



SenterNovem

Agentschap voor duurzaamheid en innovatie



gasunie

# Aggregatie van micro-wkk's in een virtuele centrale

## First trial smart power system

### openbare eindrapportage

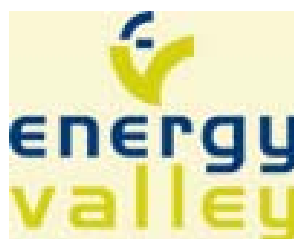
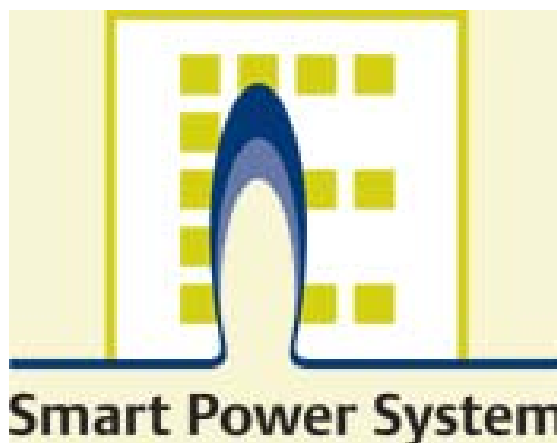
*M.P.F. Hommelberg, B. Roossien, C.J. Warmer, J.K. Kok,  
F.J. Kuijper, Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN)*

*J.W. Turkstra, Gasunie Engineering & Technology*



**E-NetBeheer**

**Continuon**  
steekt energie in uw netwerk



Juli 2007

## Verantwoording

Dit project is uitgevoerd binnen het programma Netten van het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) te Petten in samenwerking met Gasunie Engineering & Technology en in opdracht van het Smart Power System (SPS) consortium, een initiatief van Energy Valley met GasTerra, Gasunie, Continuon, TNO, ECN, Essent Netbeheer B.V., Eneco Netbeheer B.V. Essent Energy Services, ICT Automatisering, TietoEnator, KEMA, TU Delft en N.V. NOM. Wij danken Eneco Energie, Essent Retail Services, Rendo Energie Service en Cogas Energie voor hun medewerking aan de veldtest. Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, regeling EOS Demonstratie uitgevoerd door SenterNovem (DEMO03021). Het project is bij ECN bekend onder de projectnummers 7.9015 en 7.9054.

## Samenvatting

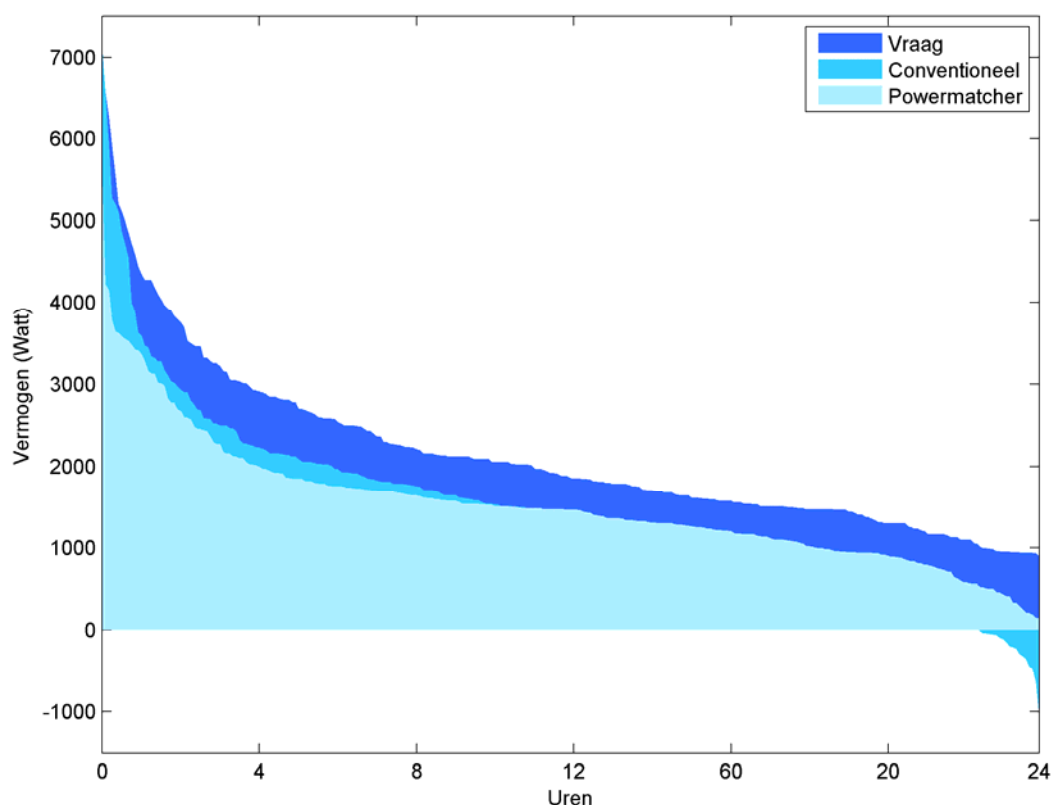
Gecombineerde warmtekracht opwekking in woningen (micro-wkk) is een vorm van decentrale opwekking die sterk in opkomst is. Micro-wkk bespaart energie ten opzichte van centrale elektriciteitsopwekking omdat bij micro-wkk de vrijgekomen restwarmte (inclusief condenswarmte) volledig wordt benut en geen verliezen voor elektriciteitstransport naar de woning meer optreden. Micro-wkk toestellen worden door de ketelfabrikanten gezien als de natuurlijke opvolger van de HR-ketel en vanaf 2008/2009 zullen micro-wkk producten als “HR-e ketels” op de markt worden gebracht.

Door grote aantallen micro-wkk, zonnecellen en windmolens, en eventueel ook verbruikstoestellen als warmtepompen en elektrische auto's, te integreren via een informatie- en communicatiesysteem kan een zogenaamd Smart Power System of virtuele centrale worden gecreëerd. Het doel van een virtuele centrale, mogelijk gemaakt door een Smart Power System, is het optimaliseren van de waarde van decentrale opwekking voor de energiewaardeketen. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door met behulp van intelligente aansturing en monitoring veel grotere penetraties van decentrale opwekking toe gaan laten op bestaande infrastructuur. Om dit principe te toetsen is in dit project een virtuele centrale gecreëerd die als specifiek regeldoel had de belasting op een distributienet met enkel en alleen micro-wkk's te minimaliseren.

De gebruikte regelfilosofie was het PowerMatcher™ principe van ECN. PowerMatcher is gebaseerd op het vinden van een optimaal werkpunt door middel van handel op een virtuele markt. Ieder element in het Smart Power System, in dit geval de micro-wkk's en het onderstation van het distributienet, wordt vertegenwoordigd door een Agent die kan bieden op de elektronische handelsmarkt. De Agent van de micro-wkk neemt bij het onderhandelen het gewenste warmtecomfort van de eindverbruiker en de systeemeisen van de opwekker als uitgangspunt. De agent van het onderstation neemt de belasting van het lokale net als uitgangspunt voor onderhandeling. Op deze manier zal het best mogelijke compromis ontstaan tussen aan de ene kant het warmtecomfort van de eindverbruiker en aan de andere kant de belasting van het lokale distributienet. Het PowerMatcher principe is onbeperkt schaalbaar in aantal elementen en intrinsiek fail-safe: bij wegvallen van de communicatie vallen de elementen terug op hun standaard controlestrategie.

Belangrijkste bevinding van dit onderzoek is dat naast de invloed die micro-wkk standaard heeft op de loadcurve van onderstation, meer bereikt kan worden door gebruik van een Smart Power System. De belastingduurkrommes van zowel de zomer als wintersituatie zijn een stuk vlakker en de maximale belasting op het onderstation kan flink worden teruggebracht. In de zomersituatie werd in de veldtest de piekbelasting teruggebracht ~ 30% en de wintersituatie bleek een piekreductie mogelijk van ~50% zonder dat dit gevolgen had voor het warmtecomfort in de woningen. Dit resultaat toont in principe alleen de effectiviteit van het PowerMatcher principe aan. Echter voordat decentrale opwekking in combinatie met Smart Power kan worden overwogen als alternatief voor netverzwaring zal eerst een zeer hoge mate van betrouwbaarheid van het systeem moeten worden aangetoond onder diverse (extreme) omstandigheden.

Essentieel voor het succesvol bedrijven van een Smart Power System is dat de systeembeheerder, via direct contact met de eindverbruiker de oorzaak van een klacht kan achterhalen. Als dit goed geregeld is, zal het extern lokaliseren en oplossen van problemen een feature kunnen worden van het Smart Power System. Indien de communicatie via schijven verloopt, dreigt altijd het gevaar dat de betrokken partijen de klacht aan de verkeerde regeling (Agent, micro-wkk, thermostaat) gaan toeschrijven en de eindgebruiker te lang met het probleem blijft zitten.



*Gemeten belastingduurkromme van respectievelijk het vraagpatroon (geen micro-wkk's), micro-wkk's die conventioneel gestuurd zijn en micro-wkk's die door de PowerMatcher worden aangestuurd.*

De micro-wkk systemen gebruikt in deze veldtest (WhisperGen Mk4 + 110 liter tapwatervat) waren qua warmtekracht verhouding goed gedimensioneerd voor de testlocaties, maar qua warmteoutput eigenlijk iets te hoog voor een virtuele centrale. Additionele opslag en verhoging elektrisch rendement is de sleutel voor verdere flexibilisering van toekomstige virtuele centrales. Hierbij kan niet alleen gedacht worden aan thermische opslag, maar ook elektrische opslag lijkt de kansen op verdere flexibilisering te vergroten. Met de introductie van Free Piston Stirling met ~18% elektrisch rendement en brandstofcellen met ~35% elektrisch rendement zal nog meer flexibiliteit mogelijk worden.

Een flexibele Smart Power System kan in de toekomst simultaan worden ingezet voor andere business cases dan alleen het ontlasten van een onderstation. Te denken valt aan 'optimaal gebruik eigen productie', 'opvangen onbalans landelijk elektriciteit netwerk', 'optimalisatie portfolio retailer', en 'reduceren piekbelasting gasnetwerk'. De combinatie van verschillende business cases kan de waarde van de PowerMatcher in combinatie met micro-wkk aanzienlijk vergroten. Onderzoek naar de waarde van deze business cases is dan ook gewenst. ECN en Gasunie Engineering & Technology zijn voornemens in samenwerking met het Smart Power Systems (SPS) consortium hieraan vervolg te geven middels het Europese FP6 project INTEGRAL, SmartProofs en diverse andere initiatieven.

## Inhoud

1.	Inleiding	7
1.1	Projectscope	7
1.2	Doelstelling	8
2.	Werkwijze	9
2.1	Opzet van de veldtest	9
2.2	Lokale meetinfrastructuur	9
3.	Inhoudelijke rapportage	11
3.1	Simulatie	11
3.2	Resultaten data-analyse	12
3.3	Simulatie versus Veldtest	14
3.4	Seizoensinvloeden	15
3.5	Gebruikerservaringen	18
3.6	Conclusies	18
4.	Bijdrage aan de EOS: Demonstratie doelstellingen	20
4.1	Besparing van primaire energie (PJ) en/of de besparing van CO <sub>2</sub> emissie(equivalent) op projectniveau	20
4.2	De bijdrage aan een duurzame energiehuishouding: economische ontwikkelingen	23
4.3	De bijdrage aan de innovatie ten opzichte van de huidige stand van de techniek in Nederland	24
5.	Conclusie en aanbevelingen	26
6.	Publicaties	27
7.	Referenties	27

## Veel gebruikte afkortingen

**micro-wkk:** opwekking van elektriciteit in de woning met behulp van een aardgasgestookte generator en benutting van de vrijgekomen restwarmte (inclusief condenswarmte) voor tapwaterbereiding en/of ruimteverwarming.

**VPP:** Virtual Power Plant of virtuele (elektriciteit-)centrale. Een cluster van centraal gemonitorde en aangestuurde decentrale opwekkers, eventueel met inbegrip van elektriciteitsverbruikstoestellen.

**SPS:** Smart Power System: in principe een VPP, maar vaak met een nog ruimere scope. SPS omvat ook integratie van slimme meters, lokale energie management systemen, nieuwe facturering (Billing) concepten, etc.

**CRISP:** het Europese project ‘‘Distributed Intelligence in Critical Infrastructures for Sustainable Power. ECN was de coördinator van het project en verantwoordelijk voor de veldtest waarin het PowerMatcher concept is ontwikkeld getest (<http://www.crisp.ecn.nl>).

**UMTS:** Universal Mobile Telecommunications System, een telecommunicatiestandaard die ten opzichte van GPRS (General Packet Radio Services) bijna acht keer zo snel dataverkeer mogelijk maakt.

## 1. Inleiding

De energiewereld bevindt zich momenteel in een transitie naar een duurzame energiehuishouding. Met de overgang van fossiele brandstoffen naar duurzame brandstoffen zal tevens de inrichting van de energie-infrastructuur veranderen. De huidige energie-infrastructuur is zeer sterk centraal ingericht met grote conventionele opwekeenheden vanwaar de energie door middel van een steeds verder vertakkend netwerk bij de afnemers wordt gebracht. Nieuwe opwekkers, zoals windmolens, biomassa vergistinginstallaties of wkk-eenheden worden veelal decentraal uitgerold.

De energiestructuur van de toekomst ondersteunt een duurzame energiehuishouding waarin verschillende decentrale energieomzetters met elkaar in een netwerk worden geïntegreerd. Vanuit dit netwerk zullen de verschillende afnemers van energie voorzien worden. Hierbij ontstaat in eerste instantie een netwerkstructuur, opgebouwd uit decentrale opwekeenheden op basis van fossiele brandstoffen en duurzame energie (wind, zon).

Micro-wkk is één van de vormen van decentrale opwekking die momenteel sterk in opkomst is. Met micro-wkk kan een aanzienlijke energie-efficiëntieslag worden behaald. Energieopwekking met behulp van micro-wkk vindt aanzienlijk efficiënter plaats dan bij de huidige conventionele elektriciteitscentrales. Bij energieopwekking met behulp van warmtekrachtkoppeling wordt namelijk alle primaire energie benut (zelfs inclusief condenswarmte) terwijl conventionele gasgestookte centrales een opwekkendement hebben van 50%. Zo is met behulp van micro-wkk op basis van brandstofcellen is ongeveer 40% energiebesparing mogelijk ten opzichte van de referentiesituatie op basis van conventionele elektriciteitscentrale en HR-ketel.

Door geclusterd beïnvloeden van verschillende decentrale opwekeenheden via een informatie- en communicatiesysteem ontstaat een virtuele elektriciteitscentrale. Hierbij moet worden gedacht aan een systeem waarin duizenden decentrale autonome opwekeenheden zoals micro-wkk's worden geaggregeerd. Tevens kunnen hierin ook andere decentrale opwekeenheden zoals windmolens en zonnecellen of beïnvloedbare vraag (demand response) geïntegreerd worden. Het doel van een virtuele elektriciteitscentrale is het optimaliseren van de waarde en het minimaliseren van de risico's van decentrale opwekking voor eindverbruikers, energie retailers en netbeheerders.

### 1.1 Projectscope

Momenteel worden verschillende initiatieven genomen op het gebied van Stirling gebaseerde micro-wkk's. GasTerra en Gasunie Engineering & Technology in samenwerking met de energie retailers, COGEN en Stichting Natuur en Milieu hebben een transitie-experiment uitgevoerd waarbij een vijftigtal micro-wkk's bij huishoudens werd geïnstalleerd en gemonitord. In onderhavig rapport is als vervolgproject hierop de gecoördineerde aansturing van deze micro-wkk's mogelijk gemaakt. Dit is als zodanig niet eerder in Nederland uitgevoerd.

ECN heeft binnen het Europese onderzoeksproject CRISP onderzoek gedaan naar besturingssystemen voor energie-opwekeenheden in het algemeen. Op basis van dit onderzoek is een communicatie- en aansturingssysteem ontwikkeld. Het SPS consortium wil in dit project kennis en inzichten opdoen in de geschiktheid van dit systeem voor de besturing van de virtual power plant waarin meerdere micro-wkk's geïntegreerd worden. Daarom is ervoor gekozen om in dit project een tiental micro-wkk systemen te integreren tot een virtuele centrale.

## 1.2 Doelstelling

De probleemstelling die in dit demonstratieproject centraal staat, is: *“Op welke wijze kan het concept van de virtual power plant worden ingezet voor de gecontroleerde decentrale opwekking van elektriciteit.”*

Technische deelaspecten die hierbij onder andere aan de orde komen, zijn:

- Op welke wijze kunnen verschillende decentraal geplaatste micro-wkk's worden aangestuurd binnen het concept van een virtuele centrale?
- Op welke wijze ervaren de huishoudens de deelname aan een virtuele centrale?
- Welke mogelijkheden en knelpunten doen zich voor ten aanzien van de teruglevering van elektriciteit door de micro-wkk's binnen een virtuele centrale?

De doelstellingen die de betrokken partijen met dit demonstratieproject nastreven zijn:

- Aantonen dat decentraal aangestuurde (“intelligente”) micro-wkk systemen een kans kunnen zijn voor netwerkbeheerders. Conventionele micro-wkk, die alleen op warmtevraag afgesteld is, geeft momenteel aanleiding tot enkele zorgen bij lokale netbeheerders op het gebied van spanningshuishouding, power quality en stabiliteit (“bedreiging”). Decentraal aangestuurde micro-wkk's moeten deze zorgen waar mogelijk wegnemen en aantonen dat ze de netbeheerder actief kunnen helpen bij het uitvoeren van haar taken (“kans”).
- Het grote publiek actief betrekken bij energievraagstukken. Door het concept van de virtuele centrale voor micro-wkk's veranderen de huishoudens van passieve eindverbruikers in actieve producenten van energie. Deze omslag vergt een volledige omschakeling in het denken van alle deelnemers in de energiewaardeketen. Door de decentrale elektriciteitproductie on-line te monitoren en aan te sturen wordt dit bijzondere aspect benadrukt.



## 2. Werkwijze

### 2.1 Opzet van de veldtest

Op elke locatie is een z.g. lokale node (VPP node) geïnstalleerd. De VPP node vormt de interface tussen de VPP infrastructuur en de lokaal opgestelde micro-wkk en de meetinfrastructuur. De tien VPP nodes vormen samen met de centraal opgestelde VPP server, waarop de PowerMatcher besturingssoftware draait, een virtuele centrale.

Randvoorwaarden bij het ontwerp van de lokale meet- en besturingsinfrastructuur waren:

- De impact als gevolg van de installatie bij de gebruikers dient minimaal te zijn. Er mag b.v. geen extra bekabeling door het huis voor het communicatiesysteem, de thermostaat, of voor het meetsysteem worden aangelegd.
- Draadloze communicatie tussen de PowerMatcher server en VPP-nodes, teneinde interferentie met een lokale ADSL-modem te vermijden.
- Het regelalgoritme van de agent mag het comfort van de gebruiker niet verlagen.
- Bij uitval van de VPP node dient het regelsysteem terug te kunnen vallen op een back-up regelsysteem waarbij de WhisperGen direct aangestuurd wordt door de thermostaat.
- Ontwikkelingstijd en budget zijn beperkt; m.a.w. er is geen ruimte voor nieuwe ontwikkelingen met een relatief hoog risico. Praktisch gesproken betekent deze randvoorwaarde dat miniaturisatie van de VPP node niet aan de orde is.
- Hergebruik van CRISP programmacode: Een belangrijk deel van de in CRISP ontwikkelde code is hergebruikt voor de PowerMatcher server software en VPP node software. Een aantal tekortkomingen, die tijdens de CRISP veldtest ontdekt zijn, zijn door middel van een gedeeltelijk herontwerp opgelost.

De PowerMatcher server en de VPP nodes zijn in een z.g. VPN (Virtual Private Network) opgenomen om veiligheidsrisico's te minimaliseren.

Op de PowerMatcher server bevinden zich de volgende functies:

- PowerMatcher algoritme en besturingssoftware voor de VPP centrale.
- Een module voor opslag meetdata en agentdata en marktresultaten, afkomstig van alle nodes, in een centrale database (SQL-server).
- Een user interface voor de interpretatie van de meetgegevens en bewaking van het systeem.

Op de VPP node bevinden zich de volgende functies:

- Het agent regelalgoritme.
- Een module voor de opslag van meetdata en agentdata in een lokale database (SQL-server).
- Een koppeling met de thermostaat.
- Een koppeling met de micro-wkk.
- Een koppeling met de analyse meetapparatuur (kWh meter + power quality).
- Een koppeling met de PowerMatcher server via het UMTS-modem.

### 2.2 Lokale meetinfrastructuur

Gezien de complexe functies, de interfaces met de VPP-server, en de lokale meetinfrastructuur is als computerplatform gekozen voor een standaard industriële PC waarop Windows XP draait. Voordeel van deze keuze is dat het voortbordurt op de ervaringen van het CRISP project en de aanwezige kennis bij ECN. Ander belangrijk aspect was het feit dat de bestaande PowerMatcher software op basis van .NET-technologie is ontwikkeld; het hergebruik van de broncode naar een ander platform viel buiten de scope van het project.

Om alle systeemonderdelen met elkaar te laten communiceren en te kunnen voldoen aan de randvoorwaarden van de vorige paragraaf is gekozen voor power line communicatie in de woningen. Hierbij is zogenaamde LonWorks<sup>1</sup>-technologie toegepast. Enerzijds wegens gebrek aan alternatieve media (zoals RF) die de gewenste geschikte sensoren en gevraagde betrouwbaarheid konden waarborgen, anderzijds omdat bij ECN hiermee ervaring mee was.

Specifieke uitdaging was de thermostaat. Informatie uit de thermostaat is een essentieel onderdeel van het agentalgoritme: de actuele ruimtetemperatuur en de gevraagde ruimtetemperatuur.

Omdat er geen geschikte thermostaat in de markt aanwezig was, is in eigen beheer een interface met een bestaande thermostaat ontwikkeld. Hiertoe is een Power line embedded processorboard toegepast die een interface vormt tussen het PL-netwerk en de thermostaat.

Daarnaast is er ook informatie uit de meterkast noodzakelijk nl. het gas- en elektriciteitsverbruik. Hiervoor zijn standaard commercieel verkrijgbare LonWorks Power line modules gebruikt.

---

<sup>1</sup> LonWorks is een trademark van Echelon Corporation

### 3. Inhoudelijke rapportage

De in de inleiding genoemde doelstelling voor dit project is als volgt aangescherpt:

*Toon aan dat door gecoördineerde inzet van micro-wkk eenheden de piekbelasting op een distributienet met onderstation kan worden gereduceerd.*

Aangezien de micro-wkk eenheden niet allemaal op één locatie staan, maar verspreid zijn over een deel van het land, is een virtueel onderstation in de veldtest opgenomen. Het vraagpatroon van dit onderstation is gebaseerd op het door IVAM<sup>2</sup> ontwikkelde patroon, dat de elektriciteitsvraag van 100 woningen bevat. Dit vraagpatroon is teruggerekend naar het aantal aanwezige woningen in de veldtest (maximaal negen), waarbij gebruik wordt gemaakt van een 15 minuten lopend gemiddelde. Een onderstation agent vertaalt het vraagpatroon in een biedfunctie op zodanige wijze dat de micro-wkk's in de huishoudens geprikkeld worden om te gaan produceren op momenten dat er een piekbelasting in het vraagpatroon is.

#### 3.1 Simulatie

Om een referentie te hebben en inzicht te krijgen in de belasting van het onderstation, zijn er simulaties uitgevoerd. Een manier om naar de simulatieresultaten te kijken is door middel van een belastingduurkromme. In een dergelijke kromme wordt de netto belasting op het onderstation getekend voor verschillende situaties, waarbij de tijdreeks wordt gesorteerd op vermogen. Zo is eenvoudig te zien en te vergelijken hoe hoog de maximale belasting is hoe lang deze duurt. In de belastingduurkromme vergelijken we drie situaties:

- **Vraag:** Het IVAM vraagpatroon, ofwel de belasting op het onderstation als de woningen geen micro-wkk's zouden hebben
- **Conventioneel:** De belasting op het onderstation als de woningen wel micro-wkk's hebben, maar deze met een conventionele regeling worden gestuurd.
- **PowerMatcher:** De belasting op het onderstation als de woningen wel micro-wkk's hebben en deze worden geregeld door middel van de VPP nodes.

*Figuur 1* toont het resultaat van een simulatie, waarbij het scenario bestaat uit vijf micro-wkk's voor een week in de zomer periode. Er is dus alleen een tapwater vraag. De huishoudens hebben gemiddeld een relatief omvangrijk tapwaterpatroon (ongeveer 45 MJ per dag), wat overeenkomt met een 4-persoons huishouden.

De conventionele regeling bestaat eruit dat de micro-wkk's opereren in een fit-and-forget model. In dit model wordt de micro-wkk lokaal aangestuurd op basis van warmtevraag, onafhankelijk van het elektriciteitsvraagpatroon van het onderstation. Hierbij zal het dus op toeval berusten of een micro-wkk aanstaat op momenten van piekbelasting. Bij de PowerMatcher regeling worden de micro-wkk's aangestuurd mede op basis van het elektriciteitsvraagpatroon van de wijk en is er een duidelijke correlatie te verwachten tussen piekbelasting op het onderstation en aanschakelen van de micro-wkk's.

Het is onmiddellijk duidelijk in *Figuur 1* dat de conventionele regeling de piekbelasting niet structureel kan reduceren. Er zijn simulaties gedaan waarin het leek of de conventionele regeling de

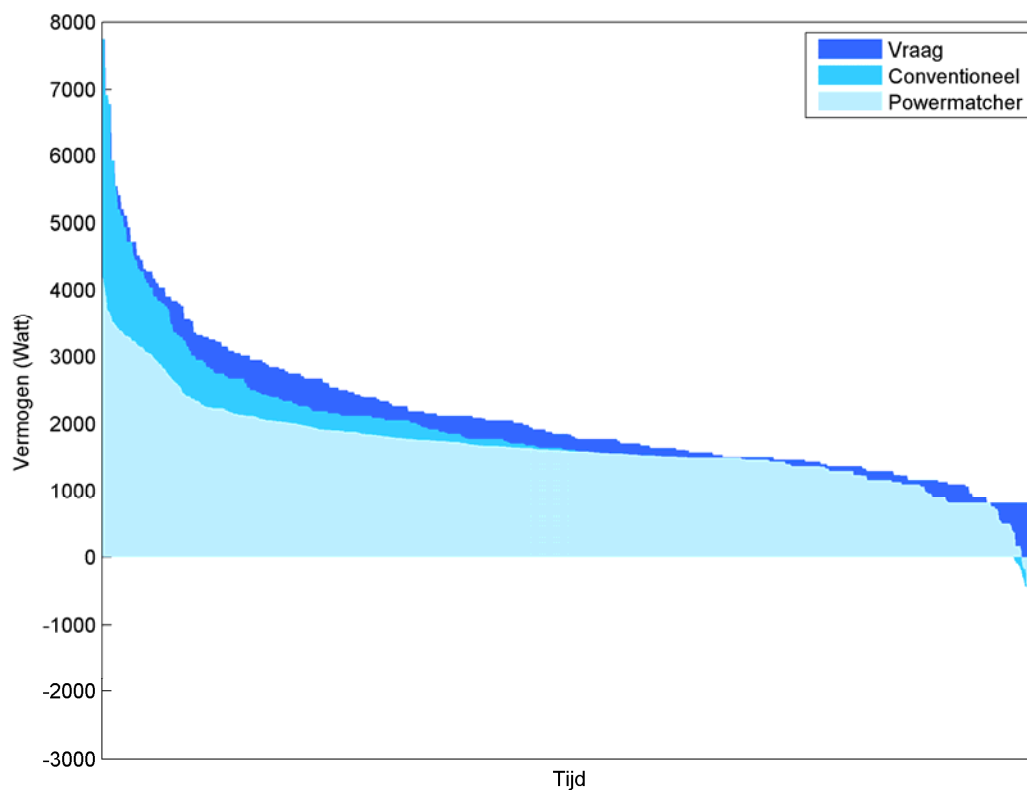
---

<sup>2</sup> IVAM is een milieukundig onderzoek- en adviesbureau, voortgekomen uit de vakgroep Milieukunde van de Universiteit van Amsterdam. Sinds 1993 maakt IVAM als zelfstandige instelling deel uit van UvA Holding BV.

piekbelasting had gereduceerd, maar dit berust op een toevallige gelijktijdigheid van een grote warmtevraag en een piekvraag in elektriciteit op het onderstation. Het kan dus zijn dat de maximale piekbelasting wordt gereduceerd, maar dit is geen zekerheid. Dit betekent dat het onderstation nog altijd moet worden gedimensioneerd op de maximale piekbelasting in de situatie zonder micro-wkk's.

De PowerMatcher regeling echter bereikt wel een lagere piekbelasting, welke ongeveer 4,3 kW bedraagt. Dit is een reductie van bijna 45% ten opzichte van de situatie zonder micro-wkk's.

In de simulaties is gebleken dat de gebruikte biedstrategie van het onderstation een grote invloed heeft op de behaalde resultaten. Binnen de biedstrategie zijn twee parameters gedefinieerd waarmee het gedrag van het virtuele onderstation beïnvloed kan worden: een maximale en een kritische belasting. De maximale belasting beïnvloedt voornamelijk de hoogte van het vlakke deel van de belastingduurkromme, waar de kritische belasting effect heeft op de piekbelasting. Deze parameters hebben ook invloed op elkaar, waardoor het niet triviaal is de 'ideale' belastingduurkromme te bereiken.



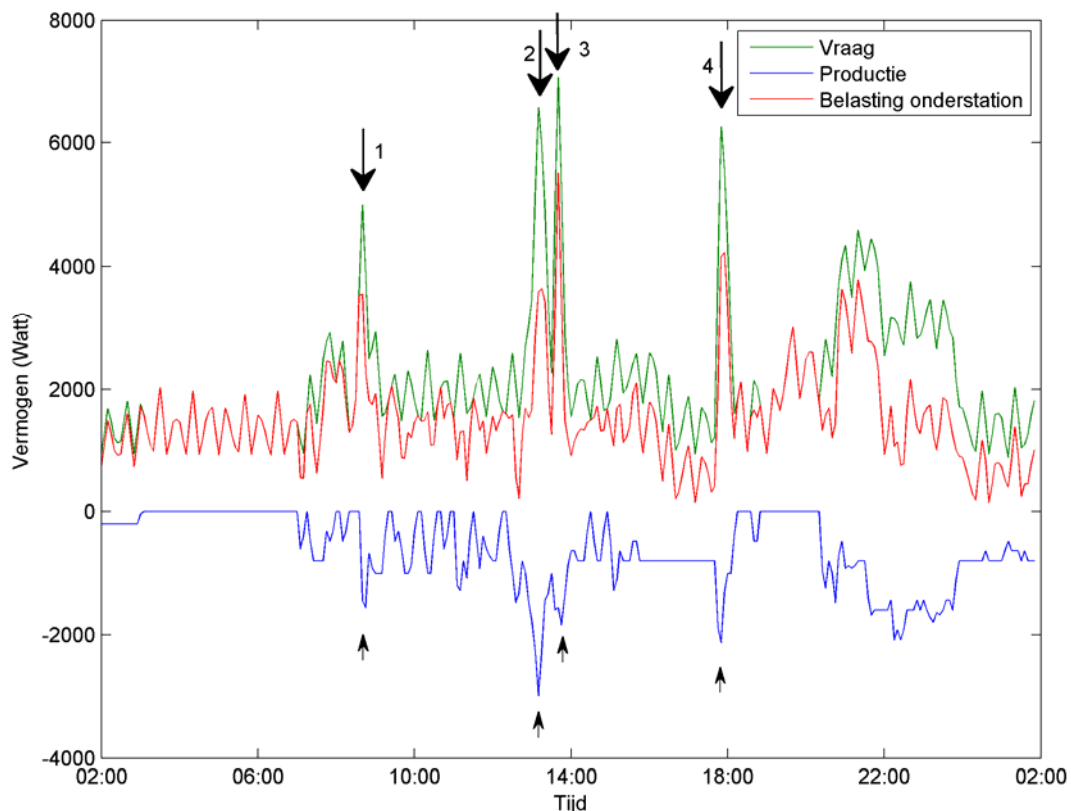
*Figuur 1: Belastingduurkromme van een zomersimulatie met vijf micro-wkk's*

### 3.2 Resultaten data-analyse

In de veldtest hebben uiteindelijk negen WhisperGen micro-wkk's functioneel deelgenomen, samen met een tiende (virtuele) node die als onderstation fungeerde. Door dit onderstation ook biedingen op de markt te laten doen aan de hand van een elektriciteitsvraagpatroon, zou het mogelijk moeten zijn om de piekbelasting op het onderstation te reduceren. Immers, de marktprijs stijgt bij een hogere vraag, waardoor het aantrekkelijker wordt om te gaan produceren. Op deze manier worden de WhisperGen's bij een hoge elektriciteitsvraag getriggered om te gaan produceren en verlagen op die manier de belasting op het onderstation.

*Figuur 2* toont de resultaten van deze veldtest voor een gehele dag ergens in mei 2007, waarbij 5 nodes deelnamen aan de VPP. De getoonde meetdata is een vijf minuten gemiddelde en komt daarmee overeen met de VPP regeling, die ook op een basis van vijf minuten werkt. In *Figuur 2* is goed te zien dat het vraagpatroon vier pieken bevat en dat de PowerMatcher regeling probeert om al deze pieken weg te regelen. Hierdoor is de uiteindelijke piekbelasting op het onderstation aanzienlijk minder. Merk op dat de pieken nooit helemaal weggeregeld kunnen worden, omdat de totale productiecapaciteit van de WhisperGen's maximaal 5kW is, terwijl de piekbelasting hier boven ligt.

Verder wordt de derde piek een stuk minder gecompenseerd dan de andere drie pieken. Dit is een gevolg van de beperkte warmtevraag die de woningen in deze meetperiode hadden. De warmtevraag bestaat namelijk vrijwel alleen uit een warm tapwater vraag. Doordat piek 2 zorgt voor de tapwatervraag, blijft er weinig over voor piek 3.

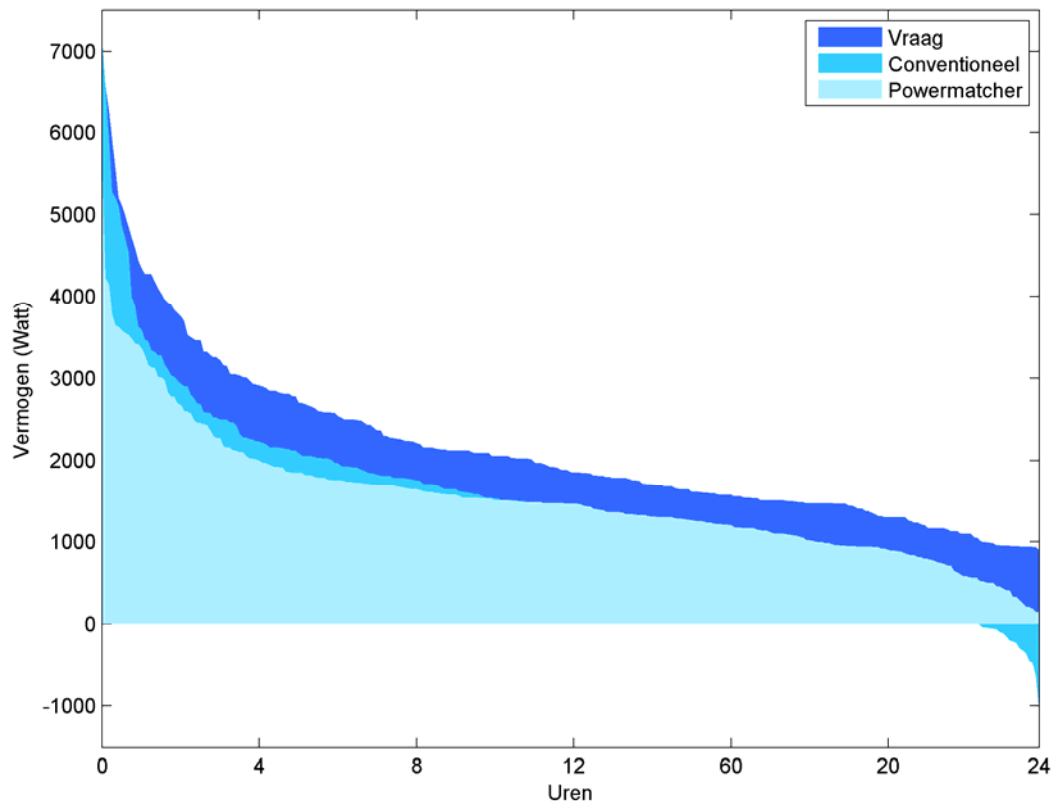


*Figuur 2: Gemeten tijdsreeksen van het vraagpatroon (groen), de totale micro-wkk productie (blauw) en de netto onderstationbelasting (rood) bij 5 WhisperGen's bij coördinatie met de PowerMatcher.*

Evenals bij de simulaties kijken we ook nu weer naar de belastingduurkromme. *Figuur 3* vergelijkt weer de drie situaties: vraag, conventioneel en PowerMatcher. De PowerMatcher periode is dezelfde als in *Figuur 2*; de conventionele regeling is gebaseerd op een vergelijkbare zomerse dag, waarbij de PowerMatcher is uitgeschakeld. De warmtevraag bij de conventionele en PowerMatcher regeling zijn vrijwel gelijk. Het is direct te zien dat de conventionele regeling de maximale belasting niet reduceert, terwijl de PowerMatcher regeling dit wel doet. Merk ook op dat bij de conventionele regeling er momenten zijn dat het onderstation aan het net levert.

Verder is er voor de PowerMatcher regeling een enkele piek te zien in de belastingduurkromme die boven de 5 kW komt, welke natuurlijk overeenkomt met piek drie uit *Figuur 2*. De PowerMatcher

regeling reduceert de piekbelasting tot 5,5 kW, wat overeenkomt met een reductie van bijna 30%. Indien het tapwater verbruik iets hoger had gelegen en piek 3 was weggeregeld, dan was de maximale piekbelasting gelijk geweest aan 4,2 kW, wat neer komt op een reductie van 45%.



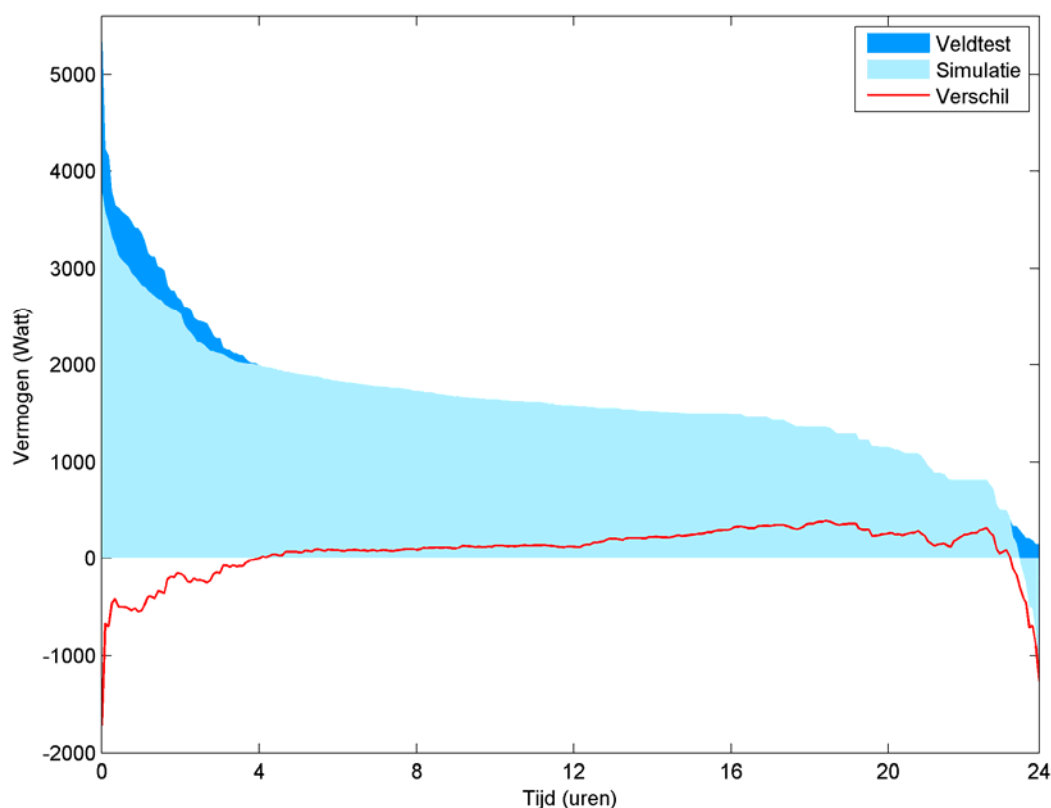
*Figuur 3: Gemeten belastingduurkromme van respectievelijk het vraagpatroon (geen micro-wkk's), micro-wkk's die conventioneel gestuurd zijn en micro-wkk's die door de PowerMatcher worden aangestuurd.*

### 3.3 Simulatie versus Veldtest

In de twee voorgaande paragrafen is aangetoond dat zowel in de simulaties als in de veldtest de maximale piekbelasting wel wordt gereduceerd door de PowerMatcher, maar niet door een conventionele regeling. De vraag die natuurlijk overblijft, is in hoeverre de simulaties en de veldtest met elkaar in overeenstemming zijn.

*Figuur 4* toont de belastingduurkromme voor de PowerMatcher regeling van zowel de veldtest als de simulatie. Tevens is het verschil tussen beide weergegeven. Hierbij kunnen een aantal dingen worden opgemerkt met betrekking tot deze verschillen. Ten eerste is er een relatief grote (negatieve) piek te zien aan de linkerzijde van de figuur. Deze piek wordt veroorzaakt door het niet kunnen weggeregeld van piek 3 in de veldtest, terwijl dit in de simulatie klaarblijkelijk wel gebeurt. Verder is een zelfde soort negatieve piek te zien aan de rechterzijde van de figuur. In de simulatie wordt er op sommige momenten meer geproduceerd dan dat er gevraagd wordt, waardoor het onderstation aan het hoger gelegen netwerk gaat leveren. Beide pieken worden veroorzaakt door het verschil in tapwatervraag. Omdat de populatie van huishoudens in de veldtest geen grote families bevat is de tapwatervraag relatief klein. De simulatie gebruikt echter een relatief omvangrijk tapwater patroon, dat te vergelijken is met een gezin met twee kinderen. De warmtevraag in de simulatie is dus groter, waardoor de PowerMatcher dus meer vrijheid heeft. Als laatste is er nog het middenstuk van de figuur, waarin de veldtest en de simulatie vrijwel met elkaar overeen komen.

Gezien de verschillen tussen de tapwatervragen is de conclusie gerechtvaardigd dat de veldtest en de simulaties met elkaar overeenkomen.



Figuur 4: Resultaatvergelijking van de simulatie en de veldtest voor de zomersituatie.

In de simulaties is het gasgebruik en elektriciteitsproductie van de PowerMatcher regeling vergeleken met de conventionele regeling. Bij deze vergelijking bleek dat de PowerMatcher regeling gemiddeld 0.5% meer gas verbruikt en 7% extra elektriciteit productie geeft. Dit verschil is geheel te wijten aan het op een verschillende manier inzetten van de boostermoden, een feature waarin de WhisperGen tijdelijk 20% meer elektriciteit en warmte produceert. In de conventionele regeling wordt de booster nauwelijks gebruikt, de PowerMatcher regeling maakt er echter regelmatig gebruik van. In de modellering is de elektriciteitsefficiëntie van de booster iets hoger waardoor de elektriciteit output ook hoger is.

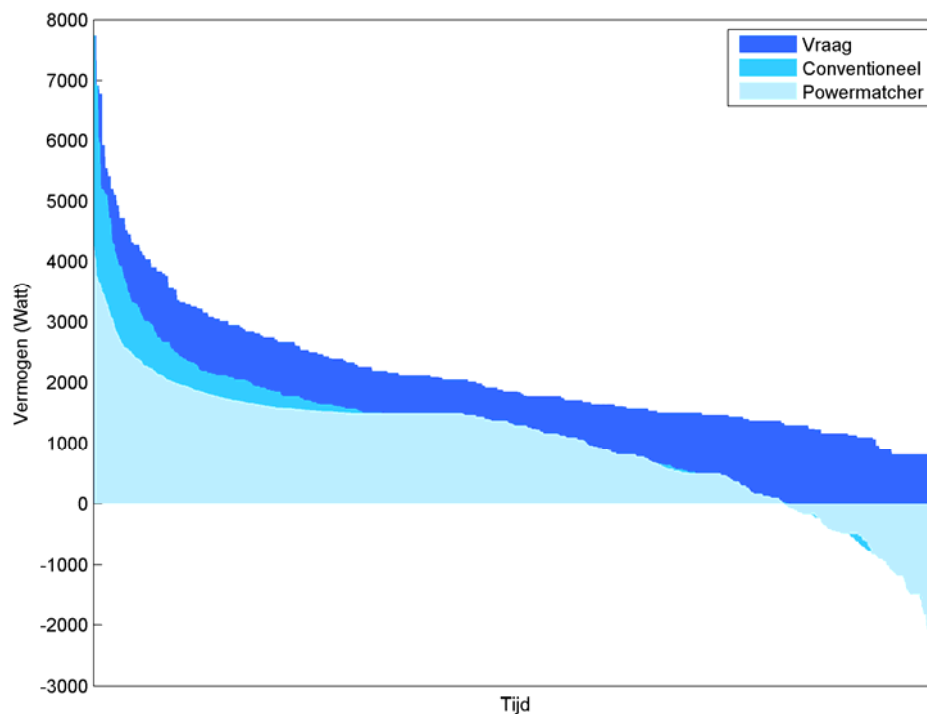
### 3.4 Seizoensinvloeden

In bovenstaande paragrafen is het gedrag in een zomersituatie besproken. In de zomer is alleen een tapwatervraag aanwezig in de huishoudens. Dit beperkt de inzet van de micro-wkk en dus de flexibiliteit in de aansturing hiervan. Toch is de flexibiliteit van tapwaterverwarming voldoende groot om een piekreductie te krijgen van 30 % (van ca. 7,7 kW naar 5,3 kW). Deze reductie komt overeen met 50% van het nominale vermogen van de 5 micro-wkk eenheden. Het via een VPP flexibel inzetbare vermogen voor piekreductie is dus ongeveer de helft van het nominale vermogen van de huidige Whispergen eenheden buiten het stookseizoen. Het ligt in de veronderstelling dat in het stookseizoen een grotere flexibiliteit aanwezig is, waardoor de piekbelasting nog een aanzienlijk stuk verder omlaag kan. Speciaal piek 3 in *Figuur 2* kan daarmee worden verlaagd.

Het resultaat van een simulatie van een winterweek voor 5 huishoudens is te zien in *Figuur 5*, waarbij het meteen duidelijk is dat er veel meer elektriciteit wordt geproduceerd dan in de zomer periode. De 4 kW belastingspiek bij een PowerMatcher regeling wordt echter niet verder gereduceerd. Zo onlogisch is dit echter niet, want de vraag op dat moment is 7,7 kW en het potentieel beschikbaar vermogen 5000 Watt (vijf micro-wkk's). Dit betekent dat de piek nooit onder de 2,7 kW kan komen. Als er nu 1 micro-wkk besluit om niet mee te doen dat zal die piek al op 3,7 Watt liggen. Het ontbreken van een verschil tussen de zomer en winter piekbelasting op het onderstation ligt dus in het beperkte aantal micro-wkk's dat meedoet. De verwachting is dan ook dat als er een groter aantal micro-wkk's meedoet, de belastingspiek naar ratio wel zal reduceren.

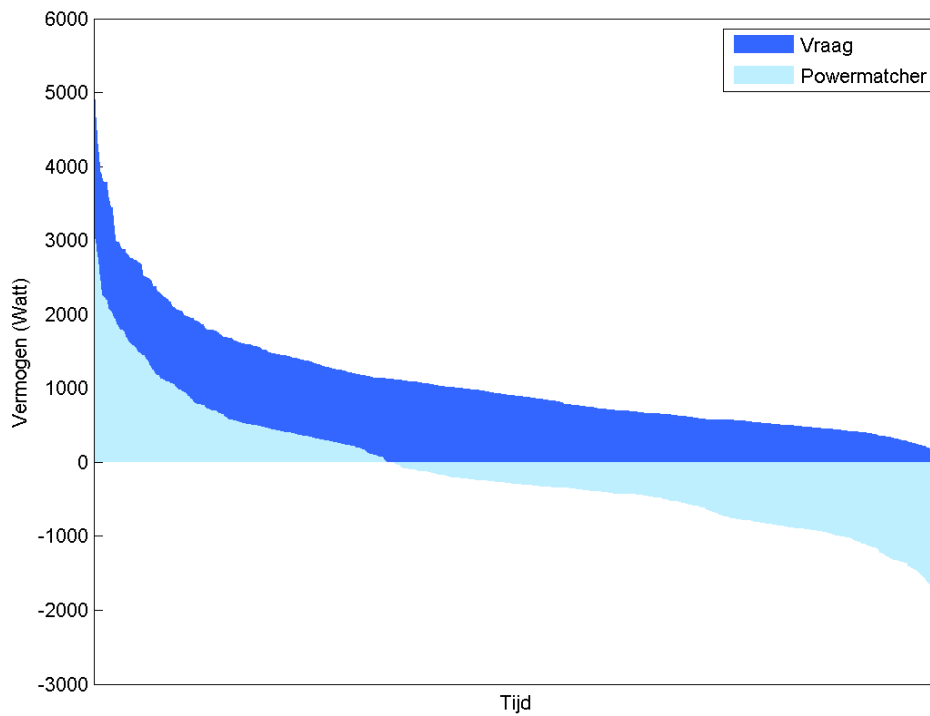
Verder is er goed te zien dat de micro-wkk's zoveel elektriciteit produceren zodat het onderstation geruime tijd aan het net levert.

*Figuur 6* toont een gemeten belastingduurkromme voor een week in november 2006. Hoewel deze metingen zijn uitgevoerd bij een ander vraagpatroon en een ander regelmechanisme voor het onderstation, vertoont het piekgedrag in de figuur toch veel gelijkenis met *Figuur 5*.

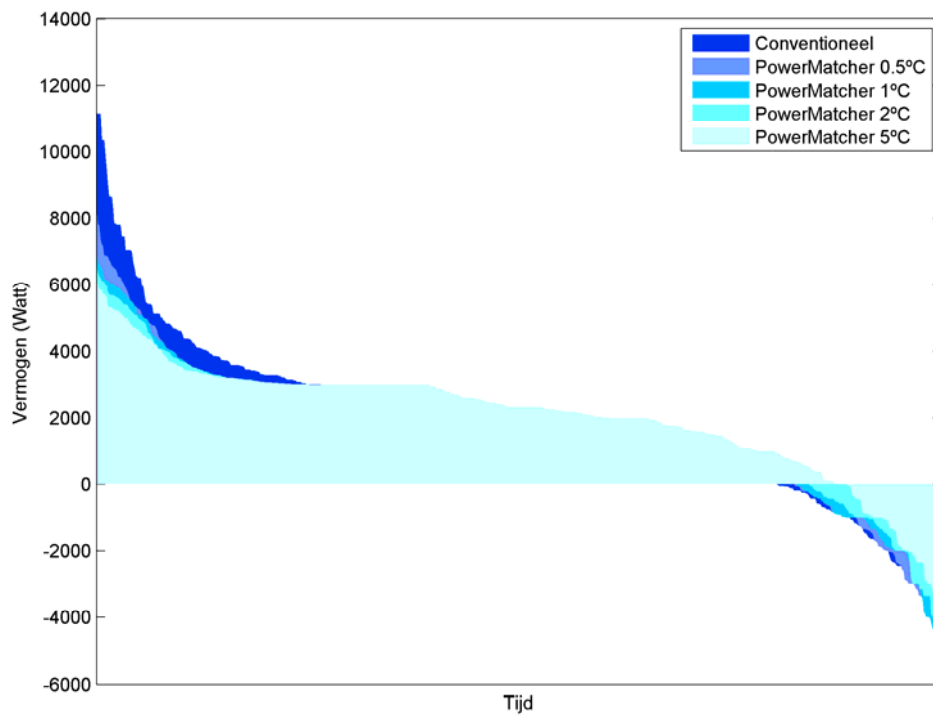


*Figuur 5: Simulatie van vijf micro-wkk's in een winterweek*





*Figuur 6: Gemeten belastingduurkromme voor een week in november 2006. Merk op dat zowel het vraagpatroon als de PowerMatcher regeling verschillen van de simulaties en de veldtest in mei 2007.*



*Figuur 7: Simulatie resultaten voor een periode in november bij verschillende toegestane afwijkingen van de setpoint temperatuur (0.5, 1, 2, en 5 °C).*

Figuur 7 laat de invloed van de toegestane afwijking op ruimtetemperatuur zien. De PowerMatcher regeling met een toegestane afwijking van 0.5 °C op de setpoint temperatuur laat een duidelijke verbetering zien in piekbelasting reductie van het onderstation. Van een 0.5 °C naar 1 °C afwijking op de setpointtemperatuur geeft ook nog een kleine verbetering, daarna is de verbetering verwaarloosbaar. Bovendien wordt het temperatuurverloop in de woning bij een toegestane afwijking boven 1 °C onacceptabel. Merk op dat hoe groter de toegestane afwijking ten opzichte van het setpoint, des te meer operationele flexibiliteit de micro-wkk's hebben. Deze flexibiliteit wordt tot uiting gebracht in de biedfuncties.

### 3.5 Gebruikerservaringen

Een van de voornaamste verschillen tussen de CRISP veldtest en deze proef is dat er eindgebruikers bij betrokken zijn en dat de installaties niet gesimuleerd worden. Met een aantal eindgebruikers is direct contact geweest en wat opviel is dat velen erg geïnteresseerd zijn in het eigen energieverbruik. Enkele malen is aan een aantal eindgebruikers die daarom vroegen meetgegevens verstrekt. Een vergelijking van het eigen energieverbruik met dat van andere gezinnen, zoals gepland in het oorspronkelijke plan, werd door een aantal eindgebruikers wenselijk genoemd.

De beschikbare regelbandbreedte op ruimtetemperatuur lijkt te verschillen per gezin. Waar sommige eindgebruikers aangeven problemen te hebben met een bandbreedte van 2 °C (1 graad omhoog en 1 graad omlaag regelruimte voor de PowerMatcher) lijken anderen daar geen problemen mee te hebben. Een bandbreedte van 2 °C betekent niet dat de temperatuur continu 1 °C afwijkt, maar dat deze maximaal 1 °C afwijkt van het op de thermostaat ingestelde setpoint.

Het (schijnbaar) afstaan van de controle over de eigen installatie lijkt in eerste instantie zeker een barrière op te werpen bij eindgebruikers. Belangrijk hierbij is het benadrukken dat de micro-wkk *onderhandelt* over het beste tijdstip om elektriciteit op te wekken, en de eindverbruiker altijd de baas blijft. Bovendien blijft de eindgebruiker communiceren via de bekende thermostaat, en wordt alleen een alternatieve regeling geïntroduceerd. Wanneer het systeem eenmaal geïnstalleerd is en het blijkt vergelijkbaar comfort te leveren met de conventionele situatie worden de zorgen weggenomen. De uiteindelijke kwesties die in de veldtest naar voren zijn gekomen waren terug te voeren op het specifieke functioneren van de hardware (vooral de thermostaat) en in principe niet op de PowerMatcher regeling.

Belangrijk is dat de eindgebruikers gewend zijn aan de typische wijze waarop een micro-wkk systeem de woning verwarmd. Een micro-wkk heeft een lager verwarmingsvermogen dan een ketel en reageert minder snel op een plotselinge verhoging van de thermostaatzetting. De gebruikte micro-wkk is (net als bijvoorbeeld een warmtepomp) erg goed in het warm houden van de woning maar iets minder goed in het snel opwarmen van de woning. De veldtest heeft aanwijzingen gegeven dat in de toekomst de eindgebruiker deze langzame reactie zou kunnen misinterpreteren als een gevolg van externe aansturing, met grote consequenties voor de bewonersacceptatie van het VPP concept. Met de komst van nieuwe generaties micro-wkk, met ingebouwde bijstookbrander, zal het langzamer opwarmen geen issue meer te zijn.

Tijdens het veldexperiment is duidelijk geworden dat de eindgebruiker behoefte heeft aan een goede en snelle helpdesk. Hierin is in het oorspronkelijke projectplan onvoldoende voorzien. De klachten van de eindgebruikers gingen via de installateur naar Gasunie en vervolgens naar ECN met als gevolg dat een aantal eindgebruikers ontevreden was over de geleverde ondersteuning. Aan het einde van de veldtest heeft een aantal eindgebruikers rechtstreeks contact met ECN opgenomen voor ondersteuning waardoor de problemen sneller opgelost zijn, wat tot een grotere tevredenheid bij de eindgebruiker leidt.

### 3.6 Conclusies

Het VPP project heeft naast ervaringen over de implementatie van een veldtest en dan specifiek een veldtest bij eindgebruikers thuis, het nodige opgeleverd. Er is aangetoond dat het mogelijk is om via

een on-line (UMTS) verbinding, weliswaar met de nodige hick-ups, software agents bij eindgebruikers thuis een installatie te laten aansturen. Buiten het aansturen is ook aangetoond dat het mogelijk is via de gebruikte principes een (near) real-time meetinfrastructuur op te zetten.

Van de inhoudelijke doelstellingen kan gezegd worden dat naast de invloed die micro-wkk standaard heeft op de load curve van een (virtueel) onderstation, meer bereikt kan worden door gebruik van een intelligente regeling. De belastingduurkrommes van zowel de zomer als wintersituatie zijn een stuk vlakker en de maximale belasting op het onderstation kan flink teruggebracht worden. In de zomersituatie wordt de piekbelasting teruggebracht met ~ 45% (simulaties) en ~ 30% in de veldtest. In de wintersituatie blijkt er, ondanks de grotere warmtevraag voor ruimteverwarming een piekreductie te zijn van ~50%. De reden voor de minimale verbetering ten opzichte van de zomer blijkt te liggen in het beperkte aantal micro-wkk's dat uiteindelijk heeft meegedaan.

Gedurende de veldtest is gebleken dat UMTS (nog) niet het ideale medium is voor het opzetten van een virtuele centrale. Naast de kosten die UMTS met zich meebrengt, die de uiteindelijke business case flink zou beïnvloeden, is ook gebleken dat enkele aspecten nog verre van optimaal zijn. Naast de toch beperkte UMTS dekking in het noorden van het land (Friesland en Groningen) waren er ook de nodige problemen bij het gebruik van UMTS met .NET Framework 1.1. Na de nodige code aanpassingen is gebleken dat UMTS net voldeed om de invloed van een VPP te meten, maar dat de technologie op dit moment niet aan te bevelen is voor commerciële toepassing.

Essentieel voor het succesvol bedrijven van een VPP is dat de VPP operateur, via on-line communicatie en direct contact met de eindverbruiker, de oorzaak van een storing kan achterhalen en de juiste acties kan ondernemen. Zo niet, dreigt altijd het gevaar dat partijen klachten onjuist gaan interpreteren, de verkeerde acties worden ondernomen en de eindgebruiker nog veel langer met het probleem zal blijven zitten. Als dit echter wel goed geregeld wordt, zal het extern lokaliseren en oplossen van problemen juist een feature kunnen worden van de VPP. Zo is tijdens de veldtest bijvoorbeeld een probleem opgelost door na een klacht van eindverbruiker het historische gedrag van de installatie te analyseren, de fout te lokaliseren, een software aanpassing te maken en deze naar de veldtestlokatie te uploaden.

Helaas zijn er tijdens het winterseizoen van 2007 geen echte wintertemperaturen geweest. In de simulaties is te zien dat de vraag naar ruimteverwarming in de wintersituatie behoorlijk wat extra flexibiliteit geeft om op een business case te sturen. Hoewel de simulatieresultaten bemoedigend zijn en een deel van de effecten ook teruggezien wordt in het veld had het werkelijk meten van de resultaten natuurlijk de voorkeur gehad.

## 4. Bijdrage aan de EOS: Demonstratie doelstellingen

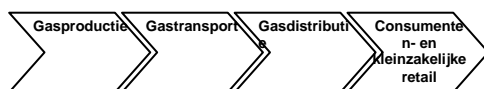
### 4.1 Besparing van primaire energie (PJ) en/of de besparing van CO<sub>2</sub> emissie(equivalent) op projectniveau

De primaire energiebesparing komt voort uit het feit dat decentrale opwekking energie-efficiënter is dan de bestaande conventionele opwekking door elektriciteitscentrale. Echter decentrale opwekking zal alleen maatschappelijk op grote schaal kunnen worden geaccepteerd indien sprake is van gecontroleerde elektriciteitsproductie door een virtuele centrale. Het creëren van een virtuele centrale schept daarom de randvoorwaarden om de volledige potentie van energiebesparing door decentrale opwekking te kunnen bereiken. Onderstaand wordt dit nader toegelicht.

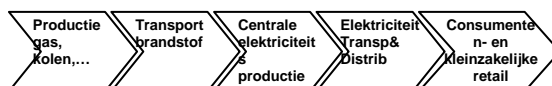
#### *Hogere energie-efficiëntere opwekking door middel van micro-wkk*

Zoals reeds aangegeven, is decentrale opwekking door middel van micro-wkk's ten opzichte van de huidige conventionele opwekking door elektriciteitscentrales energie-efficiënter. Door decentrale opwekking van energie wordt de huidige energieketen namelijk drastisch gewijzigd. De huidige centrale elektriciteitsproductie wordt vervangen door decentrale elektriciteitsproductie op basis van micro-wkk. In onderstaande figuur wordt de schematische voorstelling van de conventionele energiestructuur weergegeven.

#### Keten: aardgas



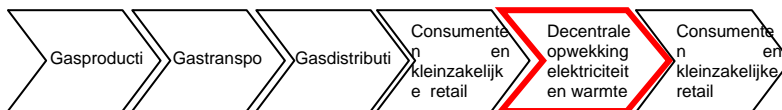
#### Keten: elektriciteit



Figuur 7: Oude structuur: gescheiden ketens voor elektriciteit en gas

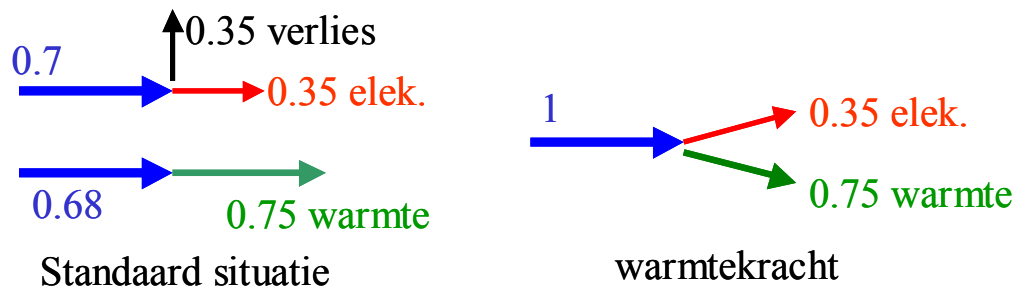
De oude structuur is gebaseerd op twee gescheiden ketens die bij de huishoudens (en klein zakelijke markt) samenkomen. In de nieuwe structuur worden beide ketens als het ware geïntegreerd. In onderstaande figuur wordt dit schematisch weergegeven.

#### ***Nieuwe structuur***



Figuur 8: Nieuwe structuur: één geïntegreerde keten voor elektriciteit en gas

Energieopwekking (elektriciteit en warmte) met behulp van micro-wkk verloopt met een hoger rendement dan conventionele opstellingen waardoor energie wordt bespaard en dus CO<sub>2</sub> uitstoot wordt verminderd.



Figuur 9: Ongeveer 35% primaire energiebesparing door toepassing microwarmtekracht (rendementen op basis van de onderwaarde van aardgas conventie, dus inclusief terugwinning van condenswarmte van de waterdamp in de rookgassen is een totaalrendement van 110% mogelijk)

De reductie van de CO<sub>2</sub> uitstoot wordt bovendien versterkt door het gebruik van het CO<sub>2</sub> schonere aardgas in een micro-wkk in plaats van de brandstofmix (aardgas en kolen) die in het Nederlandse conventionele elektriciteitscentralepark wordt gebruikt. Gegeven de huidige brandstofmix voor centrale opwekking kan micro-wkk 20 - 60% aan CO<sub>2</sub> uitstoot besparen, afhankelijk van de gebruikte techniek. Voor een micro-wkk met 15% elektrisch rendement (nieuwe generatie Stirling motor) levert dit voor de gemiddelde woning met 5 ton CO<sub>2</sub> uitstoot een besparing van 1 ton CO<sub>2</sub> uitstoot op. Met brandstofcellen is op termijn zelfs een besparing van ~2 ton CO<sub>2</sub> uitstoot per woning mogelijk ten opzichte van een gemiddelde centralepark. Het volledige potentieel van micro-wkk wordt geschat op tussen de 2 en 5 Mton/jaar in 2030 (zie: *Werkgroep decentraal 2006*).

Door de micro-wkk's te voorzien van intelligentie en communicatie mogelijkheden - dus te integreren in een virtuele centrale - worden de technische en economische randvoorwaarden veel duidelijker en naar verwachting ook veel gunstiger. Door de decentrale elektriciteitproductie te monitoren en flexibel te maken kan actief handel worden bedreven met andere partijen en kan de waarde van de terug geleverde elektriciteit worden geoptimaliseerd.

Door de netbeheerders inzicht te geven in de lokale netkwaliteit, de invloed van de micro-wkk hierop én mogelijkheden te geven voor actieve sturing, verandert de micro-wkk van een mogelijke bedreiging in een partner, die actief mee gaat werken aan de stabilisering van de energie-infrastructuur. Hiermee wordt ook de deur geopend voor grootschaligere penetratie van PV cellen en windmolens. Deze optimale randvoorwaarden zullen ertoe leiden dat het decentrale opwekkingspotentieel uiteindelijk volledig kan worden benut. Alleen al het extra micro-wkk gedeelte (~3 miljoen huizen) kan uiteindelijk leiden tot een extra besparing van 3 tot 7 miljoen ton CO<sub>2</sub> per jaar (50-120 PJ/jaar).

#### *Virtuele centrale randvoorwaarde voor duurzame decentrale opwekking*

Het concept van de virtual power plant is niet alleen toepasbaar op micro-wkk's. Hoewel dit demonstratieproject wel gericht is op de centrale aansturing van micro-wkk's, kan dit concept worden ingezet voor sturing van alle vormen van decentrale energieopwekking - en zelfs energieconsumptie, voor zover deze stuurbaar is. Hernieuwbare energiebronnen zoals biogassen maar ook waterstof, zijn bij uitstek energiebronnen die decentraal zullen worden ingezet. Het decentraal verwerken van deze biogassen tot energie in de vorm van elektriciteit en warmte maakt het toepassen van hernieuwbare energiebronnen eenvoudig. Het virtual power plant concept is bij uitstek geschikt om deze decentrale duurzame opwekeenheden actief in een netwerkstructuur te laten functioneren

De netwerkstructuur van een virtuele centrale is niet alleen toepasbaar voor autonome decentrale eenheden die functioneren op basis van fossiele brandstoffen. In principe kan elke wijze van decentrale opwekking van energie zoals zonnecellen, windmolens, installaties op biogas en in de toekomst opwekinstallaties op basis van waterstof door dit besturingssysteem worden aangestuurd. Met recht kan worden gezegd dat de virtual power plant een belangrijke randvoorwaarde is om decentrale duurzame energieopwekking efficiënt te kunnen laten plaatsvinden.

### *Energiebesparing binnen het project*

Op basis van de in dit project ingezette micro-wkk's, de WhisperGen Mk4 Stirling, is een primaire energiebesparing per woning van ongeveer 10% en een CO<sub>2</sub> besparing van 13% mogelijk per jaar. De volgende generatie micro-wkk die in 2008/2009 op de markt komt kunnen reeds >18% energiebesparing realiseren. Brandstofcellen op aardgas kunnen in de toekomst naar verwachting >30 % energie en >40% CO<sub>2</sub> uitstoort per woning besparen. In onderstaande tabel wordt de energiebesparing die met dit project worden bereikt, samengevat:

Situatie nu (dit project)	Primair energieverbruik (TJ)	CO <sub>2</sub> uitstoot (ton)
15 referentiewoningen (1800 m <sup>3</sup> gas en 3300 kWh elektriciteit)	1.26	75
15 intelligente WhisperGen	1.14 (-10%)	66

*Tabel 1: Energiebesparing in dit project*

#### 4.1.1 Het herhalingspotentieel en spin off

Zoals is toegelicht is het virtual power plant concept een voorwaarde om de maatschappelijke en marktacceptatie van de inzet van decentrale opwekeenheden te versnellen en te vergroten.

Met de intelligente micro-wkk (de micro-wkk die kan worden geïntegreerd in de virtual power plant) kan in eerste instantie op het hogere segment van de ketelmarkt (totaal 450.000 ketels/jaar) worden gefocust. Uiteindelijk doel is echter om uiteindelijk een dusdanig aantrekkelijk product te creëren dat vanaf 2010-2015 meer dan de helft van de verkochte verwarmingssystemen een micro-wkk zal zijn.

Tabel 2 schetst een scenario waarbij is uitgegaan van het feit dat dankzij het virtual power plant concept de marktvoorwaarden voor "intelligente micro-wkk's" twee maal zo gunstig zijn als voor conventionele micro-wkk's.

Scenario over 10 jaar	Besparing energieverbruik (PJ)	Primair Besparing CO <sub>2</sub> (kton)
400.000 conventionele micro-wkk's (referentiesituatie)	6.5	470
800.000 intelligente micro-wkk's (virtuele centrale technologie)	13	940
<b>Besparing</b>	<b>6.5</b>	<b>470</b>

*Tabel 2: Energiebesparing over tien jaar in het scenario waarin virtuele centrale technologie de marktcondities voor micro-wkk (inclusief brandstofcellen) twee maal zo gunstig heeft zo heeft gemaakt.*

Het doel van dit project is dan ook om de barrières voor grootschalige introductie van micro-wkk in een vroeg stadium weg te gaan nemen, om zo het volle potentieel van micro-wkk in de toekomst te kunnen benutten.

In bovenstaande berekening wordt het herhalingspotentieel weergegeven ten aanzien van de integratie van micro-wkk's. Het virtuele centrale concept geldt echter voor alle vormen van decentrale opwekking (zonnecellen, windmolens, mini en micro-wkk's) in de range van kW tot MW per unit. Binnen de energiewereld zijn de mogelijkheden voor spin-off dan ook groot. Mogelijkheden voor spin-off buiten de energiewereld zijn lastig in te schatten. Clusteren van zelfstandige units tot een totaal systeem is al zeer gangbaar voor computers (Internet en LAN) en voor diverse andere

toepassingen zoals bijvoorbeeld radiotelescopen (LOFAR). De toepassing is dan ook vooral revolutionair voor de energiewereld.

Voor virtuele centrales zijn geen geografische barrières aan te wijzen. Decentraal geïntegreerde energienetwerken, kunnen wereldwijd hun toepassing vinden binnen de energiesector. Hierbij kan zowel worden gedacht aan het stabiliseren van bestaande energiestructuren in Zuid-Europese landen, maar ook juist aan het opstarten van nieuwe energiestructuren in de minder ontwikkelde landen.

Vooraf in deze opkomende landen ligt een groot potentieel. In landen zoals China en India die momenteel een sterke economische groei doormaken, ontstaat het risico dat een centraal ingerichte energiestructuur deze groei niet kan volgen waardoor de leveringszekerheid onvoldoende gegarandeerd kan gaan worden. Een optimaal ingericht decentraal energienetwerk zou een uitkomst kunnen bieden om de leveringszekerheid te garanderen en te voldoen aan de sterk groeiende vraag naar energie. Het herhalingspotentieel van het project kan daarom als groot worden beschouwd.

## 4.2 De bijdrage aan een duurzame energiehuishouding: economische ontwikkelingen

De technologie voor de aansturing van de virtual power plant zoals in dit project wordt gedemonstreerd, betreft een eerste demonstratie van deze technologie. Hierdoor zijn de investeringskosten naar verhouding hoog.

In de toekomst zal de virtuele centrale functionaliteit in de micro-wkk controller of het woning energiemanagement systeem ingebouwd moeten worden en de communicatie via de bestaande infrastructuur in de woning. Een eerste aanzet tot embedding van de in dit project gebruikte PowerMatcher technologie wordt op dit moment gegeven in een ander project bij ECN. Ook is de verwachting dat zgn. smart meters in de toekomst de huidige meters zullen gaan vervangen en ook niet op de investeringskosten zullen gaan drukken.

Bij massafabricage kunnen de hardware benodigdheden voor de virtuele centrale binnen een prijsplaatje van 100 - 200 euro per node worden gehouden. De enige kostenfactor die over blijft, betreft de operationele kosten van de operateur van de virtuele centrale. De insteek is om deze taak onder te brengen bij partijen die zelf het meeste baat hebben bij het optimaal functioneren van intelligente micro-wkk's. Afhankelijk van de gebruikte business case zullen dit de netbeheerders, de energieretailers of de eindverbruikers zelf zijn.

Indien voor de virtuele centrale micro-wkk's met hoog rendement worden ingezet wordt jaarlijks door een huishouden 1000 á 2000 kWh elektriciteit geëxporteerd. De huidige waarde van deze elektriciteit is ongeveer 0.10 euro/kWh (schatting). Indien deze elektriciteit door de virtuele centrale als lokale balansstroom wordt ingezet, of aan de buurman wordt verkocht, zal de waarde naar schatting ongeveer met 0.05 tot 0,1 euro/kWh kunnen toenemen. De inkomsten vanuit het opereren van een virtuele centrale zal daarmee per huishouden tussen de 50 en 100 euro/jaar komen te liggen. Hiermee zal op termijn de terugverdientijd van de investering in een "intelligente micro-wkk" die is gekoppeld aan een virtuele centrale acceptabel kunnen zijn.

In het huidige project zijn de investeringskosten nog relatief hoog en staat er geen vergoeding in de vorm van hogere terugleveringvergoeding tegenover. Bovendien wordt de op dit moment beschikbare micro-wkk, de WhisperGen, met een nog te beperkt elektrisch rendement gebruikt.

### 4.3 De bijdrage aan de innovatie ten opzichte van de huidige stand van de techniek in Nederland

Ten aanzien van de virtual power plant die in dit project centraal staat, kan worden aangegeven dat de innovatie ligt in:

- **De real-life omgeving waarin het project wordt uitgevoerd.** De virtual power plant maakt geen gebruik van decentrale opwekkers in een laboratorium omgeving, maar heeft plaatsgevonden in een real-life situatie van micro-wkk installaties die primair gebruikt worden om woningen (incl. tapwater) te verwarmen. Hierdoor is essentiële kennis opgedaan van gebruikerservaringen met het opereren in een virtuele centrale setting. In het project is belangrijke know-how opgedaan m.b.t. de in Nederland aanwezige kennis van micro-wkk enerzijds en operatie van virtuele centrales anderzijds. Dit is voor een groot deel toepassingskennis die niet via simulatie- of laboratoriumstudies verkregen kan worden.
- **De regeleigenschappen van de virtual power plant.** De virtual power plant is primair gebruikt ten behoeve van het balanceren van het regionale elektriciteitsnet en het reduceren van de piekvraag. Innovatie op dit terrein is belangrijk omdat wordt verwacht dat grootschalige introductie van decentraal vermogen negatieve gevolgen zal hebben voor de stabiliteit van distributienetwerken. De eerdere Nederlandse veldtest met een virtuele elektriciteitscentrale richt zich op toepassing t.b.v. elektriciteitshandel (onbalansreductie in een handelsportfolio).
- **De standaard ICT-componenten waaruit het systeem is opgebouwd, hetgeen de toepasbaarheid, miniaturisatie en uitrol vereenvoudigd.** De virtuele elektriciteitscentrale die ECN binnen dit project aan Gasunie heeft opgeleverd, bestaat uit state-of-the-art hardware ICT-componenten. Op de micro-wkk locaties bestaat het systeem uit een standaard embedded controller en een GPRS/UMTS datacommunicatie module. Buiten de systeemgrenzen van de virtuele centrale is daar een meetinfrastructuur aan toegevoegd, voor de analyse van de VPP-operatie. De controller communiceert via een standaard MOD-bus protocol met de micro-wkk en via GPRS/UMTS met de centrale VPP-server. De centrale server is een standaard Windows-XP server. Het gebruik van standaard ICT-componenten maakt een verdere miniaturisering en kostprijsreductie, die nodig is bij een marktintroductie, op grotere schaal, haalbaar.
- **PowerMatcher concept voor vraag- en aanbodsturing.** De kern-software die het gedistribueerde systeem van standaard componenten tot een virtuele elektriciteitscentrale maakt is de door ECN ontwikkelde PowerMatcher software, die onderstaand wordt beschreven.

De PowerMatcher ([www.powermatcher.net](http://www.powermatcher.net)) is een recent ontwikkeld regelconcept voor het geclusterd aansturen van decentrale opwekkers en stuurbare elektriciteitsvragers (demand response). Het regelconcept en de eerste versie van de PowerMatcher software is ontwikkeld in het door de EU gefinancierde R&D project CRISP. In dit project is de toepassing van geavanceerde ICT technieken (met name multi-agent technologie) onderzocht voor coördinatie van vraag en aanbod in elektriciteitsnetwerken met een groot aandeel decentraal opwekvermogen.

Als regelconcept heeft de PowerMatcher verschillende toepassingen in energiemangement van decentraal vermogen en vraag respons, waarbij iedere afzonderlijke toepassing zijn eigen business case heeft. Simulaties hebben aangetoond dat door toepassing van de PowerMatcher het maximale aandeel decentraal vermogen dat probleemloos in een distributienet kan worden geaccommodeerd wordt verhoogd.

De eerste veldtest waarin een Proof of Concept is gegeven, is in 2006 afgerond in het al eerder genoemde CRISP-project (<http://crisp.ecn.nl>), waarin installaties uit de handelsportfolio van Eneco zijn ingezet voor het wegregelen van onbalans van windparken. De in dit project beschreven toepassing voor een op micro-wkk gebaseerde virtuele elektriciteitscentrale is voor ECN de eerste maal dat zij het regelconcept aan een marktpartij heeft geleverd.



Het regelconcept en bijbehorende software van de PowerMatcher is gebaseerd op resultaten van fundamenteel onderzoek op het grensvlak tussen informatica en elektrische energietechniek. Recent ontwikkelde theoretische kennis uit het informatica domein op het gebied van Multi-agent Technologie, Elektronische Markten en Gedistribueerde Beslisprocessen wordt in het regelconcept toegepast [J.K. Kok, 2005; Ygge, 1996 & 1998; Carlsson, 2004]. De toepassing van Agent Technologie in de energiesector bevindt zich in de Proof of Principle fase van de marktintroductie en heeft een grote potentie als enabling technology van de transitie naar een duurzame energiehuishouding. De toepassing van de PowerMatcher voor de Gasunie VPP betekent een overgang naar de Proof of Concept fase.

De PowerMatcher heeft de volgende innovatieve eigenschappen:

- De PowerMatcher implementeert een gedistribueerd beslisproces, waaraan een groot aantal actoren kan deelnemen. Lokale softwareagenten focussen op de belangen van lokale deelsystemen en beïnvloeden het totale systeem door automatische onderhandelingen met andere softwareagenten. Terwijl de complexiteit van individuele componenten laag is, is het resulterende intelligentie niveau op globaal niveau hoog.
- Een virtuele elektriciteitscentrale is een typisch voorbeeld van een multi-actor systeem, waarbij zowel belangen op een globaal niveau als op het lokale niveau in ogenschouw genomen dienen te worden. Terwijl de aggregatie van lokale deelsystemen als één geheel gestuurd gaat worden, moeten de lokale opwekkers binnen de grenzen van het lokale proces bedreven worden. In geval van micro-wkk is dit lokale proces de handhaving van het binnencomfort en het bereiden van warm tap water. De macht om beslissingen te nemen over lokale zaken, moet blijven bij iedere lokale actor, terwijl het systeem als geheel aanstuurbaar moet blijven. De PowerMatcher maakt dit mogelijk door toepassing van de eerder genoemde innovatieve ICT technologieën.
- Door gebruik van multi-agent systemen wordt een open, flexibel en uitbreidbaar systeem verkregen. Communicatie tussen systeemcomponenten is geminimaliseerd tot een generieke en uniforme informatie-uitwisseling. Voor dit project betekent dit, dat op termijn iedere vorm van gedistribueerde opwekking of responsieve elektriciteitsvraag kan worden toegevoegd aan de virtuele elektriciteitscentrale.
- De PowerMatcher maakt gebruik van elektronische markten, waardoor coördinatie op economische gronden mogelijk wordt. Hierdoor is het mogelijk dat de virtuele elektriciteitscentrale de grenzen van eigendom overschrijdt. De PowerMatcher ondersteunt hiermee de eerdergenoemde innovaties in de waardeketen van opwekking en gebruik van energie. Verder levert dit type coördinatiemechanismen oplossingen die z.g. Pareto optimaal zijn, d.w.z. dat het systeem op globaal niveau optimaliseert, terwijl op lokaal niveau de belangen van de individuele actoren optimaal tegen elkaar worden afgewogen.
- **De spin-off mogelijkheden voor innovatie in de waardeketen.** De marktintroductie van virtuele centrales zal een innovatie betekenen op het gebied van business cases in decentrale opwekking, elektriciteitshandel en netbeheer. De demonstratie van de technische haalbaarheid van een virtuele centrale op basis van micro-wkk, zal een belangrijke impuls geven aan de ontwikkeling van nieuwe business cases in waardeketens die geheel nieuw voor de markt zullen zijn. Eindgebruikers, energie-retailers, netwerkbedrijven, ICT-dienstverleners zullen allen een geheel nieuwe rol krijgen in deze waardeketens [Gordijn, 2005].

## 5. Conclusie en aanbevelingen

De belangrijkste conclusie die getrokken kan worden op basis van de veldtest is: het is mogelijk micro-wkk's bij consumenten thuis met behoud van comfort in te zetten voor de ontlasting van een onderstation en er is voldoende regelruimte om de belasting significant te verlagen.

In dit project is voor het eerst ervaring op gedaan met echte woningen en eindverbruikers als onderdeel van de virtuele elektriciteitscentrale. De ervaring vanuit eerdere micro-wkk projecten is dat “zelf elektriciteit opwekken” aanslaat bij het publiek. Een uitdaging bij virtuele centrale concepten is het gevoel van minder controle over de het comfort in eigen huis. Dit punt is ondervangen door te benadrukken dat de micro-wkk *onderhandelt* met de VPP server en daarbij rekening houdt met de wensen van de eindverbruiker. Bovendien blijft de eindgebruiker communiceren via de bekende thermostaat, en wordt alleen een alternatieve regeling geïntroduceerd. De bonus is het tapwatercomfort van geen extra grote warmteopslag (“CW5”), een helpdesk voor het oplossen van klachten en storingen, en inzicht in eigen elektriciteitsverbruik en (anonieme) vergelijking met andere deelnemers (“bench-marking”). Dit is een belangrijke aanwijzing dat door middel van virtuele centrale ook grip te krijgen is op het “good housekeeping” energiebesparingpotentieel en grotere bewustwording van eindverbruikers van hun gedrag. In vervolgproujecten zal extra aandacht aan dit specifieke aspect worden besteed.

Opslag en verhoging elektrisch opwekrendement blijkt het sleutelwoord voor verdere flexibilisering van een virtuele elektriciteitscentrale. Hierbij kan niet alleen gedacht worden aan thermische opslag, maar ook elektrische opslag lijkt de kansen op verdere flexibilisering te vergroten. Met de introductie van Free-Piston Stirling met ~18% elektrisch rendement zal aanmerkelijk meer flexibiliteit mogelijk worden.

De PowerMatcher heeft echter de mogelijkheid op meerdere business cases tegelijk te sturen. Hierbij is het denkbaar dat agenten gaan sturen op de business cases '*optimaal gebruik eigen productie*', '*opvangen onbalans op het landelijk elektriciteit transport netwerk*', '*optimalisatie portfolio retailer*', en '*reduceren piekbelasting gasnetwerk*'. Deze combinatie van business cases voor eindverbruiker, TenneT, energie retailers en Gasunie leveren een extra meerwaarde voor uiteenlopende partijen. Door de verdere integratie van opkomende technologieën als elektrische opslag, slimme meters, nieuwe generatie zonne-PV, compacte warmteopslag, Free-PistonStirling en brandstofcel micro-wkk systemen is het waarschijnlijk dat de VPP business case nog verder zal worden versterkt.

Een virtuele centrale of Smart Power System schept de randvoorwaarden om de volledige potentie van energiebesparing door decentrale opwekking op de meest efficiënte wijze te kunnen benutten. Het besparingspotentieel van alleen micro-wkk ligt tussen de 2 en de 5 Mton CO<sub>2</sub> /jaar in 2030.

De verwachting is dat woningen met micro-wkk systemen, eventueel aangevuld met andere vormen van decentrale opwekking, tussen de 1000 en 2000 kWh gaan exporteren op jaarbasis. Indien deze elektriciteit op de juiste tijdstippen wordt opgewekt zal de waarde van deze elektriciteit in de orde van 100 euro/jaar kunnen toenemen. Door gebruik te maken van in massa geproduceerde hardware en additionele toegevoegde waarde van de gebruikte comfortinstallatie (een tapwatervat is tenslotte ook comfortverhoging) kunnen de investeringskosten en operationele kosten voor een virtuele centrale redelijk laag worden gehouden. De verwachting is dat een business cases zeker haalbaar moet zijn.

## 6. Publicaties

### *Presentaties/papers op conferenties*

- [1]. M.P.F. Hommelberg, G.J. Schaeffer, " Integrating  $\square$ CHP into a distributed energy system with the PowerMatcher ", MicroCHEAP Workshop, April 2006, Petten.
- [2]. G.J. Schaeffer, M.P.F. Hommelberg, "Windmolens en warmtepompen", ECN Colloquium, april 2006, Petten.
- [3]. G.J. Schaeffer, C.J. Warmer, I.G. Kamphuis, M.P.F. Hommelberg and J.K. Kok, Field tests applying multi-agent technology for distributed control: virtual power plants and wind energy", CRIS Workshop, December 2006, Magdeburg.
- [4]. M.P.F. Hommelberg, C.J. Warmer, I.G. Kamphuis, J.K. Kok, G.J. Schaeffer, "Distributed Control Concepts using Multi-Agent technology and Automatic Markets: An indispensable feature of smart power grids", Power Engineering Society 2007 General Meeting, June 2007, Tampa.
- [5]. Voordracht voor de Smart Power System Werkgroep ICT/Infra, 2006.
- [6]. M.P.F. Hommelberg, presentatie tijdens CRISP Workshop, ECN Amsterdam, november 2006
- [7]. M.P.F. Hommelberg, Voordracht tijdens gezamenlijke meeting met ENOS-T, Gasunie, januari 2007, Groningen.
- [8]. M.P.F. Hommelberg, Presentatie TU/e energiebutler, 2007
- [9]. J.W. Turkstra, "The Gasunie smart distributed power systems program", 23rd World Gas Conference, juni 2006, Amsterdam.

Dit rapport zal on-line beschikbaar worden gesteld via de websites van ECN ([www.ecn.nl](http://www.ecn.nl)), SenterNovem ([www.senternovem.nl](http://www.senternovem.nl)), Gasunie Engineering & Technology ([www.getgasunie.nl](http://www.getgasunie.nl)), Energy Valley ([www.energyvalley.nl](http://www.energyvalley.nl))

## 7. Referenties

- *P. Carlsson, "Algorithms for Electronic Power Markets", Ph.D. Thesis, Uppsala University, Sweden, 2004.*
- *J. Gordijn and J.M. Akkermans, "Business Models for Distributed Energy Resources in a Liberalized Market Environment", Electrical Power Systems Research Journal, accepted for publication in 2005.*
- *J.K. Kok, C.J. Warmer and I.G. Kamphuis, "PowerMatcher: Multiagent Control in the Electricity Infrastructure", Proceedings of Autonomous Agents & Multi-Agent Systems, 2005.*
- *Fredrik Ygge and Hans Akkermans, "Power Load Management as a Computational Market", Proceedings of ICMAS, 1996.*
- *F. Ygge, "Market-Oriented Programming and its Application to Power Load Management", Ph.D. Thesis, ISBN 91-628-3055-4, Lund University, 1998.*
- *Werkgroep decentraal 2006, Technisch energie- en CO2-besparingspotentieel van micro-wkk in Nederland (2010-2030),*  
(<http://www.senternovem.nl/energietransitieng/Werkgroepen/decentraal/index.asp>)

## Contact

Maarten Hommelberg, ECN: [hommelberg@ecn.nl](mailto:hommelberg@ecn.nl)

Jan Willem Turkstra, Gasunie Engineering & Technology: [j.w.turkstra@gasunie.nl](mailto:j.w.turkstra@gasunie.nl)