

## Slim bedrijf van elektriciteitsnetten met ICT

**Citation for published version (APA):**

Kamphuis, I. G. (2013). *Slim bedrijf van elektriciteitsnetten met ICT*. Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/2013

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

Intreerede  
prof.dr. René Kamphuis  
8 maart 2013

/ Faculteit Electrical Engineering

**TU** **e** Technische Universiteit  
Eindhoven  
University of Technology

# Slim bedrijf van elektriciteitsnetten met ICT

Where innovation starts

**Intreerede prof.dr. René Kamphuis**

---

# **Slim bedrijf van elektriciteitsnetten met ICT**

**Uitgesproken op 8 maart 2013  
aan de Technische Universiteit Eindhoven**



# Inleiding

Geachte leden van het College van Bestuur, mijnheer de Rector Magnificus, geachte collega's, familie en vrienden, dames en heren.

In de hedendaagse maatschappij speelt informatie- en communicatietechnologie een steeds belangrijker rol. ICT heeft een grote invloed op onze manier van leven, zowel thuis als op het werk. Innovatie in de ICT-sector gaat snel. Er ontstaan, vaak op ad-hoc basis, zichzelf steeds vernieuwende en organiserende netwerken van informatieleveranciers en -gebruikers. Ook de energiesector en vooral de elektriciteitssector, zijn zich sinds het begin van deze eeuw rap aan het vernieuwen. Begin deze eeuw is de energiesector opnieuw gereguleerd. Deze liberalisering heeft geleid tot een ontvlechting van taken van de traditionele nutsbedrijven als handel, levering en distributie van elektriciteit. Nu staat de transitie naar een duurzame elektriciteitsvoorziening hoog op de maatschappelijke agenda. Mijn rede gaat over de manier waarop de innovaties in beide sectoren beter op elkaar kunnen aansluiten, elkaar kunnen versterken en inspireren.

De voordracht is opgebouwd uit een aantal onderdelen. In het eerste deel ga ik kort in op de noodzaak van een duurzame energievoorziening en de eisen, die deze aan de elektriciteitsvoorziening stelt. Vervolgens bespreek ik de dynamiek van het elektriciteitssysteem en de manier waarop het, op commerciële basis, via elektriciteitsmarkten en, fysiek, via transport- en distributiecomponenten wordt gestuurd. Ik zal het werkingsmechanisme van de elektriciteitsvoorziening als systeem toelichten aan de hand van een aantal voorbeelden en een aantal recent opgetreden probleempunten aanstippen. Deze probleempunten hebben te maken met het verder vergroten van het aandeel van duurzame vormen van energie-opwekking en de komst van nieuwe vragers van elektrisch vermogen. Beide ontwikkelingen hebben hun impact op de markt en op het bedrijf van het fysieke netwerk. Daarna zal ik de rol van informatie- en communicatietechnologie toelichten voor het vinden van een oplossing voor een deel van deze problemen. Een sleutelbegrip hierbij is aggregatie van vraag en aanbod van elektriciteit in 'virtuele' elektriciteitscentrales. Binnen virtuele elektriciteitscentrales is er onderlinge informatie-uitwisseling. Het blijkt mogelijk in de besturingsstrategieën van dergelijke virtuele centrales rollen en verdienmodellen van stakeholders te

modelleren en te implementeren. Ze kunnen, volledig geautomatiseerd, meehelpen aan het realiseren van regeldoelen in het elektriciteitssysteem. Naast een aantal tot nu toe bereikte resultaten met dit type centrales, zal ik een aantal knelpunten signaleren. Tenslotte bespreek ik een aantal onderzoeksrichtingen die deze knelpunten tegemoet te treden.

# De elektriciteitsvoorziening verandert

De duurzaamheid van de energievoorziening in de wereld en speciaal in Nederland, krijgt al geruime tijd aandacht. Er is een bezorgdheid over de korte en lange termijn. Op dit moment wordt gewerkt aan de nieuwste update van het rapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) over de invloed van de mens op de klimaatverandering op aarde. In 2010 heeft het IPCC een viertal scenario's doorgerekend. Er is een opdeling gemaakt naar globalisatie- en regionalisatievarianten. Bij globalisatie is sprake van het verder intensifiëren van de onderlinge uitwisseling van producten en diensten tussen landen en van de versterking van de onderlinge afhankelijkheid. Bij de regionalisatie is sprake van optimalisatie met beperkte onderlinge afhankelijkheden. Bij iedere variant wordt in het beleid een economische focus en een milieufocus onderscheiden. Afhankelijk van de variant kan de gemiddelde temperatuur op aarde in 2100 in de orde van 1,5 tot 6,4 graden Celsius oplopen als gevolg van de toename van kooldioxide in de atmosfeer door menselijke activiteit.

Na het ongeluk in Fukushima is ook de uitfasering van nucleaire elektriciteit in landen als Duitsland en andere landen in Europa een tweede reden om te kijken naar veiliger varianten van elektriciteitsopwekking. In Duitsland voltrekt zich na de Wende in 1989 nu een nieuwe Wende, de EnergieWende. Voortbouwend op de voortvarende manier waarop daar in het afgelopen decennium al in zon en wind is geïnvesteerd en een hele industrie is gecreëerd, wordt nu een volgende verduurzamingsstap gezet. In Nederland wordt ernaar gestreefd bij de exploratie van de gasvoorraden in 2030 nog slechts voor 50 % een beroep te doen op de leeg rakende Groningse gasvelden. De rest zal gewonnen moeten worden uit nieuwe of nu nog niet rendabel te exploiteren velden.

De Europese Unie heeft voor 2020 doelstellingen geformuleerd in de volgorde van de trias energetica:

1. Onnodig energiegebruik voorkomen door de energie efficiency te verhogen. Als men volgens deze aanpak te werk gaat, dan hoeft niet gebruikte energie niet opgewekt en verspreid te worden. U kunt hierbij denken aan het verbeteren van de isolatie van woningen en kantoorgebouwen en het reduceren van de verliezen van verwarmingssystemen. Efficiency-verbetering kan ook

bereikt worden door vervanging van de ene energievorm door een andere. We kunnen hierbij denken aan elektrisch vervoer en warmtepompen voor ruimteverwarming, waarbij respectievelijk benzine of diesel en gas worden vervangen door elektriciteit. Voor 2020 heeft de EU ten opzichte van 1991 een efficiencyverbetering van 20 % als doelstelling geformuleerd.

2. Bevorderen van het gebruik van duurzame bronnen. Voor elektriciteit betekent dit, als er al elektriciteit moet worden opgewekt, dit op een duurzame manier gebeurt. In veel landen wordt opwekking met duurzame bronnen gesubsidieerd aan de hand van de energieopbrengst, een subsidie per kWh. EU-Doel voor duurzame opwekking in 2020 is een aandeel van 20 %. Binnen de EU heeft Nederland 16 % als doelstelling. In de huidige marktcontext zijn duurzame bronnen nog niet rendabel. Vanuit de bredere, maatschappelijke klimaatcontext worden daarom allerlei vormen van subsidie beschikbaar gesteld. Deze zijn meestal gekoppeld aan een vast bedrag per kilowattuur.
3. De CO<sub>2</sub>-uitstoot van fossiele bronnen verminderen. Als er al energie opgewekt moet worden, en als dat niet duurzaam kan, is het doel toch in ieder geval fossiele brandstoffen op een schone manier toe te passen. Middel om de uitstoot te verminderen is een CO<sub>2</sub>-heffing op de elektriciteitsopwekking van elektriciteitscentrales en een handelssysteem voor emissierechten voor CO<sub>2</sub>.

Een hernieuwbare en duurzame energievoorziening is dus van essentieel belang. In Nederland en landen om ons heen worden daarom maatregelen genomen om te bevorderen, dat er steeds meer duurzame bronnen als zonnecellen en, op grote en kleine schaal, windmolens worden ingezet bij de elektriciteitsvoorziening. De EU-besparingsdoelstellingen verschillen per energiedrager. Voor elektriciteit is de besparingsdoelstelling het grootst.



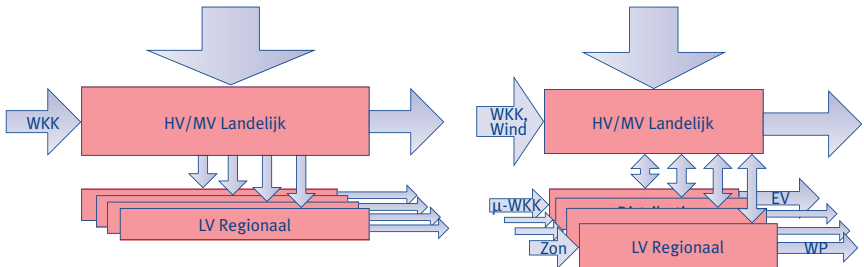
# Nieuwe energiestromen tussen vragers en aanbieders

Om de duurzaamheidsdoelstellingen te bereiken, wordt er in toenemende mate elektriciteit opgewekt via zon en wind en op het net aangesloten. Dat gebeurt voor een deel op de distributienetten met een laag of midden voltage, onder beheer van regionale distributiebedrijven als Liander, Enexis of Stedin. Voor een ander deel gebeurt dit op het hoogspanningsniveau dat is gekoppeld aan de transportnetten, die door TenneT worden bedreven. Beschouwd vanuit de trias energetica, heeft een duurzame energievoorziening niet alleen betrekking op de introductie van duurzame bronnen, maar leidt dit ook tot vervanging van gebruik van de ene energievorm door de andere. En wel in toenemende mate door 'schone' elektriciteit. Dit proces heet elektrificatie. Als de elektriciteit gebruikende processen flexibel in de tijd verschoven kunnen worden, bieden ze tevens de mogelijkheid het variabele aanbod van zon en wind te balanceren. Twee duurzame elektrificatiemechanismen verdienen hierbij speciale aandacht:

- Elektrisch vervoer. Door verbeteringen in de opslagefficiëntie en -capaciteit van elektriciteit in batterijen en accu's, wordt momenteel een grote efficiëntiestap gezet in de primaire energie-efficiëntie van de mobiliteitssector. De automobielenindustrie is op dit moment druk bezig nieuwe typen plug-in elektrische voertuigen te ontwikkelen. Het betreft hierbij niet alleen personenauto's, maar ook voor specifieke niches van de transportsector worden nu elektrische varianten ontwikkeld.
- Verwarming van woningen en gebouwen. Hier vindt een verschuiving van gas naar elektriciteit als energiebron plaats. De efficiëntiestap is dat goed geïsoleerde huizen in hun warmtevraag voorzien, door een warmtepomp warmte van de ene plaats naar de andere plaats te laten pompen. Alleen de elektrische energie voor het pompen en enig vermogen voor elektrische bijstook, voor als het echt koud is, is dan nog nodig.

Verwarmingssystemen, waarbij warmteproductie gekoppeld is aan elektriciteitsproductie, zogenaamde co-generatiesystemen, leveren tevens een bijdrage aan verbetering van de energetische efficiëntie. Warmte, geproduceerd door grote centrales, is dan geen ongebruikt afvalproduct, maar wordt nuttig aangewend. Dit type systemen wordt al geruime tijd voor verwarming van kassen toegepast.

Sinds kort komen ze ook in beeld voor gebouwverwarming via micro-turbines, brandstofcellen of microWKK gebaseerd op het Stirling-principe. De verhouding tussen geproduceerde warmte en elektriciteit loopt in deze categorie van 1 op 4 via 1 op 1 naar 8 op 1.



Figuur 1

Elektriciteitsstromen bij een gecentraliseerd en een gedistribueerd elektriciteitsnet

In figuur 1 zijn links de traditionele energiestromen getekend. De HV/MV-stromen representeren de transportnetten; de LV-stromen de distributienetten. Deze stromen gaan allemaal van boven naar beneden voordat afname plaatsvindt. Rechts in figuur 1 is een vergelijkbaar schema getekend, waarbij een duurzame context is meegenomen met meer verspreid opgestelde grote en kleinschalige opwekkers en een grotere vraag in de distributienetten door elektrificatie.

Bij de vergelijking van beide figuren vallen drie dingen op:

1. Het inkoppelen van variabel aanbod op transport- en distributieniveau. Off-shore windparken en wind op land zijn hiervan respectievelijk de voorbeelden. In Duitsland is het nu al zo, dat gedurende perioden van lage vraag en veel wind de totale benodigde elektriciteit via wind wordt opgewekt. In Nederland bestaan er plannen om 6 gigawatt piekvermogen aan offshore windparken neer te zetten in de Noordzee, ongeveer 40 % van de piekvraag in Nederland.
2. Het terug leveren van stroom door de distributienetten gedurende bepaalde periodes. Zoals tijdens de zomermaanden in nieuwbouwwijken waar bij veel woningen zonnecellen zijn geïnstalleerd.
3. Het optreden van meer gelijktijdige vraag per consument op het LV-regionale niveau ten gevolge van elektrificatie. Deze vraag op distributieniveau zal zich niet meer aan van te voren gemeenschappelijk vastgestelde profielen houden, maar per aansluiting en per wijk sterk kunnen variëren. Huishoudens met warmtepompen in energiezuinige wijken en in wijken met veel oplaadpunten

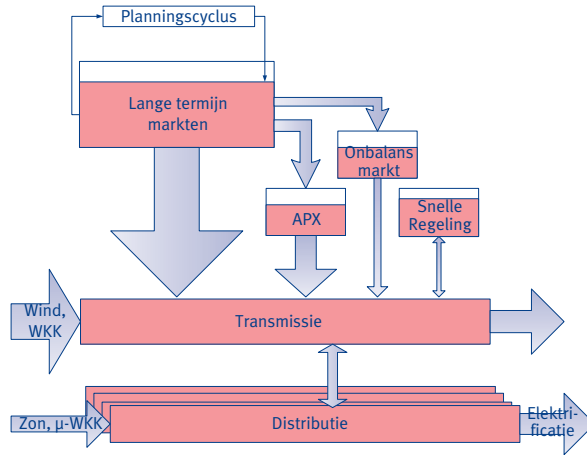
voor elektrische voertuigen, hebben dergelijke profielen met grote gelijktijdigheid. Dit heeft tot gevolg, dat schattingen van de echte tijdsafhankelijke waarden per klant moeten worden aangehouden en verrekend. De profielen waarmee het systeem rekening moet houden, zullen, in tegenstelling tot wat nu het geval is, afhangen van de locatie. Dit geldt niet alleen tijdens het operationeel bedrijf van het net, maar ook op planningsniveau van de distributienetten.

Afhankelijk van het type vraag of het aanbod, treden in bepaalde delen of regio's van het net de problemen eerder op dan in andere gebieden. Een voorbeeld van een 'hot-spot' is bijvoorbeeld een nieuwbouwwijk, waar door een projectontwikkelaar veel elektrische warmtepompen zijn geïnstalleerd. Een ander voorbeeld betreft een binnenstad met veel oplaadpunten voor elektrisch vervoer dicht bij elkaar. Ook aan de aanbodkant van elektriciteit kan er een clustering van veel gelijktijdige toevoer zijn; bijvoorbeeld in wijken met een grote hoeveelheid zonnepanelen.

# Markten sturen het balanceren van vraag en aanbod

Als er ergens een windmolen wordt neergezet, leest men vaak, dat de windmolen een paar duizend huishoudens van elektriciteit gaat voorzien. Op energiebasis (kWh), uitgesmeerd over de tijd, klopt dat wel, maar op basis van momentaan vermogen (kW) is dat een ander verhaal. De unieke uitdaging bij het bedrijf van het elektriciteitssysteem is juist, dat de vraag en het aanbod van elektriciteit op ieder moment in de tijd, in principe op alle netniveaus, aan elkaar gelijk moeten zijn. De betreffende windmolen gebruikt voor een deel van de tijd het net als een buffer. De elektriciteit verbruikende apparaten wachten in de meeste gevallen niet met consumeren totdat er aanbod van windenergie is. Bedrijf van het gehele elektriciteitssysteem is gebaseerd op evenwicht van vraag en aanbod op ieder moment in de tijd. Voor de liberalisatie van de energiesector in Nederland werd aan de hand van de verwachte vraag in Nederland voor de volgende dag een planning van de benodigde opwekcapaciteit van de centrales gemaakt. Via een optimalisatieberekening werd bepaald wat de beste brandstofmix voor het totale systeem was en welke centrale wanneer in bedrijf moest komen om aan de vraag te voldoen. Bij het bepalen van de optimale mix werd rekening gehouden met de kosten en met de milieueffecten. Investerings in centrales en netwerkinfrastructuur werden gedaan met grote zekerheidsmarges in capaciteit en aantallen.

In het kader van verbetering van kostenefficiency van het systeem en om verlaging van de stroomprijs voor de verschillende typen verbruikers te bewerkstelligen, werd in Nederland, in navolging van andere landen in Europa, marktwerking voor elektriciteit ingevoerd. Er is een marktontwerp gemaakt op basis van competitieve markten. Wat de elektriciteitsmarkt bijzonder maakt, is dat het marktprincipe bij elektriciteit in verschillende, in de tijd begrensde lagen, wordt toegepast. Het bedrijf van deze markten kan het best worden voorgesteld aan de hand van een aantal in elkaar overlopende waterbuffers, zoals we die in figuur 2 zien. Per voorraadvat is er een bepaald markttype, dat het beste past bij de dynamiek van de bijdrage aan het proces van balanceren: het op ieder moment in evenwicht houden van de vraag en het aanbod.



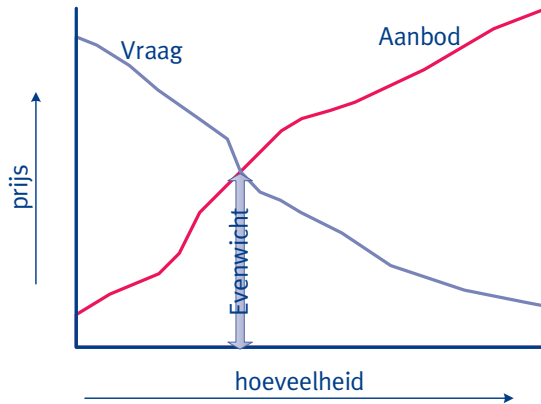
Figuur 2

Waterbufferanalogie van balancering van vraag en aanbod van elektriciteit

In de geliberaliseerde elektriciteitsmarkt is de verantwoordelijkheid voor het handhaven van evenwicht tussen vraag en aanbod gedelegeerd aan programmaverantwoordelijke partijen. In Nederland zijn er hier enige tientallen van. Ze kunnen gekoppeld zijn aan een grote leverancier, maar ook kunnen ze de vraag of het aanbod aggregeren voor een bepaald type opwekker of verbruiker. Voorbeelden van de laatste categorie zijn bijvoorbeeld coöperaties van windenergieproducenten of van tuinders, die installaties hebben aangeschaft, die productie van warmte om hun kassen te verwarmen, koppelen met het produceren van stroom. Om de klanten in hun portfolio te bedienen, koopt of verkoopt een programmaverantwoordelijke partij elektriciteit op een aantal verschillende markten. Een groot deel van de handel van elektriciteit speelt zich lang voor de uiteindelijke leveringsdatum af. De eerste stap hierin is, dat er tussen leveranciers en afnemers opties voor levering worden afgesloten. Bedoeling is zekerheden te scheppen om planning en investeringen in opwekcapaciteit mogelijk te maken en posities in te nemen op markten voor de brandstoffen voor de centrales. Deze opties leiden later tot bilaterale contracten tussen partijen. Deze contracten dekken reeds een aanzienlijk deel van de verwachte vraag af. De kilowattuur, die u uiteindelijk uit het stopcontact betreft, is vaak al meerdere keren verhandeld.

Een deel van de totale vraag in de portefeuille van een balansverantwoordelijke partij is niet op lange termijn te voorspellen. Ook is de uiteindelijke vraag afhankelijk van de weersomstandigheden en kan daarom pas kort voor de dag van levering precies bepaald worden. Om programmaverantwoordelijke partijen in

staat te stellen het laatste deel van de elektrische energie in hun portfolio te kopen of te verkopen, is er in Nederland een 'day-ahead'-markt opgezet, waar de nog ontbrekende delen in het leveringsprogramma voor de volgende dag kunnen worden opgevuld. Een voorbeeld van een dergelijke markt is de APX in Nederland. Op deze markt handelen meerdere aanbieders en vragers door biedingen in te dienen voor aanbod en vraag van elektriciteit op kwartierbasis.



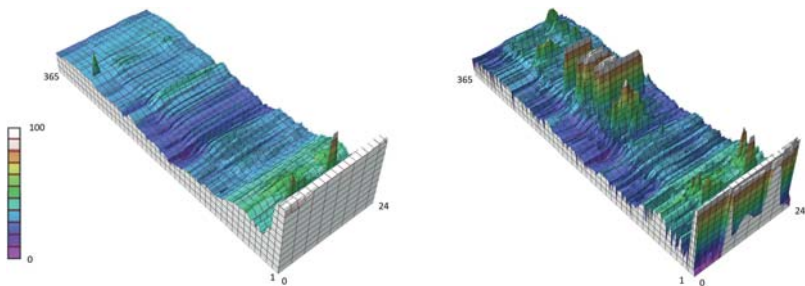
Figuur 3

Matching van vraag en aanbod

Het mechanisme van prijsbepaling op een dergelijke day-ahead-markt is weergegeven in figuur 3 en werkt met vraag- en aanbodcurves. Aan de vraagkant neemt de prijs af met de hoeveelheid; door een producent wordt juist meer aangeboden naarmate de prijs stijgt. Voor de APX-markt leveren de marktpartijen een vraag- of aanbodcurve voor ieder kwartier voor de volgende dag. Deze worden opgeteld en waar vraag en aanbod gelijk zijn, wordt de evenwichtsprijs vastgesteld. Tegen deze prijs verrekenen alle partijen hun vraag en aanbod.

# Marktprijsprofielen karakteriseren een elektriciteitssysteem

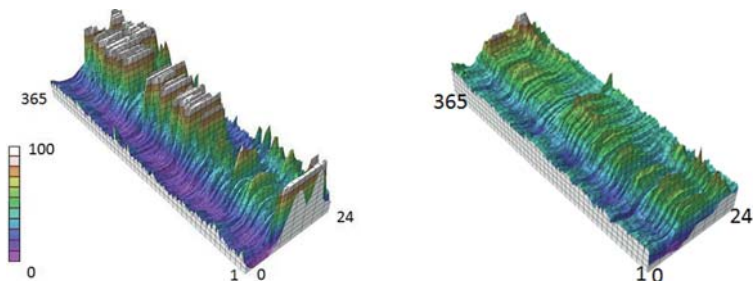
De prijs van elektriciteit op een kortetermijnmarkt, als de day-ahead-markt, als functie van het tijdstip op de dag en het dagnummer in een jaar, geeft een karakteristiek beeld van hoe de commerciële dynamiek van een elektriciteitssysteem eruitziet.



Figuur 4

Prijsverloop in het Noorse en Deense systeem in 2003

Figuur 4 links laat de prijsontwikkeling van het Scandinavische NordPool-systeem zien, dat in 2003 in de problemen kwam. De elektriciteitsproductie in het Scandinavische systeem is voornamelijk gebaseerd op waterkracht en kampt daardoor in droge jaren met tekort aan capaciteit. In de grafiek staat de prijsontwikkeling op uurbasis (0 tot 24) op de X-as; de Y-as geeft het dagnummer in het jaar aan en de Z-as de prijs in euro per megawattuur. De prijsspiek op de day-ahead-markt strekte zich uit over meerdere dagen in januari. Doordat de meren bevroren waren, konden de waterkrachtcentrales niet genoeg produceren. Hierdoor liepen de prijzen dusdanig op, dat een aantal elektriciteitsbedrijven hun verplichtingen niet meer na kon komen. Pas in de tweede helft van het voorjaar zien we dat de prijzen op de day-ahead-markt weer op hun oorspronkelijk niveau terugkomen. In het rechter gedeelte van figuur 4 zien we de prijsontwikkeling in het systeem van Dene-marken-West in dezelfde periode. Dit systeem grenst aan het Nordpool-systeem. De elektriciteitssystemen zijn fysiek met elkaar verbonden. U ziet dat een deel van prijsontwikkeling naar Denemarken werd doorgegeven.



Figuur 5

Verloop van de prijsontwikkeling op de APX in 2003 en 2010

Het 3D-berglandschap linksboven in figuur 5 geeft de APX-prijsontwikkeling, ook over 2003, in Nederland weer. In de witte delen, de besneeuwde toppen van het berglandschap, gaat de marktprijs de 100 euro per megawattuur ver te boven. De hoogste prijs in 2003 was zelfs 1800 euro/MWh, wat neerkomt op 1,80 euro per kWh. Terwijl de handelsprijs zich doorgaans rond de 5 eurocent beweegt.

Het jaar 2003 had een zeer warme en droge zomer. De centrales langs de rivieren konden slechts beperkt koelwater innemen. In Nederland werd, kort na de vakantie, code rood afgeroepen. We zien inderdaad dat de prijs in deze periode piekt. Een andere piek zien we aan het begin van de winter, eind november, wanneer de dagen kort zijn en waarin de kantoorverlichting en verwarmingstijd en de verlichtings- en verwarmingstijd van woningen elkaar overlappen. In de zomer kon in Nederland het elektriciteitssysteem overeind worden gehouden, doordat het voor grote stroomverbruikers als Hoogovens goedkoper was niet te produceren en de reeds gecontracteerde stroom op de markt te verkopen.

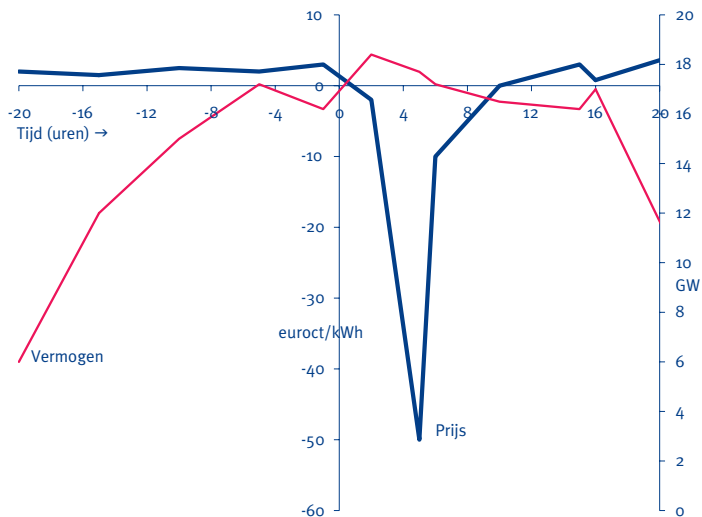
De grafiek van de prijsontwikkeling van de APX in 2010 (figuur 5 rechts) geeft aan, dat de prijsontwikkeling in Nederland in rustiger vaarwater is gekomen. Opvallend is wel de prijsstijging 's nachts en de prijsdaling overdag. Naast het beschikbaar komen van een aantal grote centrales in Nederland, in vergelijking met 2003, is dit het gevolg van het in bedrijf stellen van de NorNed-kabel, die het Nederlandse en Scandinavische elektriciteitssysteem met elkaar verbindt. Dit betekent, dat de relatief hoge prijs van stroom in Noorwegen door Nederlandse productiebedrijven wordt benut om de basislast in Nederland tegen een hogere prijs te verkopen. De hoge prijzen overdag in Nederland worden gladgestreken door aanvoer van Noorse waterkracht-elektriciteit.



# Duurzame bronnen veranderen de prijsontwikkeling

In Duitsland is voorrang voor de invoeding van wind bij wet geregeld en er geldt een subsidie per geleverde kilowattuur. In Noord-Duitsland, in de Duitse bocht, zijn en worden grote aantallen windmolens opgesteld. Gedurende sommige nachten in de herfst overstijgt het totale aanbod van 18 GW aan wind-elektriciteit de vraag.

Wat dat voor de prijsontwikkeling op de Duitse EEX day-ahead-markt op een dag in de herfst van 2009 betekende, is weergegeven in figuur 6. Zoals u ziet, waren er toen negatieve prijzen; in dit geval ging het om minus 50 eurocent per kWh. Op de day-ahead-markt hebben leveranciers moeten betalen om hun stroom kwijt te kunnen. Ook de leveranciers van windstroom ondervonden een nadeel. Ze moesten het betaalde bedrag van hun subsidie aftrekken.



Figuur 6

Prijsvorming op de Duitse day-ahead-markt op 4 oktober 2009 bij een overschot aan wind

Inzet van wind heeft nog een ander effect op de markt. Bedrijf van snelle gascentrales is vergeleken met kolen- of nucleaire centrales relatief duur. In een markt, waarbij geen windenergie wordt aangeboden, zijn de snelle gascentrales bepalend

voor de evenwichtsprijs. De gesommeerde aanbodcurve uit figuur 3 verschuift met 'gratis' wind erbij naar rechts: de evenwichtsprijs daalt. Kolencentrales zijn goedkoper te bedienen dan gascentrales. Daardoor nemen ze de rol als prijsbepaler over. Ze produceren echter meer CO<sub>2</sub> per kilowattuur dan gascentrales; dit effect wordt nog versterkt als ze hierbij op een gedeelte van hun maximale capaciteit moeten draaien.

Een soortgelijk effect zagen we in de ITM-studie, die we een aantal jaren geleden hebben uitgevoerd om de gevolgen van het laden van elektrische auto's voor het Nederlandse elektriciteitssysteem te inventariseren. Wat betreft de volume-effecten, de kilowatturen, zijn de gevolgen beperkt. De bestaande opwekkingscapaciteit in Nederland is voldoende als de oplaadprocessen in Nederland volledig gespreid over de dag zouden plaatsvinden. Echter, het benodigde aantal te leveren kilowatturen per uur levert de grootste bottleneck, omdat verwacht wordt, dat het laden een grote mate van gelijktijdigheid zal vertonen. Om de laadpieken op te vangen bij een 50 % penetratie van elektrisch vervoer zouden er in Nederland twee grote gascentrales bijgebouwd moeten worden. Er bestaat echter ook de mogelijkheid om met dit vervoermiddel overschotten aan windstroom weg te werken door 'slim' te laden. Bij nachtelijk windaanbod worden dan alle laadeenheden voor elektrisch vervoer aangezet. Betrekken we echter het marktmechanisme erbij, dan blijkt dat ook kolencentrales dan aantrekkelijker en efficiënter kunnen produceren en een lagere prijs op de markt aanbieden. De toegenomen vraag maakt het mogelijk meer stroom op vollast te produceren. Een onbedoeld gevolg van slim laden is dan eigenlijk, dat hierdoor kolencentrales meer produceren ten koste van gascentrales, die minder milieu-emissies hebben.

Inzet van duurzame bronnen kan dus, door de alleen op de markt gerichte selectie van producenten binnen het elektriciteitssysteem, onverwachte gevolgen hebben, waardoor een deel van de CO<sub>2</sub>-reductie weer teniet wordt gedaan.

Ook elektriciteit uit zonnecellen wordt gestimuleerd via subsidies. In Duitsland wordt het investeren in zonnecellen bevorderd door langjarige gegarandeerde vergoedingen voor invoeding van elektriciteit. Door de populariteit van de vergoeding en de spectaculaire verlaging van de prijs van zonnepanelen, heeft dit geleid tot een verhoging van de Duitse variant van de Regulerende Energie Belasting met 46 %. Gezien de huidige politieke discussie zal er een systeem komen met een vaste toeslag bovenop de marktprijs. Er is ook sprake van beperking van de mogelijkheid voor terug levering aan het net tot tweederde van de totale productie.

# De mogelijkheden van ICT bij elektriciteitsdistributie

Informatie- en communicatietechnologie worden al geruime tijd toegepast bij het optimaliseren van het bedrijf van de transport- en distributienetten van elektriciteit en bij het faciliteren van de handels- en afrekenprocessen. Geautomatiseerde toepassingen worden in de elektriciteitsinfrastructuur vooral gebruikt voor het top-down in de gaten houden en sturen van de hoog- en middenspanningsniveaus in het net en de handelsprocessen in de groothandelsenergiemarkt.

Binnen dit kader hebben distributiebedrijven de taak het optimaal uitnutten van de investering in componenten als kabels, transformatoren en schakellaars. Deze hebben een vervangingscyclus van meer dan 30 jaar. De kosten van de investeringen worden terugverdiend door vaste, capaciteit gebaseerde tarieven aan de klant te berekenen. De investeringen kennen echter een toenemende mate van onzekerheid. Bedrijventerreinen kunnen jarenlang leeg blijven, terwijl er wel voorzieningen zijn aangelegd. Woonwijken worden door een projectontwikkelaar voorzien van warmtepompen, die in bepaalde gevallen veel meer stroom verbruiken dan gepland. In de binnenstad van een grote stad worden laadpunten voor snel laden van elektrische auto's aangelegd, terwijl de penetratiegraad van elektrische voertuigen in de toekomst onzeker is. ICT kan ruimte creëren om de componenten tijdens hun levensduur beter te benutten, maar ook om de bruikbare levensduur van de bestaande infrastructuur te verlengen, totdat er meer duidelijk is over grote investeringen.

Door de grotere onderlinge uitwisseling op het laagspanningsniveau is meer inzicht in deze stromen van eminent belang. Sturing en monitoring van opwekkers en verbruikers zal zich ook op lagere netniveaus gaan afspelen. De complexiteit in de bedrijfsvoering neemt daardoor toe. Gebruik van ICT kan voor de lagere spanningsniveaus de benodigde monitoring en stuurinformatie aanleveren. Onderzoeksprojecten hebben al aangetoond dat het verkorten van de reparatietijden, in geval van uitval van delen van het net, mogelijk is. De fout kan sneller en preciezer gelokaliseerd worden. Ook het opstarten van een deel van het net met veel kleine opwekkers kan betrouwbaarder gebeuren. In sommige landen is het al mogelijk om in kritieke omstandigheden selectief belastingen uit te schakelen; zogenaamd

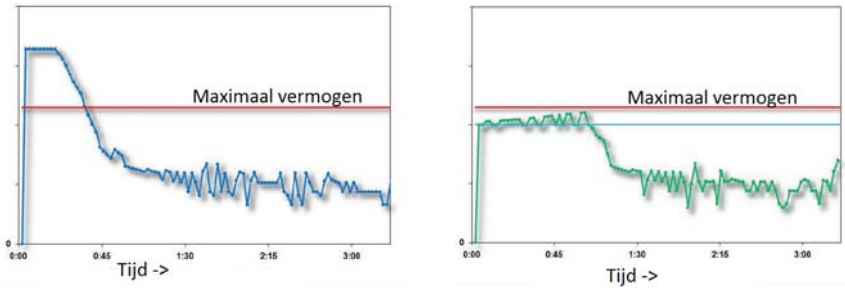
‘load-shedding’. Ten slotte kan continue toestandsbewaking (‘condition monitoring’) bijdragen aan voorspellend onderhoud. Alleen aan die componenten waarvoor het echt nodig is, worden onderhoudswerkzaamheden verricht.

# Elektrificatie vereist actievere distributienetten

De recente doorbraken op het gebied van opslag van elektrische energie in Li-ion accu's en de dalende prijzen ervan, maken het mogelijk om de elektrische efficiëncy van mobiliteits- en transporttoepassingen aanzienlijk te verbeteren. Iedere zichzelf respecterende autofabrikant heeft nu wel een volledig elektrische variant of een 'plug-in' hybride in de pijplijn. Naast de prijs van de accu, is momenteel de benodigde oplaadtijd een belangrijke bottleneck voor een verdere doorbraak. Een gangbare elektrische auto kan per uur slechts genoeg stroom laden om 20 km te rijden. Dit beperkt de toepassing tot slechts die niches, waarin een klein bereik geen probleem is. De nieuwste versie van de Amerikaanse Tesla is, wel tegen een aanzienlijk prijskaartje, door toepassing van de nieuwste ontwikkelingen op het gebied van laadtechnologie, het 'DC-laden' (laden met gelijkstroom), nu al in staat tot 550 km/uur op te laden. In de eerder aangehaalde ITM-studie kwam naar voren, dat in Nederland de distributienetten aanzienlijk verzaamd zouden moeten worden bij ongestuurd laden.

Door elektrificatie van de warmtevraag verschijnen ook warmtepompen in de distributienetten. De warmtepomp wordt in nieuwbouwprojecten op projectschaal toegepast. Het distributiebedrijf moet de capaciteit van zijn distributienet en de toevoerlijnen daarheen plannen, rekening houdend met dit nieuwe type gebruiker. Hierbij dient hij in zijn berekeningen met 'worst cases' rekening te houden. Voor warmtepompen is een 'worst case' als er weer elektriciteit is na een langere stroomonderbreking tijdens een koude periode, wanneer de temperatuur in alle woningen laag is en alle warmtepompen aangaan. Beide effecten leiden tot onverantwoord hoge maatschappelijke kosten, tenzij het stroomgebruik beter gespreid kan worden, door het slim coördineren van laadprofielen.

Tijdens het enige jaren geleden uitgevoerde project SmartProofs hebben we, als voorbeeld van toepassing van een virtuele energiecentrale voor een netbeheerder, het opstartgedrag van warmtepompen in een dergelijke 'cold spot'-situatie geoptimaliseerd door gebruik te maken van de PowerMatcher-software, dat vragen aanbodsturing combineert om een gemeenschappelijk doel van een aantal communicerende apparaten te bereiken.



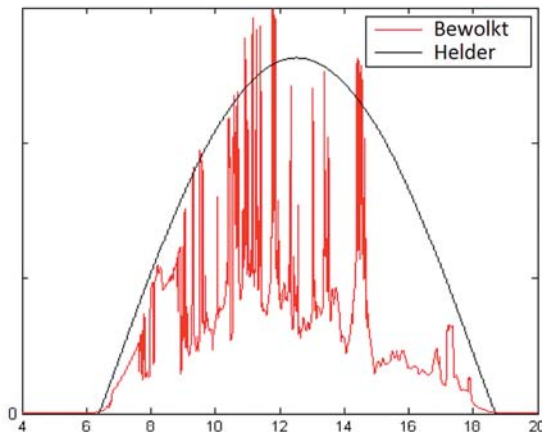
Figuur 7

Totale belasting van een cluster met warmtepompen na een stroomonderbreking bij  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  zonder en met coördinatie

In figuur 7 is de belasting van de trafo en het maximale vermogen weergegeven. Aan het begin zijn alle huizen afgekoeld. Vervolgens wordt de stroomonderbreking opgeheven. De thermostaten staan op  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  en alle warmtepompen treden tegelijkertijd weer in werking. In de linker grafiek ziet u de piekbelasting zonder dat warmtepompen op de hoogte zijn van het bestaan van elkaars inschakelgedrag. De grafiek rechts laat zien wat er gebeurt als het opstarten gecoördineerd wordt doordat de apparaten informatie met elkaar delen. De belasting van de transformator kan slim gestuurd worden, zonder het binnencomfort van de bewoners van de huizen sterk te reduceren.

# Kleinschalige opwekkers in distributienetten

Vanwege het in de tijd variabel vermogen, werd gedistribueerde opwekking, als bijdrage aan de energievoorziening door elektriciteitsbedrijven, tot voor kort bestempeld als ‘negatieve vraag’. Voor de netten is de snelle en vooral onverwachte variatie van stroomproductie door zonnecellen, vooral in landelijk regio’s, een probleem.



Figuur 8

Variatie in opbrengst van zonnepanelen door een wisselende bewolgingsgraad

Figuur 8 geeft een voorbeeld van de theoretische zoninstraling en de praktisch gemeten directe zoninstraling op een half bewolkte dag. Het geleverde vermogen van zonnecellen naar het net zal, als gevolg van de tijdelijke afdekking van de zon door wolken, aanzienlijk variëren. Wil men meer zonnecellen in het net, dan is stabilisatie door tijdelijke opslag nodig, door bijvoorbeeld het automatisch inschakelen van lokale verbruikers.

Toepassing van technieken voor schoon en efficiënt gebruik van fossiele brandstoffen voor verwarmingsdoeleinden levert ook een bijdrage aan gedistribueerde opwekking. Er zijn op dit moment een aantal veelbelovende technologieën in ontwikkeling, die productie van warmte combineren met productie van elektriciteit.

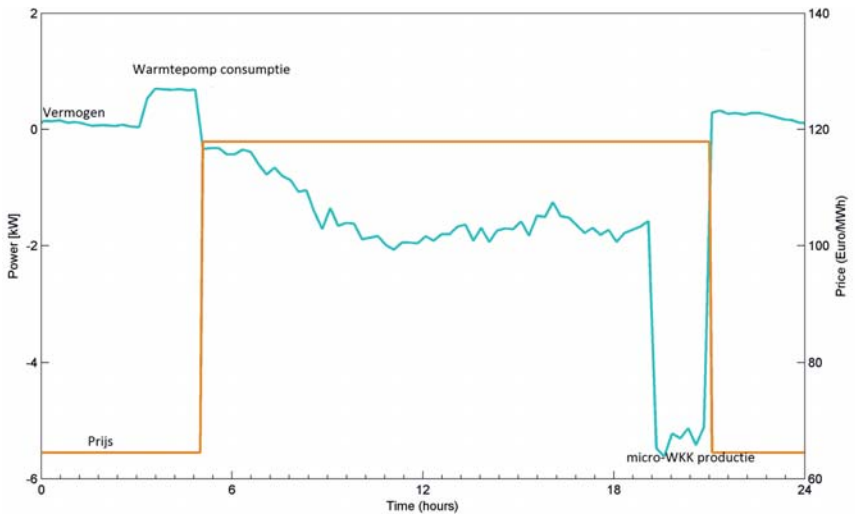
Het betreft hier HR/e-ketels, die op het Stirling-principe gebaseerd zijn, brandstofcel gebaseerde verwarmingssystemen en microturbines. Voordeel van de inzet van dit type systemen voor de netbeheerder is, dat ze constante elektrische vermogens afgeven en dat ze dat doen op tijdstippen, waarop de elektriciteitsvraag groot is. In Nederland vallen namelijk de pieken in de warmtevraag samen met pieken in de elektriciteitsvraag. Ook uit commerciële overwegingen zijn dit soort systemen aantrekkelijk, omdat op dergelijke piekmomenten ook de marktprijs van elektriciteit hoog is.



# Flexibiliteit en opslag faciliteren pro-actieve netten

We hebben gezien dat flexibiliteit, vanuit de toenemende dynamiek van het distributiesysteem en vanuit een commerciële invalshoek, waarde kan creëren. Binnen energiebedrijven geldt de 20-80 regel. Met 20 procent van het vermogen wordt 80 procent van de winst gegenereerd. Deze flexibiliteit wordt nog vergroot als ook opslag van energie tegen aanvaardbare kosten mogelijk is. Ook bij de opslag van energie kan weer substitutie van energiedrager toegepast worden. Een voorbeeld hiervan zien we bij de toepassing van warmte-kracht-koppeling met buffering van warm water. Tuinders passen dit al jaren toe door overdag stroom te produceren als de prijzen hoog zijn en de warmte op te slaan in grote buffervaten om de kassen gedurende de nacht te verwarmen. Warmte-kracht-koppeling in de tuinbouw aggregereert nu al grote vermogens, die real-time in de elektriciteitsmarkt benut worden.

Bij warmteopslag bij kleinverbruikers is warmte-kracht-koppeling moeilijker te gelde te maken. De warmtevraag als functie van de tijd loopt in de pas met de ontwikkeling van de stroomprijs. Gebufferde warmte kan te gelde gemaakt worden



Figuur 9

Opgenomen vermogen en kilowattuurprijs in de PowerMatchingCity virtuele energiecentrale

door bijvoorbeeld diensten te verlenen aan commerciële partijen of netbeheerders. Om dit soort functionaliteit van virtuele energiecentrales te onderzoeken, zijn in het Smart Grid Living Lab van DNV-KEMA in Hoogkerk 12 warmtepompen en 10 Stirling  $\mu$ WKKs in woningen geïnstalleerd. Ieder systeem is voorzien van een opslagtank voor warm water. Samen met het bedrijf ICT Automatisering en Essent is een virtuele elektriciteitscentrale, PowerMatchingCity, gebouwd, die door een PowerMatcher-systeem wordt aangestuurd.

Figuur 9 laat de vermogensproductie of consumptie zien als er een bepaald prijspatroon wordt opgelegd. Je ziet dat een dergelijke manier van slimme coördinatie er toe leidt, dat warmtepompen, voordat de prijs omhoog gaat, aangaan om warmte te bufferen. Voor micro-WKKs geldt het omgekeerde; vlak voordat de lage prijs optreedt, produceren ze volop om de warmtebuffer te vullen.

# Afrekeningsprocessen met prikkels voor flexibiliteit

Het gehele groothandelstraject van elektriciteit, inclusief alle verrekeningen van real-time bijdragen van de opwekkers en verbruikers naar de handelspartijen, wordt in Nederland binnen acht dagen afgerond. Voor de huishoudelijke en klein-zakelijke consumenten ligt dit anders. De afrekening van de elektriciteitskosten wordt bepaald door een jaarlijkse meteraflezing. Met een ingewikkeld proces van reconciliatie wordt, aan de hand van de profielmethode, het geschat verbruik als functie van de tijd vertaald naar de tijdsafhankelijke kosten. Door de benaderingen daarin komen de uiteindelijke waarden niet overeen met de meetwaarden. Uiteindelijk wordt een meetcorrectiefactor (MCF) gebruikt, die verschillen ten opzichte van de werkelijk gemeten waarden corrigeert.

De EU heeft een aantal jaren geleden een directief uitgevaardigd, waarin lidstaten worden opgeroepen deze cyclustijd te verkorten en meer rekening te houden met de prijs op het tijdstip van afname. Doel is een kortere feedbackcyclus tussen gebruik en verrekening te realiseren. Dit kan leiden tot een energie-efficiëncywinst van ongeveer 5 tot 15 procent. Voor Nederland is, volgens DNV-KEMA, de maatschappelijke business case voor de slimme meter sluitend. In Nederland is de standaardisatie van de 'communicerende' meter voortvarend ter hand genomen. Er is een technische standaard, NTA-8130, vervaardigd, waarmee basisfunctionaliteit gerealiseerd is. Op dit moment worden door de energieleveranciers de energiemanagementsystemen als gadgets voor kleine consumenten uitgerold, die gebruikmaken van de slimmeterfunctionaliteit. Nieuwe afrekenprocessen bevinden zich echter nog in het onderzoeksstadium.

De slimme meter registreert kwartierdata. Deze worden echter nu nog niet betrokken bij de afrekening. Een energiebedrijf kan elektriciteitsmarktvriendelijk en distributienetvriendelijk gedrag van consumenten niet honoreren.

ICT kan dit mogelijk maken door de real-time verbruikswaarden met een veel kortere cyclus terug te koppelen, zodat de informatie bij bedrijf van de handelsportfolio en bij de kortetermijnvoorspellingen van de staat van het netwerk, ook op lokaal niveau, gebruikt kan worden. Door de komst van meer gedistribueerde opwekkers en nieuwe vraagpatronen van elektriciteit in actievere distributienetten is haast geboden met het aanpassen van deze rol.

# Consumenten worden prosumenten

Er zijn een drietal manieren, waarop de afname van elektriciteit beïnvloed kan worden:

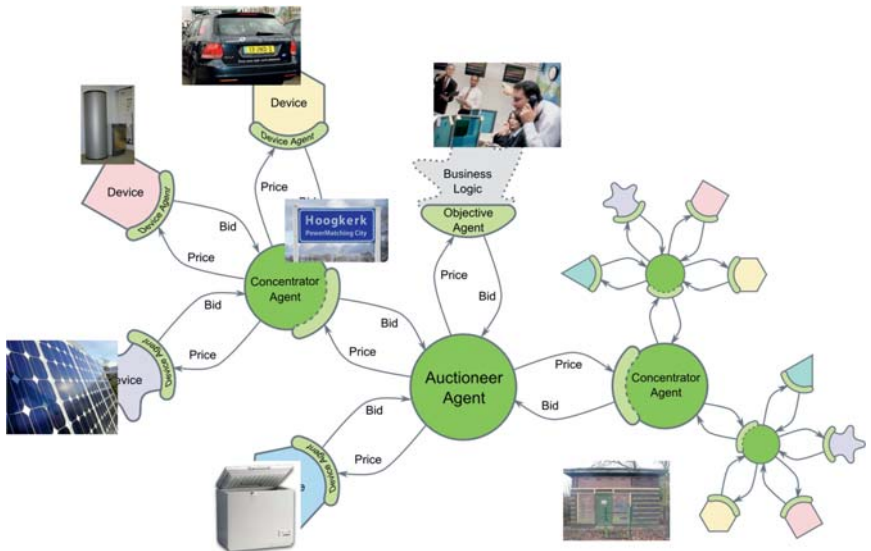
1. Top-down schakelen door de netbeheerder. Een al lang en veelgebruikt voorbeeld hiervan is de sturing van waterboilers bij klanten met pulsen, die via het stroomnet worden verstuurd. Ook in de huidige slimmere meters is een functie opgenomen, waarmee op afstand afgeschakeld kan worden.
2. Tarieven. Er kunnen een tijd van te voren tijdsafhankelijke tarieven of een keus uit tariefschema's worden verstuurd naar de klanten. Het mechanisme blijkt goed te werken als er voldoende verschillen tussen tariefschema's zijn. In Frankrijk wordt deze methode met succes gebruikt. Ook bij het project WebzEnergy in Darmstadt, dat recent is afgerond, werd slimmemetertechnologie in 150 huishoudens geïntroduceerd. Directe, real-time afrekening van het verbruik is onder de Duitse wetgeving niet mogelijk. Daarom werd een puntencompetitie opgezet. Voor de volgende dag werd een ideaal stroomafnameprofiel voor de huishoudens vastgesteld. Degenen, die dit profiel het beste volgden kregen de meeste punten. Er werd met veel enthousiasme meegedaan, maar er was ook een duidelijke vraag naar automatisering van het proces. Ervaringen in andere landen met dit soort tijdsafhankelijke tarieven laten zien, dat gebruikers na verloop van tijd het risico toch weer willen 'verzekeren' door weer naar vastere tarieven over te gaan.
3. Tweeweg communicatie en marktintegratie. Net als vermogensstromen gaan de informatiestromen twee kanten op. De energieproducenten en consumenten zijn geïntegreerd in een informatie- en communicatienetwerk.

In het laatste schema is een belangrijke rol weggelegd voor de 'prosument', een samentrekking van producent en consument. In ons omringende landen, maar ook in Nederland, neemt het aantal huishoudens, dat niet alleen elektriciteit gebruikt, maar ook terug levert, toe. In Duitsland zijn veldtesten als 'wassen met de zon' uitgevoerd in wijken waar soms een te groot lokaal aanbod van elektriciteit van zonnepanelen was. Het succesvolle experiment bestond eruit, dat als de gemeten transformatorbelasting te hoog was, er een sms'je naar de huishoudens werd verstuurd met het verzoek de wasmachine aan te zetten om het overschot lokaal

af te nemen. Het plaatsen van de gebruiker in de bestuurdersstoel van energiemanager is, met het opkomen van flexibele gebruikersdisplays en goedkope technologieën om een communicatienetwerk in te richten, sterk in opkomst. Hier ligt ook meerwaarde voor de toepassing van intelligentie in informatiesystemen: automatisering van het energiemangement. In het commerciële segment van de klanten van energiebedrijven liggen kansen. Met name voor beheerders van gebouwen. Het potentieel ligt bij deze categorie in het benutten van de flexibiliteit van verwarming/koeling en airconditioning en buffering van thermische energie.

# Virtuele energiecentrales

Prosumenten, producenten en consumenten van elektriciteit kunnen de flexibiliteit in hun productie en consumptie verenigen en aggregaties vormen, die meerwaarde creëren. Binnen het PowerMatchingCity Living Lab hebben we al laten zien, dat huiseigenaren de flexibiliteit van verwarmingssystemen op basis van warmtepompen en co-generatie van warmte en elektriciteit kunnen aggregeren en hiermee diensten gaan leveren op de elektriciteitsmarkt. Een vergelijkbare aggregatie kan samengesteld worden voor het optimaliseren van het laden van elektrische auto's. Ook 'communities' met veel duurzame opwekking en verschuifbare vraag kunnen hun vraag en aanbod optimaliseren binnen een dergelijke virtuele centrale. Door op een marktgerichte manier te coördineren, waarbij een 'fit-and-forget'-filosofie wordt toegepast, kan er automatisch op afstand beïnvloed worden. Eenmaal geïnstalleerd, is een apparaat beschikbaar binnen een virtuele centrale. De gebruiker stelt de voorkeuren voor het relatieve belang van kosten, comfort en duurzaamheid in voor het bedienen van de virtuele centrale.



Figuur 10

Schema van een virtuele energiecentrale

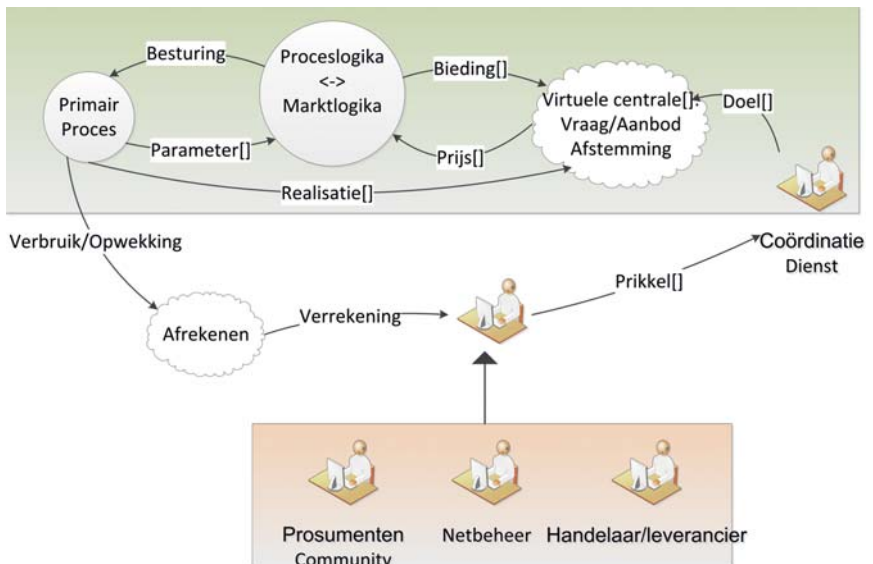
Een voorbeeld van een schema van een virtuele centrale met allerlei soorten apparaten en stakeholders is te vinden in figuur 10. De apparaten zijn voorzien van intelligentie via software agents en wisselen boodschappen met elkaar uit via datacommunicatienetwerken.

Door het huidige ontwerp van de elektriciteitsmarkt en regelgeving rond aansluitingen, zijn business cases voor virtuele centrales in Nederland beperkt tot hooguit 120 euro per jaar op de schaal van huishoudens. Voor de maatschappelijke business case is het echter zaak verder te kijken. De totale belasting in het net, gesommeerd over de tijd, wordt door energiebesparing minder. Maatschappelijk gezien is het niet verantwoord een groot deel van de netten te verzwaken en extra piekcentrales te bouwen om stroom te leveren gedurende korte perioden met veel vraag naar elektriciteit.



# Elektronische markten als bindmiddel in virtuele centrales

Zoals we zagen, worden in geliberaliseerde elektriciteitssystemen, op groot-handelsschaal, vraag en aanbod via economische marktwerking op elkaar afgestemd. Deze aanpak blijkt ook goed toepasbaar op de microschaal van apparaten. Bij ECN, en later bij TNO, hebben we een mechanisme om virtuele centrales te bouwen, de PowerMatcher- technologie, op een soortgelijke leest geschoeid. Om te kiezen welk apparaat aangaat of uitgaat, is er inzicht in de toestand van het primaire stroomverbruikende proces nodig. Door de PowerMatcher wordt op een generieke manier de toestand van verschillende typen primaire processen vertaald in een bieding: welke prijs wordt voor welk vermogen geboden of gevraagd. Een bieding op een bepaald type markt heeft, voor ieder apparaat in de virtuele centrale, dezelfde structuur namelijk een rij vraag/aanbod-prijzen en een rij vermogens. Voor verschillende typen apparaten als koelinstallaties, verwarmingssystemen en ook voor energieopslag in batterijen en auto's, hebben we deze vertaalslag van proceslogica naar marktlogica kunnen maken. De marktlogica mondt



Figuur 11

Gegevensstromen en processen voor bedrijf van virtuele energie centrales met agents

uit in een bieding, die naar een centrale marktplaats wordt doorgegeven. Binnen een informatiesysteem kan dit door een verzameling autonome software agent-processen in een computer netwerk te laten communiceren.

Het groene blok in figuur 11 representeert het real-time deel van de coördinatie; het onderste deel vindt voor de verrekening plaats. Een veilingmeester (auctioneer) op de centrale marktplaats, waar de biedingen binnenkomen, is het hart van de virtuele centrale. Er is één type agent dat door zijn biedgedrag zorgt dat het optimalisatiedoel wordt bereikt. De uitkomst van het marktproces, de prijs, wordt teruggegeven aan iedere agent, die op zijn beurt de consequentie van de prijs vertaalt in de hoeveelheid elektriciteit, die het primaire proces gaat verbruiken. Anders dan de array-notatie doet vermoeden, hebben we tot nu toe alleen virtuele energiecentrales geïmplementeerd, die slechts op één coördinatiemarkt actief waren. Hier liggen de toekomstige uitdagingen.

De optimalisatiedoelen van een virtuele energiecentrale kunnen divers zijn. Ruwweg kunnen we drie soorten optimalisatiedoelen beschouwen:

1. Commerciële optimalisatie. De aggregatie is landelijk en strekt zich uit tot een deel van het klantenbestand van een energieleverancier, dat een contract voor een bepaald product heeft afgesloten. De regeldoelen kunnen zijn het beter actief integreren van zon en wind in de markt of het compenseren van 'ramp-up'- of 'ramp-down'-effecten van grote centrales. Virtuele centrales profiteren hierbij van het feit, dat ze erg snel hun vermogen kunnen aanpassen doordat ze over een groot aantal apparaten verdeeld zijn.
2. Duurzaam bedrijf. We kunnen hierbij denken aan het ondersteunen van energie-'communities', die onderling duurzame elektriciteit verhandelen. Hier is de aggregatie landelijk of regionaal.
3. Ondersteuning van netbeheer. Belang van de netbeheerder is het voorkomen, dat de levensduur van distributiecomponenten als transformatoren en kabels niet onnodig verkort wordt door overbelasting en ondersteuning bij het opheffen van knelpunten bij het dagelijks beheer. De aggregatie in het laatste geval komt overeen met een deel van het fysieke netwerk.

## Verder onderzoek

Binnen projecten wereldwijd, is al enige ervaring opgedaan met bedrijf van apparaten en installaties, die via een computernetwerk met elkaar gekoppeld zijn. De ontwikkeling van SmartGrid-technologie ten behoeve van virtuele centrales, bevindt zich nu in de opschalingsfase.

Eilanden zijn de eerste kandidaten voor opschaling van virtuele centrales naar grotere aantallen. De energievoorziening op een eiland is vaak kwetsbaar, omdat er maar één kabel naar het vasteland loopt. Daarnaast zijn zon en wind op eilanden vaak in hogere mate beschikbaar. Door TNO wordt momenteel in het EcoGrid-project in samenwerking met Europese partners gewerkt aan een SmartGrids-proef met meer dan 1000 aansluitingen op het eiland Bornholm in de Oostzee. Daarnaast werkt TNO aan studies om het elektriciteitssysteem op Aruba te verduurzamen met SmartGrid-technologie.

Om de functionaliteit van virtuele centrales en de inpassingsmogelijkheden in het energiesysteem te vergroten, verdienen nog een aantal thema's verder onderzoek.

Het eerste thema komt voort uit de dynamiek van de markten en de netten. ICT maakt het mogelijk de rollen van de stakeholders in het markt- en distributieproces beter af te beelden en daardoor een gelijkjer speelveld te creëren. Dit geldt niet alleen voor de commerciële dimensie maar ook voor de maatschappelijke duurzaamheidsdimensie.

Een tweede thema houdt verband met de informatiearchitectuur van virtuele centrales. Het betreft hier het mogelijk maken van een kleinere footprint van apparaatinterfaces, delegatie van rekentaken in de cloud en verdere uitbreiding van protocollen voor communicatie in virtuele centrales. De opkomst van kleinschalige communicatienetwerken en processoren met een beperkte footprint, maakt het koppelen van apparatuur aan virtuele power plants en het creëren van interactie met de gebruiker steeds makkelijker en goedkoper. Koppelen we daaraan de mogelijkheden van het delegeren van rekentaken die cloud computing biedt, dan is te verwachten, dat de kosten voor het aansluiten van componenten in een virtuele centrale en het bedrijven ervan nog een heel stuk omlaag kunnen. Op dit

moment wordt hier wereldwijd aan gewerkt. Binnen TNO is een aanzet gegeven door het opzetten van het Flexible Power Alliance Network en verdere ontwikkeling van het OpenEMF-model voor de informatiearchitectuur. Hierdoor worden plug-en-play energiemanagementtoepassingen mogelijk.

Een derde thema betreft het uitbreiden van de mogelijkheden om de intelligentie van de verschillende agents in de virtuele centrales te vergroten. Zoals het faciliteren van bedrijf van apparaten op meerdere markten, het gebruik van plannings- en voorspellingsinformatie, die als informatiedienst geleverd kunnen worden, en real-time optimalisatiemechanismen, waarmee meerdere gelijktijdige doelen bereikt kunnen worden.

Het vierde en laatste thema heeft te maken met betrouwbaarheid en informatiebeveiliging van slimme elektriciteitssystemen als belangrijkste kritische infrastructuur in de economie.

# Dankwoord en afsluiting

Ik wil al degenen, met wie ik de afgelopen jaren in diverse projecten heb gewerkt, bedanken.

Ik heb de samenwerking, die ik bij ECN en TNO heb mogen ondervinden, en het teamwork, zeker in de afgelopen turbulente jaren voor het programma Smart-Grids, bijzonder gewaardeerd. Daarnaast wil ik mijn werkgever TNO en met name het thema energie efficiency binnen deze organisatie en de groep SEM, bedanken dat ze, via een leerstoel binnen de TU/e, een voorpost voor de ICT-benadering van elektriciteitsnetwerken wilden genereren.

Verder dank ik de vakgroep Electrical Energy Systems en speciaal professor Wil Kling, voor de snelle en soepele manier waarop ik mijn werkzaamheden heb kunnen ontplooiën.

Zeker niet in de laatste plaats bedank ik ook mijn gezin en speciaal Martine, voor de continue ondersteuning en het aanpassingsvermogen de afgelopen tijd.

Ik heb gezegd.

# Curriculum Vitae

**Prof.dr. I.G. (René) Kamphuis is per 1 januari 2012 benoemd tot deeltijdhoogleraar ‘Smart operation of electricity networks through ICT’ aan de faculteit Electrical Engineering van de Technische Universiteit Eindhoven.**

René Kamphuis (1952) studeerde in 1977 af in de chemie aan de Katholieke Universiteit Nijmegen. Na de militaire dienstplicht werkte hij aan de Rijksuniversiteit Groningen bij het laboratorium voor chemische fysica. Hier promoveerde hij in 1983 op een proefschrift over de hoge resolutie 3D-structuur van het enzym papaine en de evolutionaire verwantschap met andere eiwitten. Van 1983 tot 1999 werkte hij bij Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) in verschillende inhoudelijke functies en managementfuncties op het gebied van software engineering en ICT. Vanaf 2000 was hij bij ECN nauw betrokken bij de opzet van het programma ‘ICT en Energie’ en de unit ‘Energie in de Gebouwde Omgeving en Netten bij ECN’. Binnen deze unit werd een ‘Smart Grids’-programma opgezet, dat in 2011 in het energithema van TNO is opgenomen. Binnen het speerpunt vraag/aanbod-sturing was hij betrokken bij de ontwikkeling, de implementatie en het uitvoeren van veldtesten met virtuele energiecentrales, waarbij een aantal innovatieve algoritmen als de Power-Matcher werden ontwikkeld en geïmplementeerd.

## Colofon

### Productie

Communicatie Expertise  
Centrum TU/e

### Fotografie cover

Rob Stork, Eindhoven

### Ontwerp

Grefo Prepress,  
Sint-Oedenrode

### Druk

Drukkerij Snep, Eindhoven

ISBN 978-90-386-3344-2  
NUR 959

Digitale versie:  
[www.tue.nl/bib/](http://www.tue.nl/bib/)

**Bezoekadres**

Den Dolech 2  
5612 AZ Eindhoven

**Postadres**

Postbus 513  
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11  
[www.tue.nl](http://www.tue.nl)



Technische Universiteit  
**Eindhoven**  
University of Technology