een 1 kW<sub>e</sub> PEM micro-wk systeem van 1250 € ten opzichte van een HR-ketelinstallatie wordt gehaald, is een terugleververgoeding van minimaal 10,5 €/kWh nodig om de consument te verleiden tot de extra meerinvestering van 2000 € in een 5 kW<sub>e</sub> PEM micro-wk systeem, waarmee de maximale besparing gerealiseerd kan worden.

<sup>3</sup> Met STEG wordt een referentierendement van 54% bedoeld, dat hoort bij moderne gasgestookte centrales. Het CO<sub>2</sub>-reductiepercentage is dan gelijk aan het primaire-energie besparingspercentage. Met Park wordt een referentierendement van 42% bedoeld, dat hoort bij het gemiddelde van alle bestaande centrales. Hier is het CO<sub>2</sub>-reductiepercentage hoger dan het primaire-energiebesparingspercentage, omdat de micro-wk systemen worden gevoed met aardgas, terwijl de centrale brandstofmix deels uit kolen bestaat.

<sup>4</sup> Dit betreft micro-wk systemen met een hogere warmte/kracht verhouding dan de warmte/kracht verhouding in de vraag van een huishouden.

7. De gemiddelde spotmarktprijzen voor elektriciteit (3 à 5 €/kWh) zijn lager dan de marginale kostprijzen voor elektriciteit uit de verschillende systemen, en daarmee niet hoog genoeg om de particuliere exploitant van een micro-wk systeem tot terugleveren te verleiden, laat staan tot investering in extra vermogen. Zonder extra vergoeding per teruggeleverde kWh zal de productie zo veel mogelijk beperkt blijven tot het eigen verbruik, en zal een aanzienlijk deel van het besparingspotentieel onbenut blijven.
8. Er is geen marktprikkel gevonden die het voor energiebedrijven rendabel maakt om meer dan de gemiddelde spotmarktprijs te betalen voor door particulieren teruggeleverde elektriciteit. De overheid is als aangewezen belanghebbende geïdentificeerd om voor de extra vergoeding per kWh te zorgen. Wil de overheid van deze besparingsmaatregel gebruik maken, dan zal hij deze vergoeding permanent moeten handhaven.
9. Optimalisatie van benutting van het besparingspotentieel van micro-wk vereist een vergoeding voor een kWh die (netto) aan het net wordt geleverd ter grootte van minimaal het verschil tussen de marginale kostprijs voor productie van de kWh en de prijs die daar vanuit de markt voor wordt betaald. Om extra investering in een zwaarder systeem mogelijk te maken, waarmee de totale warmtevraag kan worden voldaan, is nog een extra vergoeding noodzakelijk. Naar verwachting ligt het verschil tussen marktprijs en totaal benodigde terugleverprijs, en dus de hoogte van de gewenste vergoeding, in de orde van 6 €/kWh. Er zijn verschillende mogelijkheden geïdentificeerd om deze vergoeding vorm te geven. Hiervan lijkt een vaste vergoeding per kWh de beste te zijn.

## BIJLAGE A BENODIGDE BUFFERGROOTTES BIJ VOLLEDIGE WARMTEDEKKING

In deze bijlage zijn de resultaten weergegeven van berekening van de benodigde buffergroottes bij micro-wk systemen van verschillende grootte, bij volledige warmte dekking. De eerste serie is gebaseerd op de rechtstreekse warmtevraagpatronen, de tweede serie is gebaseerd op warmtevraagpatronen waar een optimaliserende regeling aan is toegevoegd. De energiekostenreducties zijn gebaseerd op een terugleverprijs van 5 en 10,4 €/kWh.

### A.1 Rechtstreekse warmtevraag

Tabel A.1 *Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van PEM (30%/60%)*

Pel kWe	Pth kWth	Buffer kg	W-dekking	PEred	PEred2	CO2red	EKR1 €/j	EKR3 €/j	Eq.Vollast Uren
10.7	21.4	0	100%	13.5%	23.9%	36.7%	79	405	760
10	20	10	100%	13.5%	23.9%	36.7%	79	405	814
9	18	42	100%	13.5%	23.9%	36.7%	79	405	905
8	16	96	100%	13.5%	23.9%	36.7%	79	405	1018
7	14	163	100%	13.5%	23.9%	36.7%	79	405	1163
6	12	267	100%	13.5%	23.9%	36.7%	79	405	1357
5	10	615	100%	13.5%	23.9%	36.7%	79	405	1628
4	8	1332	100%	13.5%	23.9%	36.7%	81	406	2036
3	6	2220	100%	13.5%	23.9%	36.7%	87	409	2714
2	4	7225	100%	13.5%	23.9%	36.7%	96	415	4071
1	2	183398	100%	13.5%	23.9%	36.7%	158	449	8142
0.5	1	62420	54%	9.3%	17.2%	27.7%	206	308	8760
0.25	0.5	5744	27%	5.6%	10.7%	18.1%	169	191	8760
0.1	0.2	41	11%	2.5%	5.0%	8.9%	83	85	8760

Tabel A.2 *Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van SOFC (40%/45%)*

Pel kWe	Pth kWth	Buffer kg	W-dekking	PEred	PEred2	CO2red	EKR1 €/j	EKR3 €/j	Eq.Vollast Uren
19.0	21.4	0	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-49	601	760
16	18.0	42	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-49	601	905
14	15.8	104	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-49	601	1034
12	13.5	186	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-49	601	1206
10	11.3	364	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-49	601	1448
9	10.1	590	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-49	601	1608
8	9.0	923	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-48	601	1809
7	7.9	1387	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-47	602	2068
6	6.8	1881	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-46	603	2413
5	5.6	2390	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-43	604	2895
4	4.5	3884	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-40	606	3619
3	3.4	32205	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-29	612	4825
2	2.3	146702	100%	16.0%	28.7%	43.1%	5	631	7238
1	1.1	81769	61%	12.9%	23.7%	36.9%	136	455	8760

Tabel A.3 *Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van Stirling (10%/90%) micro-wk*

Pel kWe	Pth kWth	Buffer kg	W-dekking	PEred	PEred2	CO2red	EKR1 €/j	EKR3 €/j	Eq.Vollast Uren
2.38	21.4	0	100%	7.8%	12.1%	18.5%	140	172	760
2	18	42	100%	7.8%	12.1%	18.5%	140	172	905
1.8	16.2	91	100%	7.8%	12.1%	18.5%	140	172	1005
1.6	14.4	146	100%	7.8%	12.1%	18.5%	140	172	1131
1.4	12.6	232	100%	7.8%	12.1%	18.5%	140	172	1292
1.2	10.8	454	100%	7.8%	12.1%	18.5%	140	172	1508
1	9	923	100%	7.8%	12.1%	18.5%	141	173	1809
0.8	7.2	1682	100%	7.8%	12.1%	18.5%	146	176	2262
0.6	5.4	2491	100%	7.8%	12.1%	18.5%	152	179	3016
0.4	3.6	14209	100%	7.8%	12.1%	18.5%	157	182	4524
0.2	1.8	198985	97%	7.6%	11.8%	18.1%	179	191	8760
0.1	0.9	47148	48%	4.2%	6.6%	10.4%	99	101	8760
0.04	0.36	446	19%	1.8%	2.8%	4.6%	41	41	8760
0.02	0.18	26	10%	0.9%	1.4%	2.4%	21	21	8760

Tabel A.4 *Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van HR-PEM (30%/70%) micro-wk.*

Pel kWe	Pth kWth	Buffer kg	W-dekking	PEred	PEred2	CO2red	EKR1 €/j	EKR3 €/j	Eq.Vollast Uren
9.18	21.4	0	100%	20.4%	29.3%	40.5%	217	486	760
9	21.0	3	100%	20.4%	29.3%	40.5%	217	486	775
8	18.7	29	100%	20.4%	29.3%	40.5%	217	486	872
7	16.3	87	100%	20.4%	29.3%	40.5%	217	486	997
6	14.0	163	100%	20.4%	29.3%	40.5%	217	486	1163
5	11.7	301	100%	20.4%	29.3%	40.5%	217	486	1396
4	9.3	810	100%	20.4%	29.3%	40.5%	218	486	1745
3	7.0	1770	100%	20.4%	29.3%	40.5%	222	489	2326
2	4.7	3278	100%	20.4%	29.3%	40.5%	230	493	3490
1	2.3	136252	100%	20.4%	29.3%	40.5%	279	520	6979
0.5	1.2	88642	63%	15.3%	22.6%	32.5%	284	387	8760
0.2	0.5	4303	25%	7.6%	11.8%	18.1%	179	191	8760
0.1	0.2	67	13%	4.2%	6.6%	10.4%	99	101	8760
0.05	0.1	5	6%	2.2%	3.5%	5.6%	51	51	8760

## A.2 Warmtevraag als gevolg van optimaliserende regeling

Tabel A.5 *Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van PEM (30%/60%) micro-wk met een optimaliserende regeling.*

Pel kWe	Pth kWth	Buffer kg	W-dekking	PEred	PEred2	CO2red	EKR1 €/j	EKR3 €/j	Eq.Vollast Uren
7.5	15.0	0	100%	13.5%	23.9%	36.7%	94	414	1085
10	20	0	100%	13.5%	23.9%	36.7%	94	414	814
9	18	0	100%	13.5%	23.9%	36.7%	94	414	905
8	16	0	100%	13.5%	23.9%	36.7%	94	414	1018
7	14	23	100%	13.5%	23.9%	36.7%	94	414	1163
6	12	126	100%	13.5%	23.9%	36.7%	94	414	1357
5	10	449	100%	13.5%	23.9%	36.7%	94	414	1628
4	8	1181	100%	13.5%	23.9%	36.7%	95	414	2036
3	6	2060	100%	13.5%	23.9%	36.7%	101	417	2714
2	4	7146	100%	13.5%	23.9%	36.7%	108	422	4071
1	2	183310	100%	13.5%	23.9%	36.7%	159	450	8142
0.5	1	62374	54%	9.3%	17.2%	27.7%	206	308	8760
0.25	0.5	5726	27%	5.6%	10.7%	18.1%	169	191	8760
0.1	0.2	37	11%	2.5%	5.0%	8.9%	83	85	8760

Tabel A.6 *Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van SOFC (40%/45%) micro-wk met een optimaliserende regeling.*

Pel kWe	Pth kWth	Buffer kg	W-dekking	PEred	PEred2	CO2red	EKR1 €/j	EKR3 €/j	Eq.Vollast Uren
13.3	15.0	0	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-30	612	1085
16	18.0	0	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-30	612	905
14	15.8	0	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-30	612	1034
12	13.5	41	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-30	612	1206
10	11.3	206	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-30	612	1448
9	10.1	410	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-30	612	1608
8	9.0	780	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-29	612	1809
7	7.9	1234	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-29	612	2068
6	6.8	1723	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-27	613	2413
5	5.6	2232	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-25	614	2895
4	4.5	3740	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-23	616	3619
3	3.4	32103	100%	16.0%	28.7%	43.1%	-16	619	4825
2	2.3	146627	100%	16.0%	28.7%	43.1%	9	633	7238
1	1.1	81731	61%	12.9%	23.7%	36.9%	136	455	8760



Tabel A.7 *Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van Stirling (10%/90%) micro-wk met een optimaliserende regeling.*

Pth kWth	Pel kWe	Buffer kg	W-dekking	PERed	PERed2	CO2red	EKR1 €/j	EKR3 €/j	Eq.Vollast Uren
15.0	1.67	0	100%	7.8%	12.1%	18.5%	141	173	1085
18	2	0	100%	7.8%	12.1%	18.5%	141	173	905
16.2	1.8	0	100%	7.8%	12.1%	18.5%	141	173	1005
14.4	1.6	10	100%	7.8%	12.1%	18.5%	141	173	1131
12.6	1.4	86	100%	7.8%	12.1%	18.5%	141	173	1292
10.8	1.2	282	100%	7.8%	12.1%	18.5%	141	173	1508
9	1	780	100%	7.8%	12.1%	18.5%	142	173	1809
7.2	0.8	1524	100%	7.8%	12.1%	18.5%	147	176	2262
5.4	0.6	2336	100%	7.8%	12.1%	18.5%	156	181	3016
3.6	0.4	14103	100%	7.8%	12.1%	18.5%	159	183	4524
1.8	0.2	198913	97%	7.6%	11.8%	18.1%	179	191	8760
0.9	0.1	47107	48%	4.2%	6.6%	10.4%	99	101	8760
0.45	0.05	3578	24%	2.2%	3.5%	5.6%	51	51	8760
0.18	0.02	23	10%	0.9%	1.4%	2.4%	21	21	8760

Tabel A.8 *Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van HR-PEM (30%/70%) micro-wk met een optimaliserende regeling.*

Pth kWth	Pel kWe	Buffer kg	W-dekking	PERed	PERed2	CO2red	EKR1 €/j	EKR3 €/j	Eq.Vollast Uren
6.43	15.0	0	100%	20.4%	29.3%	40.5%	231	494	1085
9	21.0	0	100%	20.4%	29.3%	40.5%	231	494	775
8	18.7	0	100%	20.4%	29.3%	40.5%	231	494	872
7	16.3	0	100%	20.4%	29.3%	40.5%	231	494	997
6	14.0	23	100%	20.4%	29.3%	40.5%	231	494	1163
5	11.7	154	100%	20.4%	29.3%	40.5%	231	494	1396
4	9.3	664	100%	20.4%	29.3%	40.5%	231	494	1745
3	7.0	1612	100%	20.4%	29.3%	40.5%	235	496	2326
2	4.7	3133	100%	20.4%	29.3%	40.5%	243	500	3490
1	2.3	136189	100%	20.4%	29.3%	40.5%	281	521	6979
0.5	1.2	88603	63%	15.3%	22.6%	32.5%	284	387	8760
0.25	0.6	9604	31%	9.2%	14.1%	21.2%	208	230	8760
0.1	0.2	61	13%	4.2%	6.6%	10.4%	99	101	8760
0.05	0.1	3	6%	2.2%	3.5%	5.6%	51	51	8760

### A.3 Volledige dagbuffering

Tabel A.9 *Verband tussen vermogen, additionele buffergrootte en warmte dekking van een PEM (30%/60%) micro-wk bij volledige dagbuffering.*

Pth kWth	Pel kWe	Buffer kg	W-dekking	PERed	PERed2	CO2red	EKR1 €/j	EKR3 €/j	Eq.Vollast Uren
2.7	5.4	0	100%	13.5%	23.9%	35.7%	165	453	3037
10	20	0	100%	13.5%	23.9%	35.7%	165	453	814
9	18	0	100%	13.5%	23.9%	35.7%	165	453	905
8	16	0	100%	13.5%	23.9%	35.7%	165	453	1018
7	14	0	100%	13.5%	23.9%	35.7%	165	453	1163
6	12	0	100%	13.5%	23.9%	35.7%	165	453	1357
5	10	0	100%	13.5%	23.9%	35.7%	165	453	1628
4	8	0	100%	13.5%	23.9%	35.7%	165	453	2036
3	6	0	100%	13.5%	23.9%	35.7%	165	453	2714
2	4	5688	100%	13.5%	23.9%	35.7%	165	453	4071
1	2	182450	100%	13.5%	23.9%	35.7%	207	476	8142
0.5	1	61872	54%	9.3%	17.2%	26.8%	283	351	8760
0.25	0.5	5596	27%	5.6%	10.7%	17.4%	215	216	8760
0.1	0.2	0	11%	2.5%	5.0%	8.5%	87	87	8760

Hieruit blijkt dat ideale volledige dagbuffering leidt tot 3000 equivalente vollasturen per jaar.

### A.4 Patroonafhankelijkheid

Hieronder zijn de resultaten weergegeven van simulaties met huishouden B in plaats van huishouden A.

Tabel A.10 *Verband tussen vermogen, buffergrootte en warmte dekking van PEM (30%/60%) micro-wk, huishouden B.*

Pth kWth	Pel kWe	Buffer kg	W-dekking	PERed	PERed2	CO2red	EKR1 €/j	EKR3 €/j	Eq.Vollast Uren
10.7	21.4	0	100%	13.5%	23.9%	36.7%	21	442	894
10	20	0	100%	13.5%	23.9%	36.7%	21	442	957
9	18	50	100%	13.5%	23.9%	36.7%	21	442	1063
8	16	195	100%	13.5%	23.9%	36.7%	21	442	1196
7	14	433	100%	13.5%	23.9%	36.7%	21	442	1367
6	12	706	100%	13.5%	23.9%	36.7%	21	442	1595
5	10	1090	100%	13.5%	23.9%	36.7%	22	443	1914
4	8	1749	100%	13.5%	23.9%	36.7%	24	444	2392
3	6	2559	100%	13.5%	23.9%	36.7%	28	446	3189
2	4	13076	100%	13.5%	23.9%	36.7%	35	450	4784
1	2	164764	92%	12.8%	22.9%	35.5%	77	437	8760
0.5	1	26976	46%	8.3%	15.5%	25.3%	151	284	8760
0.25	0.5	1839	23%	4.9%	9.4%	16.1%	140	180	8760
0.1	0.2	21	9%	2.2%	4.3%	7.7%	83	90	8760

Vergelijking met paragraaf A.1 laat zien dat de maximale besparing hetzelfde beeld oplevert als huishouden A. Het aantal bedrijfsuren is toegenomen.

BIJLAGE B SCHEMA TERUGGELEVERDE KWH, PARTICULIERE EXPLOITATIE

Tabel B.1 *Schema teruggeleverde kWh, huidige situatie (Scheepers, 2004)*

Nu	Micro-wk	Buurman	Netwerkbedrijf	E-bedrijf Leveranciers	Overheid	Grote E- produ- centen
Kosten	Gas €/m <sup>3</sup> (commodity, transport, EB, BTW) + vastrecht €/maand (extra onderhoud t.o.v. HR-ketel) (extra investering t.o.v. HR-ketel)	Elektrici- teitskosten kleinverbruik (commodity, transport, EB, BTW) + vastrecht	Passief netmanagement: elektriciteitsnet: mogelijk netverzwaring nodig om stroomkwaliteit onder alle omstandigheden te garanderen (afhankelijk van penetratie micro-wk) Extra kosten/voordelen (bijv. netverlies) afhankelijk van tijdstip en hoeveelheid micro-wk	Inkoopkosten bij particulier met micro-wk Extra transactiekosten en risicodekking.	Minder EB en BTW inkomsten op elektriciteit	Verminderde stroomver- koop aan elektriciteits- leveranciers (retailers)
Op- brengsten	Inkoop door energieleverancier: commodityprijs gebaseerd op forwardprijzen op OTC markt (zie <a href="http://www.endex.nl">www.endex.nl</a> of Energiebeursbulletin): minus bijvoorbeeld 10% voor transactiekosten/risico energieleverancier. Verhoogde leveringszekerheid voor de consument	Misschien minder uitval	Gasinfra: betere benuttinggraad gasnet (langere bedrijfstijden), extra doorvoer	Vermeden inkoop bij grootschalige producenten Extra gasverkoop en levering van micro-wk (business model heeft verschillende 'revenue drivers'; leverancier optimaliseert op revenue driver waar minste concurrentie wordt ondervonden)	Bijdrage aan overheidsdoelstellingen : leveringszekerheid, energiebesparing en CO <sub>2</sub> emissiereductie <sup>5</sup> (d.w.z. dat overheid bereid zal zijn ontwikkeling eventueel te ondersteunen) Meer EB en BTW inkomsten uit gas	

<sup>5</sup> Leveringszekerheid en CO<sub>2</sub>-emissiereductie leveren een extern economisch effect op, d.w.z. er zijn kosten en baten aan te wijzen die buiten het energiesysteem liggen (niet bij de energiebedrijven en consumenten terecht komen). Voor leveringszekerheid is dit eventuele bedreiging van de welvaartsontwikkeling en CO<sub>2</sub>-emissiereductie de eventuele schade door het broeikas-effect. Energiebesparing levert zelf geen extern effect op, maar draagt bij aan leveringszekerheid en CO<sub>2</sub>-emissiereductie. Als publieke belangenbehartiger stelt de overheid belang in het realiseren van positieve en vermijden van negatieve externe effecten. Beleidsmaatregelen waarbij externaliteiten worden geïnternaliseerd (zoals bij CO<sub>2</sub>-emissiehandel) zijn economisch efficiënt en hebben daarom de voorkeur boven beleidsmaatregelen die minder efficiënt zijn (heffingen en subsidies). De overheid kan ook bepaalde technologische ontwikkelingen (tijdelijk) ondersteunen omdat deze de voorziening economisch efficiënter maken (voordeel komt primair de terecht bij de marktpartijen), maar dan op grond van versterking van de economie.

Tabel B.2 *Schema teruggeleverde kWh, gewenste situatie (Scheepers, 2004)*

Gewenst	Micro-wk	Buurman	Netwerkbedrijf	E-bedrijf Leveranciers	Overheid	Grote E- producenten
Kosten	Extra vastrecht wanneer gasverbruik voor micro-wk apart wordt geregistreerd vanwege vrijstelling EB <sup>6</sup>	Elektriciteitskosten kleinverbruik (commodity, transport, EB, BTW) + vastrecht	Actief netmanagement: investeringen in ICT ('active networks') Compensatie voor voordelen die micro-wk de netbeheerder biedt door nettarieven.	Inkoop regel- en reservevermogen bij micro-wk	Investeringssubsidie (via EPR?) Minder EB (en BTW over EB) inkomsten uit gas of MEP bijdrage <sup>7</sup>	Minder verkoop van regel- en reservevermogen aan TSO (TenneT).
Opbrengsten	Opbrengst uit levering van regel- en reservevermogen aan energieleverancier (bijvoorbeeld 50 uur/jaar 1 €/kWh) MEP-vergoeding voor levering van CO <sub>2</sub> -vrije stroom <sup>8</sup>	Misschien minder uitval	Geen netverzwaring nodig en lagere netverliezen. Verhoogde leveringszekerheid, c.q. besparingen op netinvesteringen hiervoor. Verbetering netstabiliteit tgv inverters (DEGO) Hoger vastrecht.	Minder investeringen in eigen regel- en reservevermogen of inkoop daarvan bij grootschalige producenten		

<sup>6</sup> Afhankelijk van welk model wordt gekozen dat zorg draagt voor 'level playing field' en compensatie voor externaliteiten

<sup>7</sup> Zie 2.

<sup>8</sup> MEP vergoeding 2,58 €/kWh; Zie ook 2.

## REFERENTIES

- Brinkhorst, L. J. (2003) *Regeling kooldioxide-index warmtekrachtkoppeling Elektriciteitswet 1998*, Ministerie van Economische Zaken, Den Haag/WJZ 3069447.
- Brinkhorst, L. J. (2004) *Voorstel subsidiebedragen MEP-regeling voor duurzame energie 1e helft 2006 en voor WKK in 2e helft 2004*, Ministerie van Economische Zaken, Den Haag/ME/EP/DE/4029714.
- Continuon (2004) *Tarieven gastransport Continuon Netbeheer per 1 juli 2004*, Continuon Netbeheer, Arnhem, [www.continuoon.nl](http://www.continuoon.nl).
- Donkelaar, M. t.; Harmsen R. & Scheepers M. J. J. (2004) *Advies WKK MEP-tarief 2004*, ECN, Petten/C-04-049.
- NUON N.V. (2004) *Energietarieven 1 juli 2004*, Nuon NV, Arnhem, [www.nuon.nl](http://www.nuon.nl).
- Postbus 51 (2004) *Energiebelasting: zelf opwekken van elektriciteit*, Informatieloket vd Rijksoverheid, Den Haag.
- Productschap Tuinbouw (2004) *WKK-gasprijs en financiële steun voor WKK*, Productschap Tuinbouw, Zoetermeer, [www.tuinbouw.nl](http://www.tuinbouw.nl).
- Ribberink, J. S. (2002) *Gevolgen MEP-regeling voor micro-warmtekracht*, ECN, Petten, 21 november 2002/Notitie 7.2917 02PC02.
- Ruijg, G. J.; Laag, P. C. v. d. (2003) *Rentabiliteit van micro warmtekrachtsystemen. Beschouwingen vanuit een particulier (eindgebruikers-) perspectief*, ECN, Petten, ECN-C--03-012.
- Ruijg, G. J.; Ribberink J. S. (2004) *Rentabiliteitsanalyse van micro-warmtekracht systemen: invloed van opslag en regeling*, ECN, Petten, ECN-C--04-023.
- Scheepers, M. J. J. (2004) *Mondelinge mededelingen*, ECN, Petten.
- Tillemans, F. W. A.; Groot A. de. (2002) *Evaluation of benefits and barriers of hydrogen in residential districts*, ECN, Petten, ECN-C-01-020.