



## Peakshaving van zon-PV met de elektrische boiler





---

# Peakshaving van zon-PV met de elektrische boiler

5 april 2016

**CE Delft**  
Maarten Afman

**Overview**  
John Baken

**Berenschot**  
Bert den Ouden  
Peter Graafland  
Rutger Bianchi

**EXE**  
George Trienekens  
Emanuel van Ruitenbeek

**Greenspread**  
Michael Fraats  
Jan Scheepers

Dit project is ondersteund vanuit een regeling in de Topsector Energie

**Berenschot**



**Overview**

**GREENSPREAD**



**CE Delft**

**ENERGY  
EXCHANGE  
ENABLERS**



# Inhoudsopgave

<b>Managementsamenvatting (NL)</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Inleiding</b> .....	<b>11</b>
1.1 Achtergrond .....	11
1.2 Doelstelling .....	13
1.3 Afbakening .....	14
1.4 Leeswijzer rapport .....	14
<b>2. Configuratie en strategieën</b> .....	<b>15</b>
2.1 Technische configuraties .....	15
2.2 Strategieën voor de bedrijfsvoering .....	15
<b>3. Simulaties</b> .....	<b>19</b>
3.1 Simulaties van de slimme elektrische boiler .....	19
3.2 Resultaten .....	22
<b>4. Economische analyse</b> .....	<b>27</b>
4.1 Opbouw van de energierekening .....	28
4.2 Resultaten voor Strategie 1 - maximale benutting eigen opwek .....	29
4.3 Resultaten voor Strategie 2 - slimme sturing .....	30
4.4 Gevoeligheid voor verschuivingen in belastingtarieven .....	32
4.5 Gevoeligheid voor de terugleververgoeding .....	34
4.6 Omdenken: hoeveel kWh aan zonnestroom moet worden benut om van een rendabele business case te kunnen spreken? .....	34
<b>5. Verdienmodellen</b> .....	<b>39</b>
5.1 Strategie 1 – maximale benutting eigen opwek .....	39
5.2 Strategie 2 – slim gestuurde E-boiler .....	41
<b>6. Conclusies en vervolgstappen</b> .....	<b>43</b>
<b>Literatuurlijst</b> .....	<b>45</b>
<b>Bijlagen</b> .....	<b>47</b>
Bijlage 1 .....	47
Bijlage 2 .....	49
Bijlage 3 .....	50
Bijlage 4 .....	52



# Managementsamenvatting (NL)

Zon-PV (photovoltaic) is voor huishoudens anno 2016 een aantrekkelijke optie: relatief makkelijk uitvoerbaar, financieel haalbaar en het geeft een goed gevoel om (deels) in de eigen behoefte te voorzien. De financiële haalbaarheid is te danken aan enerzijds de sterk gedaalde investeringskosten voor zonnepanelen, anderzijds aan de relatief hoge kWh-tarieven dankzij de salderingsregeling.

Wanneer, zoals door Minister Kamp aangekondigd, de salderingsregeling gaat verdwijnen of wordt afgebouwd, zal zonder compenserende maatregelen de financiële haalbaarheid van zon-PV sterk afnemen. Dit onderzoek richt zich op de mogelijkheden voor opslag van eigen opwekking in boilers ten behoeve van de warmtapwatervoorziening in huishoudens.

Op zich lijkt dit een eenvoudig concept. In plaats van het terugleveren van elektriciteit op momenten dat de opwekking groter is dan het eigenverbruik wordt de elektriciteit benut in een boiler om warm tapwater te produceren. Er zijn echter diverse technische configuraties mogelijk, waarbij ook de dimensionering van de verschillende componenten als variabelen kunnen worden meegenomen. Ook zijn er verschillende beheervormen mogelijk. Zo kan een huishouden in eigen beheer werken of samenwerken met een energiedienstenleverancier.

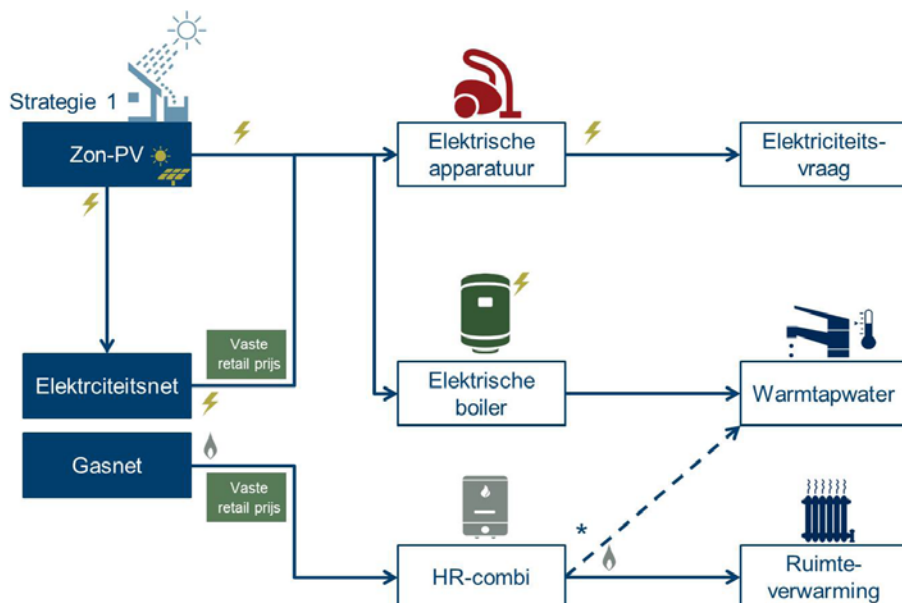
Uitgaande van een 2kWpiek PV-installatie en een boiler met een inhoud van 195 liter zijn simulaties uitgevoerd voor een tweetal strategieën:

- Strategie 1: het maximaliseren van eigen consumptie van de zelf opgewekte zonnestroom met behulp van de elektrische boiler;
- Strategie 2: het laden van de E-boiler sturen aan de hand van prijsprikkels die volgen uit de APX- en onbalansmarkt

Aan de hand van de simulaties op kwartierbasis is voor verschillende tapwaterprofielen vastgesteld hoeveel elektriciteit op jaarbasis zinvol kan worden benut voor de productie van warmtapwater. Aan de simulaties zijn economische analyses gekoppeld.





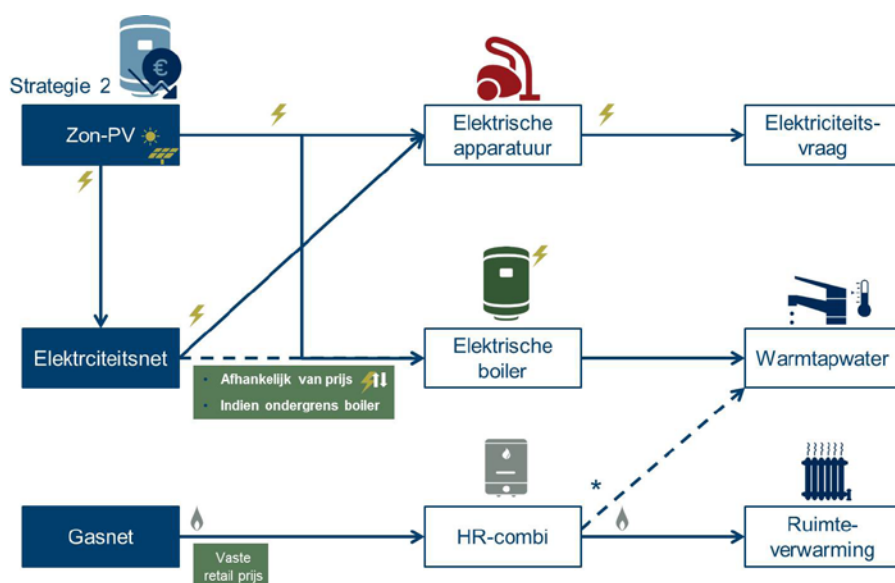


Figuur 2. Schematische weergave strategie 1. \* Technische configuratie2

Voor strategie 2 'sturen aan de hand van prijsprikkels' (als er alleen elektriciteit van het net getrokken wordt wanneer de elektriciteitsprijs inclusief belastingen lager is dan de gasprijs inclusief belastingen) bedraagt de netto besparing €22 op jaarbasis. Dit is minder dan de besparing bij strategie 1, omdat het een theoretische simulatie voor een economische optimalisatie waarbij geen belastingen zijn meegenomen betreft. Er is gekozen voor een theoretische optimalisatie om een toekomstbestendige berekening van flexibiliteit te maken, die niet wordt beïnvloed door energiebelastingen, hetgeen een resultante is van huidig beleid.

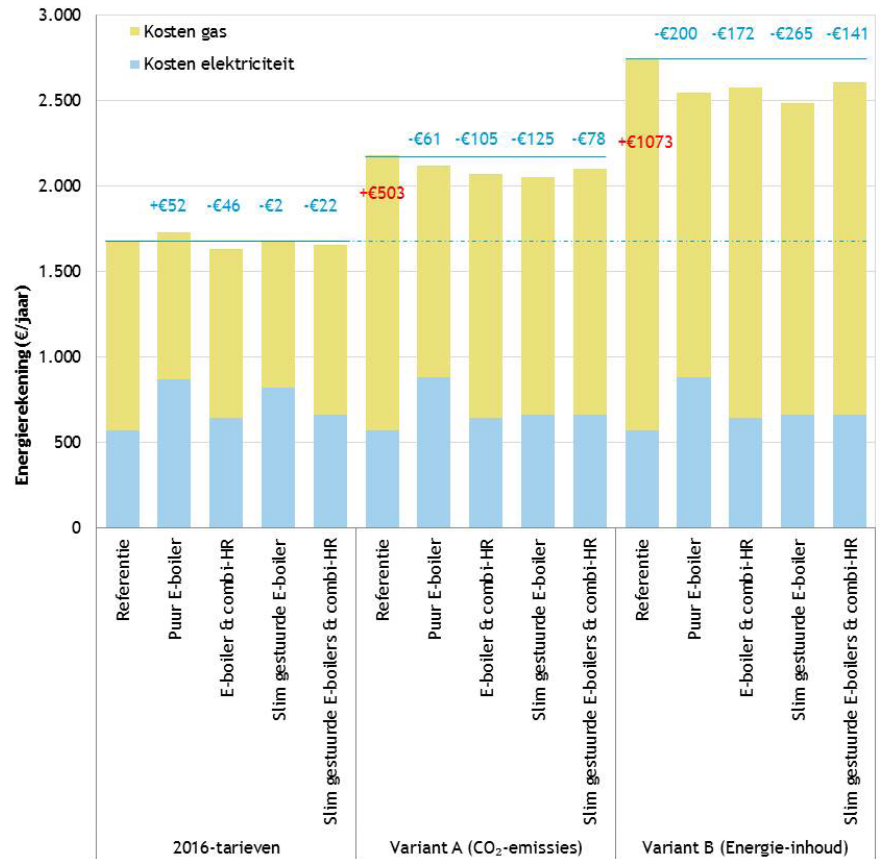
**Conclusie B:** De belastingtarieven zijn van grote invloed op de financiële effecten en doorslaggevend voor de rentabiliteit van de onderzochte concepten, waarbij de belastingtarieven het voordeel van levering van flexibiliteit in de weg staan.

Het blijkt dat de huidige tarieven de toegevoegde waarde van een energiedienstenleverancier in geld uitgedrukt tot vrijwel nul terugbrengt en daardoor de potentie voor de levering van flexibiliteit marginaliseert.



Figuur 3. Schematische weergave strategie 2. \* Technische configuratie2

Bij veranderingen in de energiebelastingtarieven op elektriciteit en gas tot het niveau van een tarief op basis van gelijke belasting van de CO<sub>2</sub> emissies van de energiedragers, blijkt dat 100-125 euro aan financieel voordeel bestaat, afhankelijk van de regelstrategie.



*Figuur 4. Jaarlijkse kosten met aangepaste belastingtarieven op aardgas.*

Het grote verschil in energiebelasting op elektriciteit resp. gas (belasting per energie-eenheid/CO<sub>2</sub>-emissies) heeft een groot effect op de rentabiliteit bij strategie 1 ‘maximale benutting eigen opwek’ en bij strategie 2 ‘slim gestuurde E-boiler’.

**Hoofconclusie**

Al met al blijkt dat het concept om een overschot aan eigen opwekking op te slaan ten behoeve van warmtapwaterproductie potentie heeft. Er zijn technische en dimensioneringsoptimalisaties mogelijk. Nog niet meegenomen in dit onderzoek is bijvoorbeeld de benutting van zonnestroom voor ruimteverwarming.

De reeds ingezette trend om elektriciteit en gas meer gelijkwaardig te belasten draagt in positieve zin bij aan de businesscase en verdient uit het oogpunt van de gewenste energietransitie sterke aanbeveling. Om flexibiliteit te bevorderen zijn aanpassingen in de regelgeving met betrekking tot energiebelasting noodzakelijk.

**Tot slot**

Er zijn al diverse leveranciers van elektrische boilers die met productontwikkeling inspelen op dit concept. Met hen is samengewerkt in het kader van dit project. De resultaten van dit onderzoek geven voldoende aanleiding en een verbeterd inzicht om samen met de fabrikanten het concept dichter bij toepassing in de praktijk te brengen.

# 1. Inleiding

## 1.1 Achtergrond

De transitie naar een duurzame energievoorziening kent veel veranderingen en tegelijkertijd veel onzekerheden. In verschillende scenariostudies (bijvoorbeeld ECN & PBL - Nationale Energieverkenning 2015) wordt aangetoond hoe de duurzame energievoorziening er na invoering van het Energieakkoord uitziet en welke veranderingen dit teweegbrengt op de markt. Hoewel de aannames en exacte uitkomsten per scenario verschillen, valt op dat in elk van deze toekomstbeelden robuuste elementen worden geschetst:

- Toenemende opwekking van duurzame energie
- Meer decentrale productie
- Meer behoefte aan flexibiliteit
- Toenemende elektrificatie
- Groeiende complexiteit van het energiesysteem
- Veranderende rol van gas
- Toenemende behoefte aan besparing en hergebruik van energie

Bovenstaande factoren zijn belangrijk om mee te nemen in het denken over de energiesector van de toekomst. Immers, om een goede energievoorziening te blijven garanderen, is het van belang dat alle losse elementen worden geïntegreerd tot een werkend, betrouwbaar systeem. De precieze invulling hiervan en de mate waarin alle elementen een rol gaan spelen in de energievoorziening is echter nog onzeker. Op elk van deze terreinen ontstaan de komende jaren dan ook allerlei uitdagingen en kansen die vragen om vernieuwende oplossingen. Hierbij zal met name de wisselwerking tussen beleid en regelgeving vanuit de overheid enerzijds en technologische en organisatorische ontwikkeling vanuit de markt bepalend zijn voor de inrichting van de energievoorziening.

Zoals onder andere is gebleken uit de studies *'De rol van de eindgebruiker in relatie tot Systeemintegratie'* en *'Routekaart energieopslag 2030'* die voor het brede programma Systeemintegratie zijn gepubliceerd in april 2015, krijgt de eindgebruiker een steeds belangrijker rol in de toekomstige energievoorziening. Waar de gebruiker in het traditionele systeem (doorgaans) niet actief deelnam aan markttransacties en sturing van vraag en aanbod. De industrie, huishoudens en het MKB zal straks een actievere rol vervullen door in te spelen op de verschillende ontwikkelingen met betrekking tot flexibiliteit in het energiesysteem. Deze ontwikkelingen bieden nieuwe kansen voor energietechnologieën en aanbieders van deze technologieën in de markt.

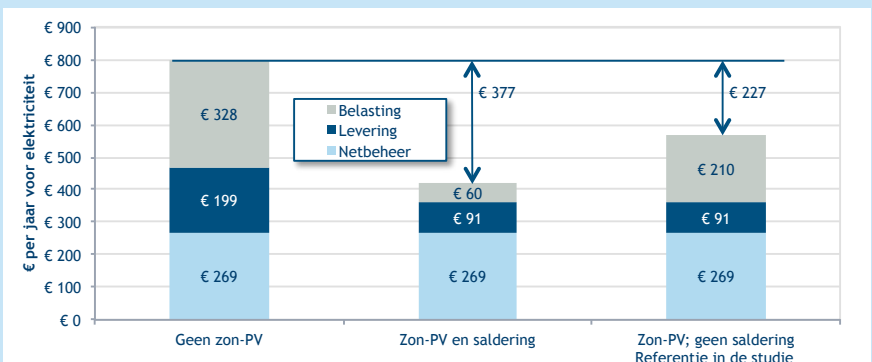
Een van de factoren die een rol speelt in de ontwikkeling van de energievoorziening is de huidige ‘salderingsregeling’, waarbij de eindgebruiker volledige vergoeding krijgt voor terug geleverde duurzame energie aan het elektriciteitsnet. Deze regeling is effectief gebleken voor wat betreft de introductie van met name de toepassing van PV-zonne-energie door huishoudens. Het onderstaande kader gaat in op de effecten van de salderingsregeling en andere ontwikkelingen in de energiebelasting. Deze ontwikkelingen zijn aanleiding geweest voor dit onderzoek.

### Ontwikkelingen in de energiebelastingen

Er zijn twee belangrijke actuele ontwikkelingen in de belastingen. Deze werken door in het financiële rendementen van zon-PV installaties en daarmee ook de mogelijkheden van de slimme elektrische boiler.

De eerste is de salderingsregeling. Zoals eerder vermeld, is het momenteel mogelijk voor kleinverbruikers om de zon-PV opwek die niet zelf wordt verbruikt, te salderen. Salderen betekent dat de elektriciteit die wordt teruggeleverd aan het net kan worden weggestreept met de elektriciteit die op een ander moment wordt afgenomen van het net. Het voordeel voor de kleinverbruiker met een zon-PV installatie is dat teruggeleverde energie financieel evenveel oplevert (incl. BTW, energiebelasting etc.) als de kostprijs van de energie in bijvoorbeeld de avond.

De salderingsregeling levert hiermee een belangrijke bijdrage aan de positieve business case van zon-PV. Minister Kamp (Economische Zaken) heeft aangekondigd<sup>1</sup> dat de salderingsregeling zal worden geëvalueerd (uiterlijk in 2017), en dat het mogelijk is dat de regeling na 2020 wordt versoerd, om “overstimulering” te voorkomen. Als er helemaal geen saldering meer mogelijk is, dan krijgt een gebruiker alleen het leveringstarief voor de teruggeleverde energie (terugleververgoeding), een stuk minder dan met (volledige) saldering. Het onderstaande figuur toont, voor het door ons gesimuleerde huishouden met 2 kWp zon-PV installatie, waarbij de jaaropbrengst voor 40% zelf wordt gebruikt en voor 60% wordt teruggeleverd, het effect van de salderingsregeling: een extra opbrengst van € 150 per jaar.



De referentie in de studie is de case *zonder saldering*. We hebben hierbij aangenomen dat er wel een terugleververgoeding is voor teruggeleverde zon-PV, en dat deze hetzelfde is als het leveringstarief. De terugleververgoeding kan ook lager zijn dus de ‘waarde’ van teruggeleverde zonnestroom kan geringer zijn<sup>2</sup>.

1. Tweede Kamer, vergaderjaar 2014–2015, 29 023, nr. 177 (algemeen overleg, 23 september 2014).  
 2. De ACM stelt regels vast aangaande de minimale hoogte van de terugleververgoeding.

De tweede ontwikkeling is die van de energiebelasting. Het huidige belastingtarief op elektriciteit is per eenheid van energie die van het net wordt betrokken ca. 3,5 keer hoger dan dat op gas. De trend is dat dit meer gelijk getrokken wordt, om een meer gelijk speelveld tussen energiedragers te bewerkstelligen, bijvoorbeeld om warmtepomp verwarming financieel rendabeler te maken. In de energiebelastingtarieven van 2016 is vanwege deze discrepantie de belasting op elektriciteit gedaald (-15%) en die op gas toegenomen (+31,7%) ten opzichte van de tarieven van 2015. Als de energiebelasting op elektriciteit lager wordt, en de salderingsregeling wordt uitgekleeft, dan neemt de financiële waarde van het terugleveren van zon-PV af, en tegelijk vergroot dit de kansen voor energietoepassingen zoals de elektrische boiler.

Uit gesprekken met verschillende boilerfabrikanten zoals Bosch/Nefit en Nibe is gebleken dat men op dit moment bezig is met de technische ontwikkelingen die inspelen op een veranderend energiesysteem.

## 1.2 Doelstelling

Gegeven dit kader is het zinvol om te onderzoeken wat de mogelijkheden zijn van opslag van elektriciteit in de vorm van warm tapwater door middel van een elektrische boiler. Enerzijds om zonnestroom maximaal nuttig in te zetten als de salderingsregeling er niet meer is, en anderzijds omdat deze optie potentie biedt vanwege de mate van flexibiliteit die wellicht kan worden benut. Onderzocht wordt wat de verschillende kansrijke configuraties en de bijbehorende software moet zijn. Dit laatste richt zich op vragen als: wat zijn de algoritmes voor het gestuurd laden van de boilers, op basis van welk marktsignaal worden de boilers ingezet (op welk stuursignaal: zon-PV invoeding; co-optimalisatie met koppeling energiemarkten APX en onbalans).

Het doel van deze haalbaarheidsstudie is dus te onderzoeken welke configuraties kansrijk zijn, gegeven het ontwerp van het systeem en hiermee ook input leveren voor productontwikkeling van het bijbehorende energiemanagementsysteem.

Dit zal mogelijk leiden tot een product dat in korte tijd een marktrijpe oplossing kan bieden. Wanneer deze haalbaarheidsstudie succesvol blijkt, kan een experiment in de praktijk opgezet worden waarmee de werking van het product wordt gedemonstreerd. In een praktijktest is het mogelijk om verschillende effecten op bijvoorbeeld netbelasting te onderzoeken.

De langetermijnoplossing die met deze techniekcombinatie in beeld komt: het vergroten van de hoeveelheid zonne-energie die nuttig kan worden opgewekt zonder dat er congestie op de netten optreedt. Daarnaast kan het voorkomen dat de marktprijzen voor elektriciteit op momenten met veel zon-PV erg laag worden, wat ook een bijdrage levert aan het overeind houden van het verdienmodel voor alle vormen van duurzame energie.

### 1.3 Afbakening

Het onderzoek richt zich op het identificeren van het verdienmodel van het toepassen van een elektrische boiler voor de warmtapwatervraag, waarbij twee verschillende technische configuraties (alternatief voor HR-combiketel en in serie geschakeld daarmee) zijn onderzocht evenals het vraagstuk of lokaal moet worden geoptimaliseerd of dat 'slimme marktkoppeling' (flexdiensten) betere prestaties geeft.

De studie is uitgevoerd voor een gemiddelde woning met zowel een elektriciteits- als gasaansluiting als zonnepanelen. De rendabiliteit van de boiler bij andere configuraties (collectieve warmte) kan anders uitvallen.

We zijn uitgegaan van een bij te plaatsen conventionele elektrische boiler, waarbij nog geen keuze is gemaakt voor AC of DC. Bij de modellering is aangenomen dat de vermogensopname van de boiler goed regelbaar is, dus goed het [overschot van] de productie van zon-PV kan volgen. (Dat is dus anders dan aan/uit geregelde verwarmingsspiralen).

Er zijn uiteraard andere technische configuraties mogelijk, bijvoorbeeld koppeling met ruimteverwarming, koppeling met slimme warmtepomp, et cetera. Deze zijn niet onderzocht. Op basis van het onderzoek kunnen we wel tentatief oplossingsrichtingen aangeven in welke richting andere configuraties<sup>3</sup> waarschijnlijk tot goede technische en economische prestaties zullen leiden.

De slimme marktkoppeling die is onderzocht (de elektrische boiler als flexibiliteitsdienstenaanbieder) is op basis van twee prijssignalen: day ahead leveringsmarkt (gesimuleerde gesimuleerde prijzen voor 2023) en de realtime markt (onbalansmarkt). De congestiedimensie is niet onderzocht.

### 1.4 Leeswijzer rapport

In het volgende hoofdstuk worden de manieren waarop boilers in huishoudens kunnen worden toegepast beschreven en worden de twee geselecteerde strategieën om de e-boiler in te zetten uiteengezet. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de manier waarop de simulatie van de elektrische boiler-installatie is uitgevoerd en wat de resultaten zijn, in de termen van benutte energie. Deze resultaten leveren de input voor de economische analyse in hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk is gekeken naar de business case en of er een rendabele business case valt te maken voor de eindgebruiker (consument). In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op verdienmodellen en wordt beschreven op welke wijze elektrische boilers ingepast kunnen worden in relevante systeemconfiguraties bij afnemers van warm tapwater. Tot slot wordt in hoofdstuk 6 de conclusies en vervolgstappen gepresenteerd.

<sup>3</sup> Het is bijvoorbeeld mogelijk om de elektrische boiler niet alleen voor tapwater te gebruiken, maar het buffervat ook in te zetten ter ondersteuning van een warmtepomp voor ruimteverwarming. Dit vergroot de flexibiliteit van de warmtepomp. Een tweede optimalisatie is een geïntegreerd apparaat maken: warmtepompen bevatten al een weerstandsverwarming – module voor de piekvraag. Wellicht volstaat dus alleen een buffervat en kan de gloeispiraal van de warmtepomp worden gebruikt.

# 2. Configuratie en strategieën

Elektrische warmwaterboilers bestaan uit een betrekkelijk beperkt aantal technische componenten, en zijn daarmee technologisch niet complex. Toch zijn er een groot aantal technische configuraties mogelijk om een boiler in een huishouden in te passen. De hoeveelheid mogelijke strategieën om de apparaten in te zetten is zelfs nog groter. In dit hoofdstuk worden deze beschreven.

## 2.1 Technische configuraties

Voor de business case en financiële haalbaarheid zijn twee verschillende technische configuraties uitgelicht. Er is onderscheid te maken tussen de volgende configuraties:

- E-boiler wordt geïnstalleerd in het huis als nieuwe standaard tapwatervoorziening,
- E-boiler wordt bijgeplaatst als ‘voorverwarmer’ op de reeds aanwezige gasgestookte (hoogrendement) combi-ketel.

De bovenstaande configuraties zijn in deze studie gekwantificeerd omdat ze voor het onderdeel van de haalbaarheidsstudie interessant zijn om als eerste te bekijken. Uiteraard is het ook mogelijk om een al aanwezige bestaande E-boiler te gebruiken.<sup>4</sup>

## 2.2 Strategieën voor de bedrijfsvoering

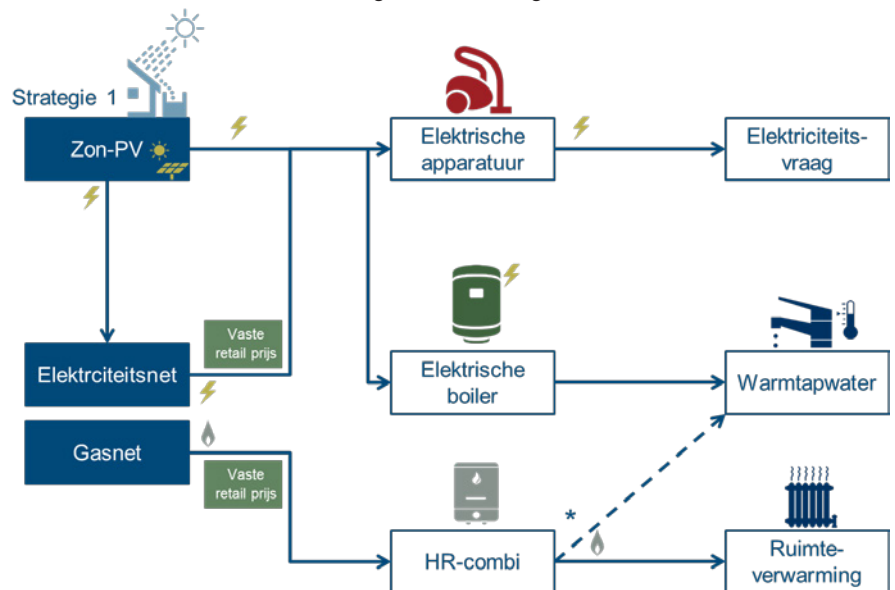
Voor de simulatie van het haalbaarheidsonderzoek is gekozen voor twee alternatieve strategieën voor de bedrijfsvoering die apart worden gesimuleerd. De eerste strategie is proberen om zoveel mogelijk de met de zon-PV-installatie opgewekte elektriciteit maximaal in eigen huis te benutten. Dit levert de minste teruglevering van zon-PV op, en past het beste bij huishoudens die bijvoorbeeld bijna autarkisch of all-electric willen worden. Voor het elektriciteitsnet heeft dit als voordeel dat invoedingspieken van zon-PV tegengegaan worden. De tweede strategie betreft het gelijktijdig optimaliseren van de inzet van de elektrische boiler en de invoeding van zon-PV gegeven de situatie op de energiemarkten. Dit gebeurt voor een groot aantal huishoudens gelijktijdig, aangestuurd via een energiedienstenleverancier, zodat voor de energiemarkt een relevant vermogen ontstaat. In onderstaande paragrafen worden de twee strategieën in meer detail beschreven. Beide simulaties zijn zonder belastingen, ODE en gas voor warmtapwater, in de economische analyse zijn deze wel meegenomen.

<sup>4</sup> Dit vergt alleen wel een slimme - en naar keuze prijsgestuurde - aanstuuringsmodule. Verder is ook een spanningsregelaar of iets dergelijks nodig om de laad-stroom te kunnen sturen op het surplus zon-PV, hetgeen niet altijd precies overeenstemt met de elektrische aansluitwaarde van de boiler.

### 2.2.1 Strategie 1: 'maximale benutting eigen opwek'

In deze strategie wordt maximale benutting van de eigen opwek nagestreefd. Het vermogen afkomstig van de zon-PV dat niet direct zelf wordt verbruikt, wordt gebruikt om warm tapwater te maken. Het warm tapwater wordt gebufferd in een boiler en kan later gebruikt worden. In onderstaande figuur is schematisch weergegeven hoe de zonnestroom wordt aangewend. Het verbruik van de reguliere elektrische apparatuur in de woning (aangegeven met het stofzuigertje) heeft altijd voorrang op de E-boiler, aangaande de benutting van zon-PV. De boiler kan de enige bron van warm tapwater zijn (technische configuratie 1), hetgeen betekent dat er ook elektriciteit gebruikt wordt om de boiler te laden, voor het geval dat er onvoldoende zon-PV is. Hierbij is een bepaald minimum comfortniveau van toepassing: een bepaald aantal douchebeurten moet altijd gegarandeerd zijn. Er vindt wel teruglevering van zon-PV plaats, maar dit geschiedt pas wanneer de E-boiler voldoende is geladen. De boiler kan ook worden gecombineerd met/toegevoegd bij een bestaande (hoogrendement) gas combiketel (technische configuratie 2). Zodat de elektrische boiler niet stroom van het net hoeft te halen, wanneer de boiler leeg is en er wel een tapwatervraag is op dat moment. De combiketel neemt dan de verzorging van de warmtapwatervraag over. Dit is niet terug te zien in de simulaties maar wel in de economische analyse.

Zie hieronder de schematische weergave van strategie 1:

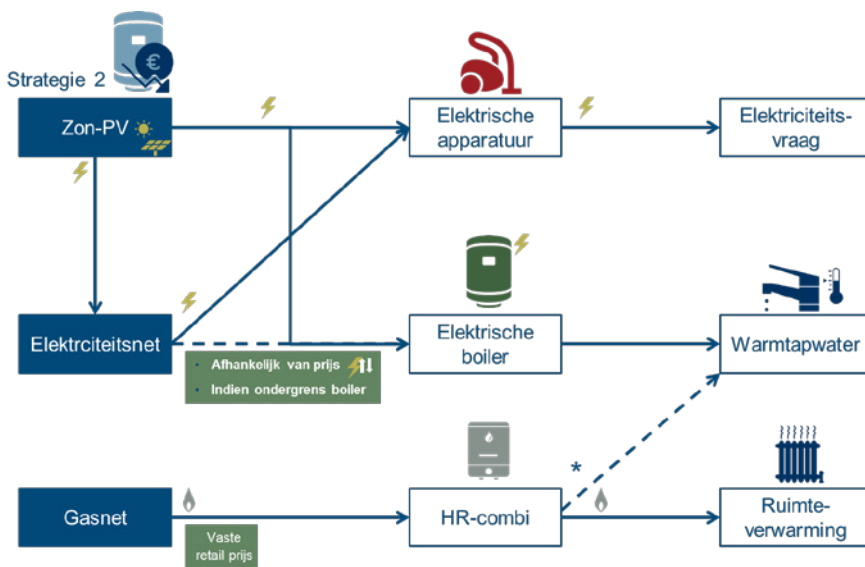


Figuur 2.1. Schematische weergave strategie 1 (\* technische configuratie 2)



### Strategie 2: Flexibiliteits-dienstverlening

In deze strategie gaat een huishouden een overeenkomst aan met een energiedienstverlenancier die ook wel als een “flex-aggregator” kan worden gezien. De energiedienstverlenancier optimaliseert gelijktijdig de opbrengst van de zonnestroom en de kosten van het laden van de boiler met elektriciteit van het net (voor het deel van de elektriciteitsvraag die niet met zon-PV kan worden ingevuld). De energiedienstverlenancier bepaalt of het surplus aan zon-PV wordt opgeslagen in de vorm van warm tapwater, dan wel wordt ingevoerd en wordt aangeboden aan de markt. Voor het reduceren van de kosten van de elektriciteit van het net wordt de elektriciteit slim ingekocht op momenten dat deze goedkoop is. Op de onbalansmarkt is elektriciteit zelfs af en toe tegen zeer lage of negatieve kosten te betrekken. Een schematische weergave van deze strategie is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 2.2. Schematische weergave strategie 2 (\* technische configuratie 2)

Voor wat betreft de uitgangspunten voor tapwatertemperaturen en opgestelde vermogens per huishouden zijn dezelfde uitgangspunten gehanteerd als in strategie 1. Waar in strategie 1 stroom van het net wordt betrokken zonder rekening te houden met de spotprijs, wordt in strategie 2 slim gekeken naar de prijzen op de APX spotmarkt (2023) en er wordt rekening gehouden met de mogelijkheden om volumes in te kopen en te verkopen via de onbalansmarkt, waarbij de flex-dienstverlener reageert op het onbalans systeemsignaal van TenneT.

Een enkele zon-PV boiler zoals gesimuleerd is niet betekenisvol voor een flex-dienstverlenancier. Te denken is aan enkele duizenden huishoudens, zodat een vermogen van enkele MW beschikbaar is.

De mogelijkheden van dit systeem om ook aan andere dimensies van mogelijke flexibiliteitsbehoefte (grid support) iets bij te dragen zijn niet onderzocht.



# 3. Simulaties

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de simulatie van de slimme elektrische boiler is uitgevoerd en wat de resultaten zijn, in termen van benutte energie. Deze resultaten worden gevisualiseerd.

## 3.1 Simulaties van de slimme elektrische boiler

De simulaties van de slimme E-boiler in de context van een typisch huishouden zijn uitgevoerd in een door EXE ontwikkelde simulatieomgeving (Matlab Simulink). Het onderstaande tekstkader behandelt de meest belangrijke aspecten van dit simulatiemodel.

### Simulatieomgeving EXE

#### Toelichting simulatie

In het model wordt de boiler gekoppeld aan de marktprijzen van elektriciteit. Voor elk kwartier van het jaar wordt berekend wat de afname of invoeding uit het elektriciteitsnet is. Hieruit volgen per kwartier de kosten en opbrengsten uit de elektriciteitsmarkten. Om de invloed van belastingen te verwerken is er in de economische analyse H4 een nacalculatie gedaan die gas- en elektriciteitsprijzen inclusief belastingen vergelijkt. Technische configuratie 2, de hybride opstelling (e-boiler gecombineerd met HR-ketel), is niet terug te zien in de resultaten van de simulatie maar wel in de economische analyse. Hierbij wordt gas ingezet wanneer dit gunstiger is dan elektriciteit.

#### Input

APX prijzen zijn gesimuleerd voor 2023 (CE Delft, PowerFlex Sim2, zie bijlage 1). Onbalansprijzen laten zich slecht voorspellen, waardoor echte onbalansprijzen uit 2014 zijn gebruikt. De gasprijs is ook gebaseerd op de PowerFlex Sim2 simulatie van CE Delft. Voor de berekeningen zijn energieprijzen voor kolen, gas en CO<sub>2</sub> belangrijke inputs; deze zijn in simulatie 1 en 2 als volgt gekozen:

		SIMULATIE 1	SIMULATIE 2
Kolen	€/GJ	€ 2,80	€ 2,26
Gas	€/MWh	€ 25,00	€ 35,00
EU ETS	€/t CO <sub>2</sub>	€ 15,00	€ 30,00

Energiebelastingen zijn niet meegenomen in de simulatie maar wel in de nacalculatie in de economische analyse. De volledige lijst input waarden voor het model is te vinden in bijlage 2.

*Logica*

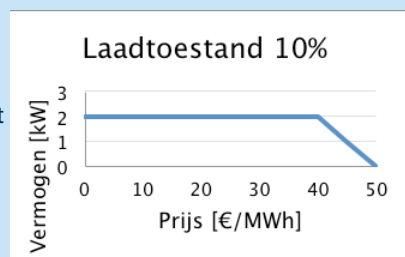
De simulatie is gebaseerd op PowerMatcher <sup>5</sup> technologie, waarbij een apparaat zijn flexibiliteit uitdrukt in een biedcurve: het apparaat geeft aan wat het bereid is te verbruiken tegen welke prijs (meer details verder in dit tekstvak). Dit wordt afgezet tegen de geldende marktprijzen, waardoor een ‘interne evenwichtsprijs’ ontstaat in het ‘e-boiler – markt systeem’. De marktprijzen hebben hierbij de overhand, omdat marktvolumes vele malen groter zijn dan het verbruik van één verbruiker. Is de prijs die de e-boiler bereid is te betalen voor energie hoger dan de ‘interne evenwichtsprijs’, dan zal de e-boiler energie afnemen. Is de ‘interne evenwichtsprijs’ echter hoger dan de prijs die de e-boiler bereid is te betalen, dan zal de e-boiler ook geen energie afnemen.

Het model voor strategie 2 werkt met een ‘standaard’ verbruiks/opwek profiel, dat vervolgens in de tijd verschoven wordt aan de hand van de marktprijzen en beschikbare flexibiliteit. Het standaard verbruiks/opwek profiel wordt in dit geval gevormd door de resultaten van strategie 1. In de simulatie wordt dit gedaan door de volumes die de APX aanbiedt te baseren op de resultaten van strategie 1. Onbalansprijzen worden met een groot volume aangeboden, waardoor de e-boiler altijd reageert op de onbalansprijs als zijn eigen biedladder het toestaat.

Invoeding van het net wordt bepaald door de laadtoestand van de boiler en prijzen van de afgelopen 24 uur. Hoe ‘voller’ de boiler is, hoe lager de prijs moet zijn om te laden. Andersom geldt: hoe ‘leger’ de boiler, hoe hoger de prijs kan zijn om te laden. Ter illustratie worden drie (voorbeeld) biedcurves van de e-boiler getoond. Het bepalen van lage en hoge prijzen gebeurt dynamisch. Op elk moment in de simulatie wordt er gekeken naar de prijzen van de afgelopen 24 uur. Omdat de simulatie op kwartierbasis is, zijn dit 96 waarden. Aan de linkerkant worden (een deel van) de gesorteerde ‘interne evenwichtsprijzen’ van de afgelopen 24 uur getoond. Aan de rechterkant staat de daaruit volgende biedcurve.

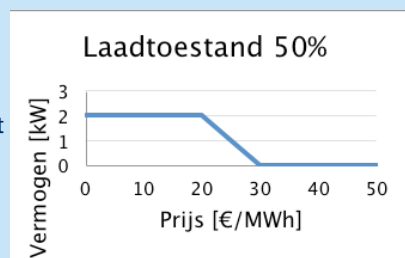
...	87	88	89	90	...
...	44,49	45,27	45,33	46,56	...

Omdat de boiler voor 90% leeg is, wordt de biedcurve gebaseerd op de prijs die overeenkomt met 0,9\*96 in de lijst met ‘interne evenwichtsprijzen’. De boiler is bereid om tot €50 energie in te kopen.



...	46	47	48	49	...
...	22,24	23,12	24,66	26,01	...

Omdat de boiler voor 50% leeg is, wordt de biedcurve gebaseerd op de prijs die overeenkomt met 0,5\*96 in de lijst met ‘interne evenwichtsprijzen’. De boiler is bereid om tot €30 energie in te kopen.

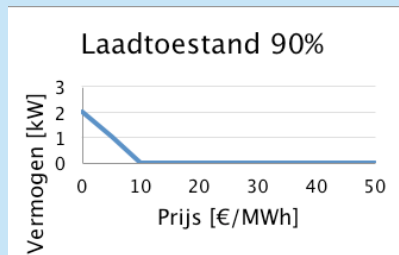


<sup>5</sup> Voor uitgebreide documentatie zie <http://flexiblepower.github.io/>

...	7	8	9	10	...
...	3,81	4,54	6,01	6,83	...

De boiler is nu bijna vol. De biedcurve wordt nu gebaseerd op de prijs die overeenkomt met  $0,1 \cdot 96$  in de lijst met 'interne evenwichtsprijzen'.

De boiler is bereid om tot €10 energie in te kopen.



### Aandachtspunten

Van invloed op de resultaten zijn de aanwezigheid van de resultaten van strategie 1 en de volledige prijskennis van de onbalansprijzen. In de simulatie bepalen de resultaten van strategie 1 grotendeels het gedrag van de APX markt (de aangeboden volumes). De onbalansprijzen zijn in werkelijkheid niet (volledig) bekend tijdens het kwartier waarvoor ze gelden. Doordat er in het model wel sprake is van volledige prijskennis kan er ieder kwartier een optimale keuze worden gemaakt. Dit is vergeleken met de realiteit te optimistisch.

Het simulatiemodel kan niet vooruit kijken. In de praktijk is het mogelijk om vooral APX prijzen goed in te schatten voor een hele dag. Dit maakt het mogelijk om van tevoren inkoop te optimaliseren over de dag. Hoewel beperkt, kan er ook voor onbalansprijzen een schatting gemaakt worden op korte termijn. Deze optimalisatiemogelijkheid is in het model niet meegenomen, dit is vergeleken met de realiteit dus pessimistisch. Al met al is de gekozen handelsstrategie redelijk naïef, maar wordt er wel gewerkt met meer kennis van prijzen dan in het echt mogelijk is.

Belastingtarieven en de gasprijs zijn meegenomen in een nacalculatie. Dit heeft tot gevolg gehad dat in de hybride opstelling meer PV stroom is teruggeleverd dan gunstig is wanneer de belastingen meegenomen worden.

### Gevoeligheden

Vanwege het grote aantal variabelen in de simulatie zijn er nog meerdere gevoeligheden waarvan het effect niet onderzocht is. Deze zijn:

- Gekozen handelsstrategie:
- Onzekerheden marktprijzen
- Belastingtarieven
- Volume boiler
- Minimum comfortniveau (aantal douchebeurten)
- Aantal zonnepanelen
- Overig elektriciteitsverbruik huis
- Totale vraag warm tapwater
- Profiel van warmtapwatervraag

Bij de berekeningen zijn voor de boiler en PV-installatie de volgende uitgangspunten gebruikt als input<sup>6</sup>:

Volume boiler	195 liter
Maximaal vermogen boiler	2kW
PV-panelen	2 kWp

Het volume van de boiler is gekozen op basis van een gemiddeld huishouden in Nederland. Daarnaast kan een type boiler met deze boilerinhoud breed worden toegepast in verschillende woningtypes. Het maximale vermogen dat deze boiler kan absorberen is 2 kW, ongeveer gelijk aan de piekproductie van de gekozen PV installatie. Uitgaande van een temperatuurtraject van 13 tot 64 °C is gerekend met een hoeveelheid energie van 11,5 kWh die in de E-boiler kan worden opgeslagen, maar als de E-boiler al warmer is, is dat natuurlijk geringer (er is zeker niet alle momenten 11,5 kWh aan opslagcapaciteit voorhanden). In de simulatie hebben we aangenomen dat de boiler op deellast kan worden bedreven zodat er continu kan worden ontladen of geladen in een tempo dat het bijvoorbeeld mogelijk maakt om alleen de ‘overproductie’ van zon-PV te volgen.

Verder is er gekozen voor een woning met een PV- installatie van 8 panelen van 250 Wp per stuk, Dit komt neer op 2kWp in totaal. De productie op jaarbasis bedraagt dan gemiddeld 1908 kWh.

### 3.2 Resultaten

Er zijn verschillende simulaties uitgevoerd voor een viertal warmtapwaterprofielen die voor dit doel gemaakt zijn:

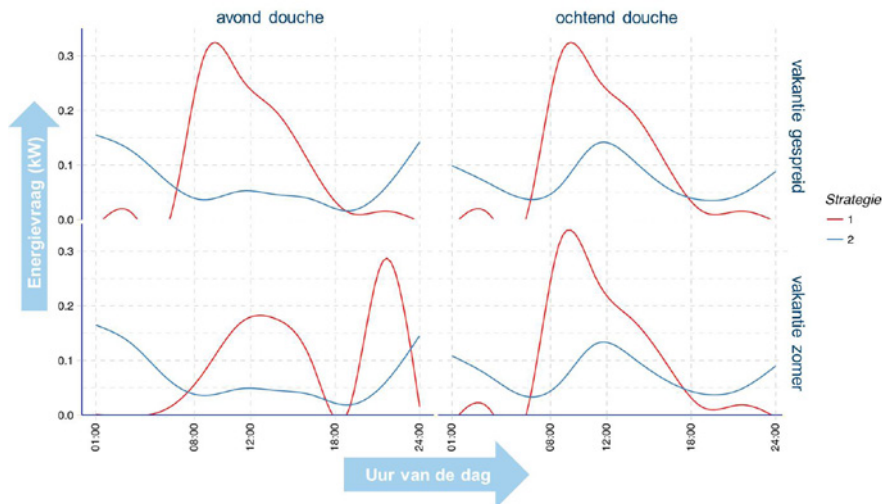
- Vakantie in de zomer, douchen in de ochtend;
- Vakantie in de zomer, douchen in de avond;
- Gespreide vakantie, douchen in de ochtend;
- Gespreide vakantie, douchen in de avond.

Voor de simulaties is gebruik gemaakt van een profiel met één zomervakantie (2 weken) en met gespreide vakanties (twee keer 1 week) over het jaar. Daarnaast is er onderscheidt gemaakt tussen een huishouden met ochtenddouche en een huishouden met avonddouche profiel. Deze verschillende profielen zijn gekozen om een zo compleet mogelijk beeld te geven van de warmtapwatervraag over het jaar heen voor een gemiddeld huishouden.

Energiebelastingen zijn niet meegenomen in de simulatie maar wel in de nacalculatie in de economische analyse.

De simulaties zijn uitgevoerd op basis van technische configuratie 1, dat wil zeggen de E-boiler is verantwoordelijk voor de gehele tapwatervraag. De technische configuratie 2 met gas voor warmtapwater en het effect van energiebelastingen komt terug in de economische analyse in Hoofdstuk 4.

<sup>6</sup> In bijlage 1 staat een compleet overzicht van alle uitgangspunten die zijn gebruikt in de simulatie.



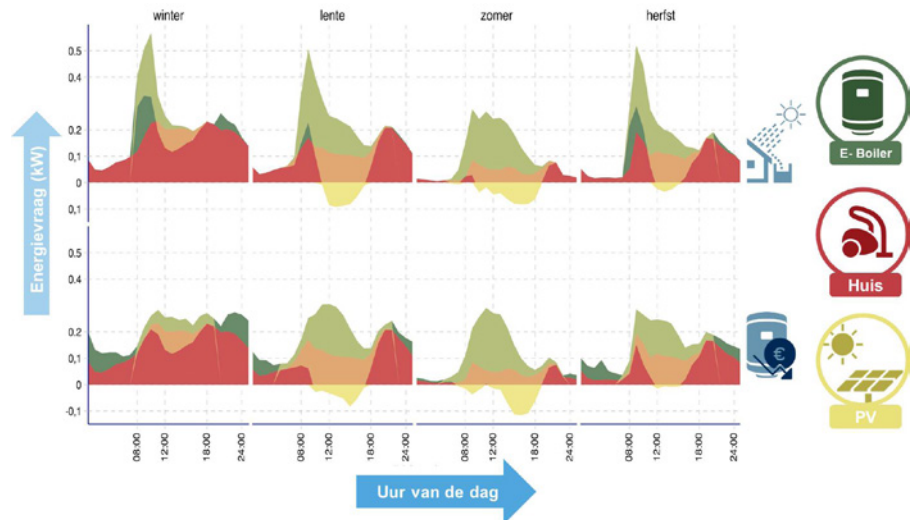
Figuur 3.2. Gemiddelde energievraagprofielen over de dag van de elektrisch boiler, voor de verschillende tapwaterprofielen.

In de bovenstaande figuur wordt op de Y-as het laden van de boiler in kW uitgedrukt en staan op de X-as de uren van een gemiddelde dag. De rode lijn is een weergave van strategie 1 (maximale benutting eigen opwek) en de blauwe lijn van strategie 2 (slimme sturing).

Voor strategie 2, de blauwe lijn, maakt het vakantiegedrag niet veel uit voor het energievraagprofiel van de boiler. Voor strategie 1, de rode lijn, is er voor de ochtend-douche geen verschil tussen het soort vakanties. In het avond-douche profiel maakt het wel veel uit of gespreid, of in de zomer op vakantie wordt gegaan. Gemiddeld is er in het 2<sup>e</sup> geval een avond-piek, dus de boiler laadt met net-stroom als er geen zon-PV opbrengst is. Dit kan worden verklaard doordat in de zomervakantie de boiler veelal maximaal is geladen zonder dat hier gebruik van wordt gemaakt. Er zijn geen douchebeurten die de boiler gedurende deze vakantie leeg halen, maar er is wel veel zonne-energie beschikbaar. Voor de gespreide vakantie doet dit fenomeen zich in mindere mate voor. Door de tapwatervraag in de zomer bij een gespreide vakantie, vraagt de boiler energie, die is veelal ook beschikbaar in de vorm van zonne-energie die de volgende dag geladen gaat worden. Dit is terug te zien in de hogere piek voor de gespreide vakantie. Voor de ochtend douche is de dagpiek te verklaren door de tapwatervraag in de ochtend die energie uit de boiler onttrekt en ervoor zorgt dat de boiler daarna weer geladen kan worden met zonne-energie in de middag.

Strategie 2 laat een duidelijk verschil zien tussen de avond en ochtend douche profielen. Dit heeft zowel met de elektriciteitsprijs als met de beschikbare zonne-energie te maken. Vanwege de voordelige elektriciteitsprijzen kiest de slimme sturing hiervoor een lagere benutting van de eigen zonnestroom en laadt de boiler met goedkope energie in de avond.

Voor het verder inzichtelijk maken van het energieverbruik voor de twee aanstuurstrategieën is gebruik gemaakt van een *gespreide vakantie met ochtend douche*. Resultaten met betrekking tot het eindverbruik worden in de volgende figuur weergegeven.



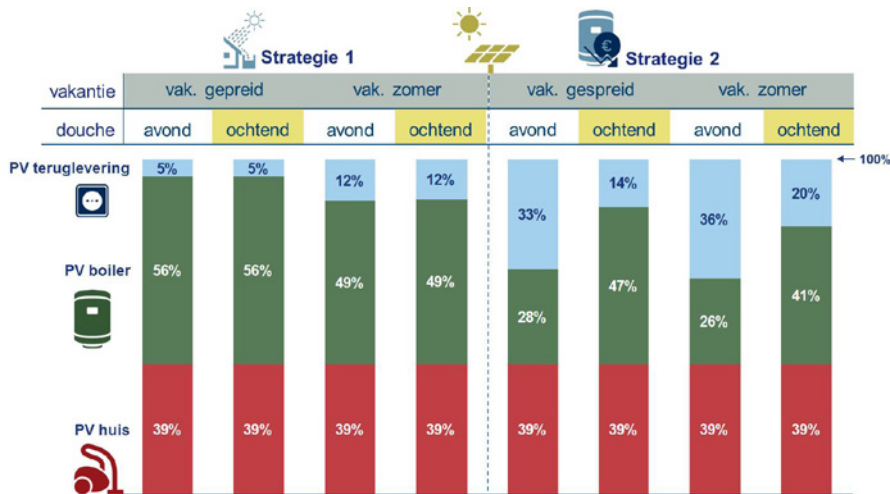
*Figuur 3.3. Seizoensgemiddelde dagprofiel van het energieverbruik (inclusief PV productie) voor gespreide vakantie en ochtend douche.*

Op de Y-as staat de energievraag/productie in kW, op de X-as staat het uur van de dag voor de verschillende seizoenen. De bovenste rij laat strategie 1 zien zonder prijssturing, op de tweede rij staan de resultaten van strategie 2 wel op basis van prijssturing. In groen is de energievraag van de boiler weergegeven, in rood het overige elektriciteitsverbruik van het huishouden en in geel de productie van de zon-PV installatie. Deze is negatief geplot om te laten zien hoe de energievraag van boiler en huishouden met zon-PV kan worden bediend.

Zichtbaar in de dagprofielen, door de seizoenen heen voor de verschillende strategieën, is dat bij strategie 1 met maximale benutting van eigen zon-PV er een sterke ochtendpiek van de boiler zichtbaar is. Dit wordt veroorzaakt door de warmtapwaterverraag tijdens de ochtenddouche. In tegenstelling tot strategie 2, waarbij de boiler tijdens de nacht voldoende is geladen door slimme sturing om deze warmtapwaterverraag in de ochtend op te vangen met de gebufferde energie. Het verschil is zowel zichtbaar in de winter alsmede in de lente en herfst. In de zomer is te zien dat de piek voor beide strategieën ondervangen wordt door directe utilisatie van zon-PV (zie bijlage 2, figuur 1 en 2: koudste en warmste dag voor de extremen).

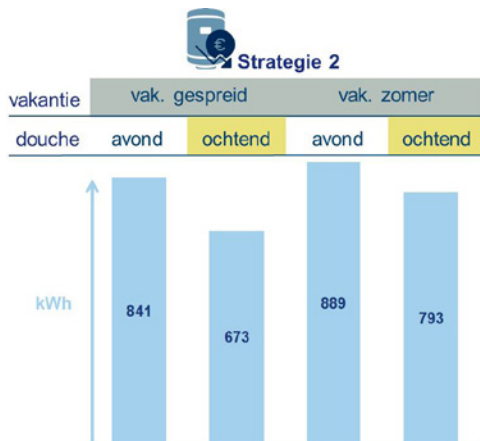
Verder laat bovenstaand figuur zien dat bij strategie 2 er midden in de nacht meer energie afgenomen wordt vanwege de lage prijzen. Prijssturing met een elektrische boiler lijkt een duidelijk effect te hebben op het energieverbruik van het huishouden. Door de anticiperende werking van slimme sturing wordt er bij strategie 2 meer energie terug aan het net geleverd. Dit is duidelijk te zien in het volgende figuur.





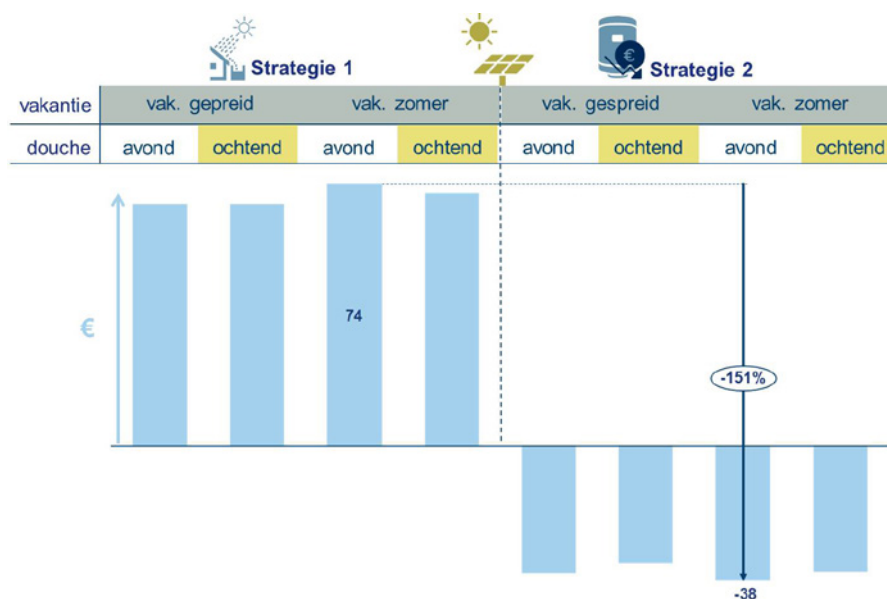
Figuur 3.4. Benutting van zonne-energie voor de boiler, huis of teruglevering in procenten, voor de verschillende tapwatervraagprofielen.

Bovenstaande figuur laat de benutting van zonne-energie zien voor de twee aanstuurstrategieën en de verschillende vraagprofielen, in procenten van de jaarlijkse opbrengst van de zon-PV installatie. Zichtbaar is dat bij strategie 1 in het geval van een gespreide vakantie de eigen opwekking uit zon-PV voor 95% wordt benut. Dit is 88% in het geval van het zomervakantieprofiel. De oorzaak hiervoor is de hogere benutting van beschikbare zon-PV in de zomer. Strategie 2 laat een stuk lagere benutting zien door het sturen op prijzen, zo'n 64 tot 86 procent benutting. Er wordt dus meer zon-PV ingevoerd in het net, omdat dit in de simulatie voordelig is.



Figuur 3.5. Benutting van de onbalansmarkt in kWh.

Door slimme sturing van de E-boiler bij strategie 2, is er tussen de 673 en 889 kWh op de onbalansmarkt verhandeld. Dit laat benutting van flexibiliteit die de E-boiler biedt zien in termen van handel op de onbalansmarkt op gunstige momenten zoals in de avond (figuur 3.5). Vooral bij avond douche is er een hogere benutting van de onbalansmarkt, de boiler zal namelijk na de avond douche weer laden. Dit is ook een moment van over het algemeen lagere prijzen op de onbalansmarkt (zie bijlage 3, figuur 3).



*Figuur 3.6. Kale energiekosten zonder energiebelastingen en ODE voor de E-boiler, voor de verschillende tapwatervraagprofielen.*

Bovenstaand figuur laat de kale elektriciteitskosten (zonder belastingen en toeslagen) zien voor de E-boiler. Er is weinig tot vrijwel geen verschil tussen vakantieprofielen terug te zien. Er is wel bij strategie 2 een verschil waarneembaar tussen ochtenddouches of avonddouches. Waarbij er met een avonddouches ritme iets meer te verdienen valt door slimme sturing op basis van prijzen op de onbalans, zie figuur 3.6. Een goede verklaring hiervoor is dat de landelijke energievraag in de ochtend over het algemeen hoger ligt en het dan dus kostbaarder is om elektriciteit te gebruiken. Verschuiving van energie uit de nacht naar de ochtend door inzet van de boiler vangt dit voor een gedeelte op.

De belangrijkste observaties ten aanzien van de resultaten zijn hieronder nog eens kort weergegeven:

- Voor strategie 2 zijn verschillen in het dagprofiel van de boiler te zien voor ochtend- of avonddouches te verklaren door inkopen op de onbalans bij avonddouches en benutting van eigen zon-PV bij ochtenddouches.
- Bij een zomervakantieprofiel wordt er minder zonne-energie benut door de boiler en dus meer terug geleverd.
- Prijssturing met een E-boiler lijkt een duidelijk effect te hebben op het energieverbruik en profiel van het huishouden.
- 56% extra zon-PV opbrengst kan worden “opgevangen” in de E-boiler
- In de simulaties is er tot een maximum van 889 kWh aan elektriciteit op de onbalansmarkt verhandeld.
- Kale energiekosten zonder belastingen zijn voor de eindgebruiker bij slimme prijssturing (strategie 2) significant lager.

De resultaten van de simulatie zijn zonder energiebelasting, ODE en gas voor warmtapwater. In de hierop volgende economische analyse is er een nacalculatie gedaan waarbij energiebelastingen, ODE en gas voor warmtapwater wel zijn toegevoegd. Op deze manier is het potentieel van slimme sturing voor de toekomst inzichtelijk gemaakt en geeft de economische analyse een realistisch beeld van de nabije toekomst.

# 4. Economische analyse

In hoofdstuk 3 zijn de observaties uit de simulaties behandeld, in dit hoofdstuk behandelen we of hier al dan niet een goede business case mee valt te maken.

Voor de economische analyse zijn de kosten en de opbrengsten van belang. De installatiekosten van de elektrische boiler zullen in de praktijk nogal uiteenlopen. Het gaat om betrekkelijk eenvoudige technologie. Het apparaat zelf kost vanaf ca. € 300-500, maar daar komen nog installatiekosten bij. De levensduur is minimaal 10-15 jaar. We zullen geen volledige business case opstellen, maar aanhouden dat als er een financieel voordeel van meer dan € 100 per jaar ontstaat, dat we dan een goede business case verwachten. Dit doen we aan de hand van de energierekening van een typische eindgebruiker: hoe komt deze eruit te zien voor de twee strategieën die zijn gesimuleerd (maximale benutting eigen opwek en flexibiliteitsdienstverlening).

Ter inleiding behandelen we eerst de ‘normale’ energierekening, zonder zon-PV. Aansluitend behandelen we de effecten van de strategieën: eigen opwek zoveel mogelijk benutten (strategie 1) of “slim” inspelen op de energiemarkten (strategie 2). Hierbij behandelen we zowel de configuratie waarbij alle warmtapwater vraag met de E-boiler wordt verzorgd en de configuratie waar de E-boiler in serie wordt geschakeld met een reeds aanwezige HR-combiketel, zodat een deel van de warmtapwater vraag met gas wordt ingevuld.

De economische analyse is uitgevoerd voor de simulatieresultaten die horen bij het tapwater vraagprofiel “gespreide vakantie met ochtend-douche”. Die resultaten laten zien dat onder strategie 2 de meeste zon-PV in de boiler wordt gebruikt en het minste wordt teruggeleverd.

In de economische analyse zal blijken dat de rentabiliteit sterk afhankelijk is van de energiebelastingtarieven en terugleververgoeding, waardoor we voor verschuivingen in de relatieve hoogtes van tarieven een gevoeligheidsanalyse uitvoeren en laten zien hoe de rentabiliteit wordt beïnvloedt. De gekozen dimensionering van de PV-installatie en opbrengst is een redelijke, maar beïnvloedt ook sterk de rentabiliteit. Daarom reken we ook “andersom” terug: hoeveel zonnestroom moet worden benut in een e-boiler om van een rendabele business case te kunnen spreken.

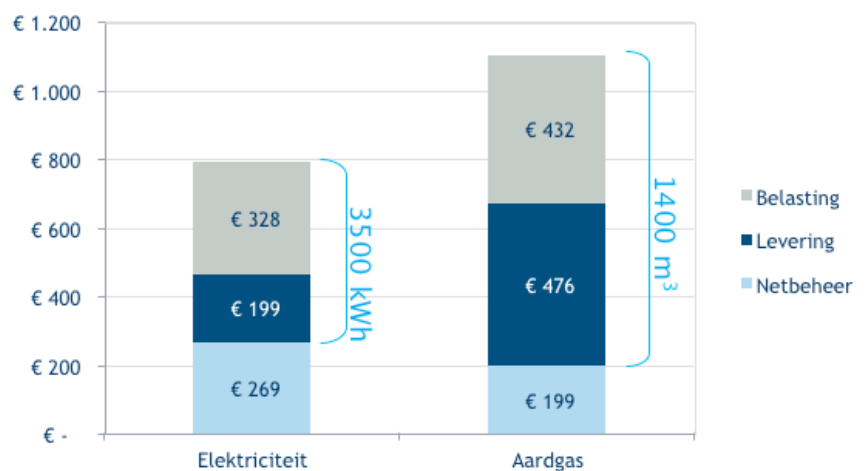
Als kader voor de analyse hanteren we de tarieven en regulering die anno 2016 gelden, met als uitzondering de salderingsregelingsregeling. Het volgende kader bevat de belangrijkste gegevens (exclusief BTW).

<p><b>Leveringstarief energie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektriciteit: € 0,057 per kWh</li> <li>• Gas: 0,34 €/m<sup>3</sup></li> </ul> <p><b>Belastingen en heffingen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energiebelasting             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektriciteit € 0,1007 per kWh</li> <li>- Gas € 0,25168 per m<sup>3</sup></li> </ul> </li> <li>• Heffingskorting energiebelasting: € 310,81</li> <li>• Opslag duurzame energie:             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektriciteit € 0,0056 per kWh</li> <li>- Gas € 0,0113 per m<sup>3</sup></li> </ul> </li> <li>• BTW-percentage: 21 %</li> </ul>	<p><b>Netbeheerskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektriciteit € 268,75 per jaar</li> <li>• Gas € 198,81 per jaar</li> </ul> <p><b>Rendement opwekking van warm tapwater</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrisch 100%</li> <li>• Aardgas 74%, op LHV basis<sup>7</sup>.</li> </ul>
--	---

*Tarieven en parameters voor de berekening*

**4.1 Opbouw van de energierekening**

De meeste woningen zijn tegenwoordig voorzien van zowel een elektriciteits- als een gasaansluiting. De energierekening van bestaat dan uit twee onderdelen; elektriciteit en gas. *Figuur 4.1* laat voor een huishouden, met een elektriciteitsgebruik van 3500 kWh/jaar en een gasverbruik van 1400 m<sup>3</sup>/jaar, een typische opbouw van de energierekening zien.



*Figuur 4.1. Opbouw energierekening 2016 (3500 kWh en 1400 m<sup>3</sup>, incl. BTW)*

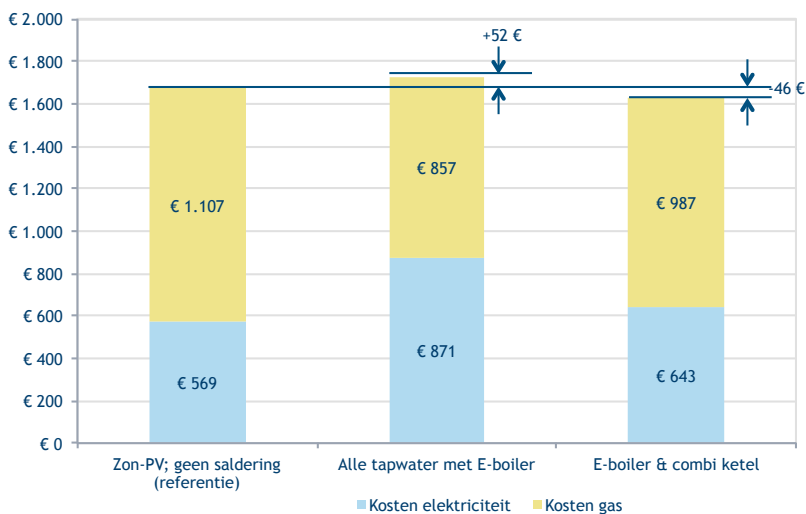
De kosten op de energierekening zijn die voor de energie zelf (levering, eventueel met regiotoeslag), verschillende vormen van belastingen en heffingen, en kosten voor het beheer van de netten. Die laatste zijn *vaste kosten*, voor een kleinverbruikersaansluiting (tot 3x80A) hangen deze alleen af van de capaciteit van de aansluiting. Leveringskosten en belastingen, zijn *variabele kosten*, wat betekent dat de energierekening daalt als men minder energie gebruikt. Dit geeft een prikkel om energiebesparende maatregelen te nemen, maar is ook de reden dat zon-PV een rendabele business case heeft.

<sup>7</sup> Het praktijkrendement wisselt sterk door stilstandsverliezen die erg samenhangen met het profiel van het tapwatergebruik. Er is met een gemiddeld rendement gewerkt.

Belastingen zijn het grootste onderdeel van de gemiddelde rekening. Naast de BTW (21%) is er de regulerende energiebelasting en de ondersteuning voor duurzame energie. De tarieven zijn in het kader (tarieven en parameters voor de berekening) weergegeven. Het tekstkader in de inleiding (Hoofdstuk 1) beschrijft actuele ontwikkelingen in de energiebelastingen die erg belangrijk zijn voor de elektrische boiler.

#### 4.2 Resultaten voor Strategie 1 - maximale benutting eigen opwek

Strategie 1 gaat uit van het maximaliseren van eigen consumptie van de zelf opgewekte zonnestroom met behulp van de elektrische boiler. Hiervoor zijn twee technische configuraties mogelijk. De e-boiler kan zo aangesloten worden dat alle energie voor warmtapwater uit elektriciteit komt, en de e-boiler kan in serie worden aangesloten met een gas HR-combiketel. In het eerste geval wordt de e-boiler met elektriciteit van het net opgewarmd als er onvoldoende zon-PV is om de boiler warm te houden. Het voordeel is dat de warmtapwatervraag geheel losgekoppeld wordt van aardgas en de cv-installatie. In het andere geval wordt de e-boiler als een soort van voorverwarmer gebruikt, als er onvoldoende zon-PV is dan wordt gas gebruikt om in de behoefte te voorzien. Dit heeft als voordeel dat het goedkoper is omdat gas goedkoper is dan stroom (mede dankzij de energiebelasting tarieven). De resultaten staan hieronder.



Figuur 4.2. Jaarlijkse kosten strategie zelfconsumptie

Wanneer het tapwater volledig elektrisch wordt verwarmd, is er een jaarlijkse besparing op de gaskosten van € 250. De kosten van het elektriciteitsgebruik nemen echter toe met € 302 (waarvan € 126 meer voor levering en €175 meer belasting) omdat de boiler met stroom van het net wordt geladen. Dit leidt onder de streep tot een *kostenverhoging* van € 52.

Wanneer de boiler wordt verwarmd met de stroom van de zon-PV installatie wanneer die overtalig is, maar niet met stroom van het net, dan springt indien nodig de gasgestookte combiketel bij. In dit geval wordt een besparing van € 120 gerealiseerd op gas, maar de elektriciteitsrekening stijgt (ten opzichte van de referentie) met € 74 euro omdat de terugleververgoeding voor de overschotten zon-PV wegvalt. Onder de streep resulteert deze configuratie dus in een besparing van € 46.

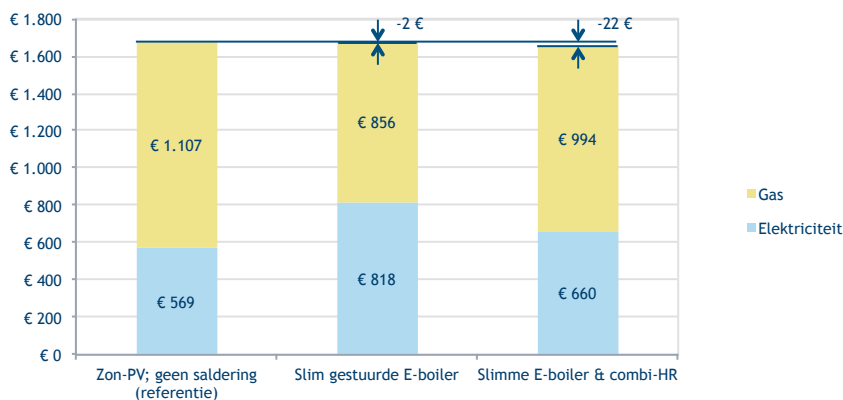
Voor strategie 1 “maximale benutting eigen opwek” kan worden geconcludeerd:

1. Het is bij huidige brandstofkosten en belastingtarieven en de gekozen configuratie (2 kWp installatie met 40% eigeengebruik) niet rendabel om een E-boiler te installeren in een configuratie die de tapwaterfunctie van de combiketel volledig vervangt.
2. In de configuratie van de E-boiler als ‘voorverwarmer’ voor de HR combi-ketel, dan ontstaat een kostenbesparing van €40 ten opzichte van de referentie.

Er zijn mogelijkheden om deze prestaties te verbeteren, bijvoorbeeld door een grotere zon-PV installatie.

### 4.3 Resultaten voor Strategie 2 – slimme sturing

In strategie 2 wordt het laden van de E-boiler gestuurd aan de hand van prijsprikkels die volgen uit de APX- en onbalansmarkt. De beslissing om PV-stroom naar de E-boiler te laten gaan dan wel naar op het net in te voeden wordt dus gestuurd door de momentane prijzen. De eerste configuratie, waarbij de E-boiler de volledige tapwatervraag voor zijn rekening neemt, is niet geoptimaliseerd voor de energiebelastingen, dus hij is puur gesimuleerd op basis van zo goedkoop mogelijk inzetten gedreven door onbalans- en APX (day ahead) prijzen. Omdat dit leidt tot inzet die niet rationeel is gezien de energiebelasting is ook hier de tweede configuratie doorgerekend, waarbij de combi-HR ketel de tapwatervraag verzorgt als de E-boiler niet geladen kan worden met zon-PV of stroom die gunstiger dan gas geprijsd is. Dit voorkomt het inkopen van elektriciteit van het net wanneer dat duurder is dan de inzet van gas.

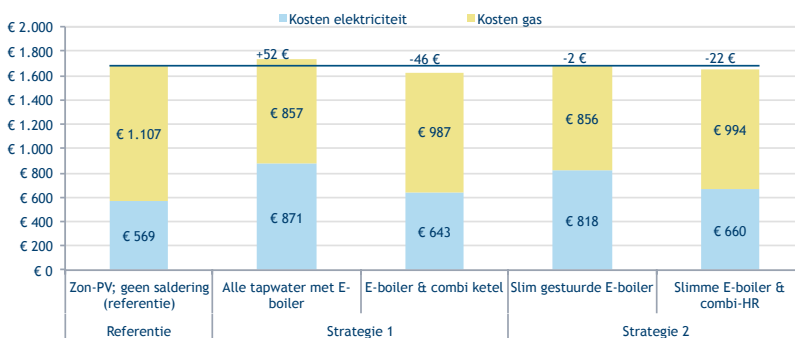


Figuur 4.3. Jaarlijkse kosten strategie 2

In beide configuraties wordt de E-boiler ingezet op momenten dat de prijs voor afregelen gunstig is, waardoor. Daardoor een deel van de energie tegen negatieve kosten geladen (het laden van de boiler levert op basis van de onbalansprijs zelfs geld op). In configuratie 1 (boiler verzorgt de gehele tapwatervraag) wordt de boiler ook op andere momenten geladen, wanneer er wel moet worden betaald, op basis van de APX-prijs. Het algoritme is verder beschreven in paragraaf 3.2.

- In de eerste configuratie wordt de helft van het overblijvende aantal benodigde kilowatturen (na de inzet van zon-PV) via de onbalansmarkt betrokken tegen negatieve kosten (opbrengsten) van -€ 18, de andere helft loopt via inkoop op APX, voor €29. (Beide bedragen exclusief belastingen). De gaskosten dalen ten opzichte van de referentie met €250 (naar beneden afgerond); de elektriciteitskosten stijgen met €249 (naar boven afgerond) wat resulteert in een positief resultaat van €2 ten opzichte van de referentie case.
- In de tweede configuratie wordt 8% geladen tegen negatieve kosten van €21, er is geen elektriciteitsinkoop via de APX dus de rest van de tapwatervraag die niet met zon-PV wordt verzorgd wordt met aardgas gedaan. In deze configuratie wordt 113 euro bespaard op gas, maar elektriciteitskosten stijgen 91 euro, waardoor onder de streep een besparing van 22 euro overblijft.

In de onderstaande figuur 4.4 staan alle opties naast elkaar.



Figuur 4.4. Totale kosten verschillende opties.

- Over het relatieve belang van Strategie 2, slimme sturing, kan het volgende worden geconcludeerd:
- Als de tapwatervraag puur elektrisch wordt verzorgd en de inzet van de elektrische boiler wordt puur op de APX spot en onbalansmarkt bedreven, dan ontstaan er verdiensten in de levering van energie, maar de belastingen zorgen ervoor dat er geen netto verdiensten meer zijn
- Als de inzet wordt veranderd in een 'voorverwarmer' voor een gas-combiketel, en er alleen elektriciteit van het net getrokken wordt als de elektriciteitsprijs inclusief belastingen lager is dan de gasprijs inclusief belastingen en correcties voor het rendement, dan ontstaat een nettobesparing van ca 22 €. Deze prestatie is iets minder goed dan de optimalisatie voor puur eigenverbruik (strategie 1), omdat in de simulatie het algoritme besluit om meer zon-PV terug te leveren.

- In deze context (algoritmes) en energiebelastingen, is de beste technische configuratie die van de elektrische boiler gekoppeld als een voorverwarmer naast de HR-combiketel. De boiler wordt niet of nauwelijks met stroom van het net geladen, maar alleen met zon-PV stroom. Mogelijke optimalisatie die strategie 2 kan bieden: zon-PV invoeden op net indien de waarde van de zon-PV kWh meer is dan de kosten van de gas-inzet, en toch met netstroom laden indien de elektriciteitsprijs zo laag is dat ook de drempel van het verschil in energiebelasting tussen elektriciteit en gas kan worden geslecht. Wat niet door de e-boiler wordt geleverd, wordt door de combi-ketel geleverd.

#### 4.4 Gevoeligheid voor verschuivingen in belastingtarieven

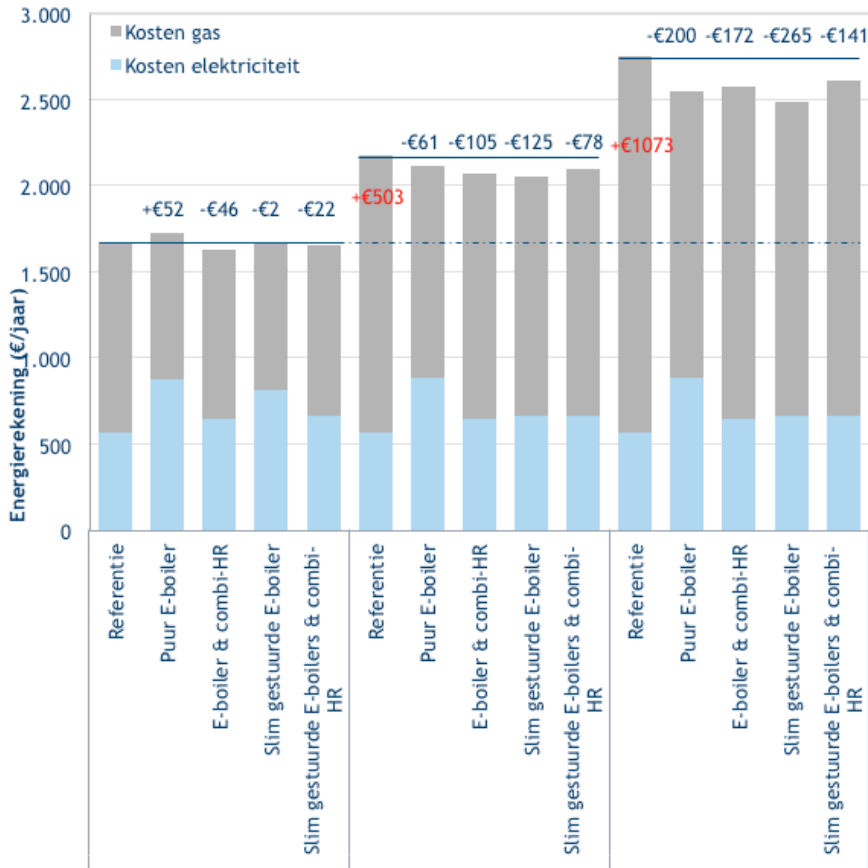
Voorgaand is duidelijk geworden hoe groot de effecten van de belastingtarieven zijn op de business case. De tarieven zijn niet vast en kunnen veranderen, dus voor de tijdshorizon waar deze studie zich op richt, is het nuttig te onderzoeken hoe gevoelig de economische analyse hiervoor is.

We werken als eerste twee varianten uit waarbij we het totaaltarief voor elektriciteit (energiebelasting en ODE) houden op het tarief voor 2016, maar dat voor gas verhogen. Hierbij zijn er twee varianten denkbaar:

- variant A: gelijkwaardig op basis van de CO<sub>2</sub>-intensiteit (totaaltarief voor gas wordt € 0,560/m<sup>3</sup>)
- variant B: gelijkwaardig op basis van de energie-inhoud (totaaltarief voor gas wordt € 0,897/m<sup>3</sup>)

De eerste variant is al een keer door CE uitgezocht<sup>8</sup>, het idee volgt enigszins het 'vervuiler betaalt' principe. De tweede variant is nog niet eerder in beeld gebracht. De resultaten staan in de onderstaande figuur, waarbij wij willen benadrukken dat de inkomenseffecten groot zijn. In deze studie hebben we de inkomenseffecten en de verschillende mogelijke maatregelen om deze te adresseren buiten beschouwing gelaten.



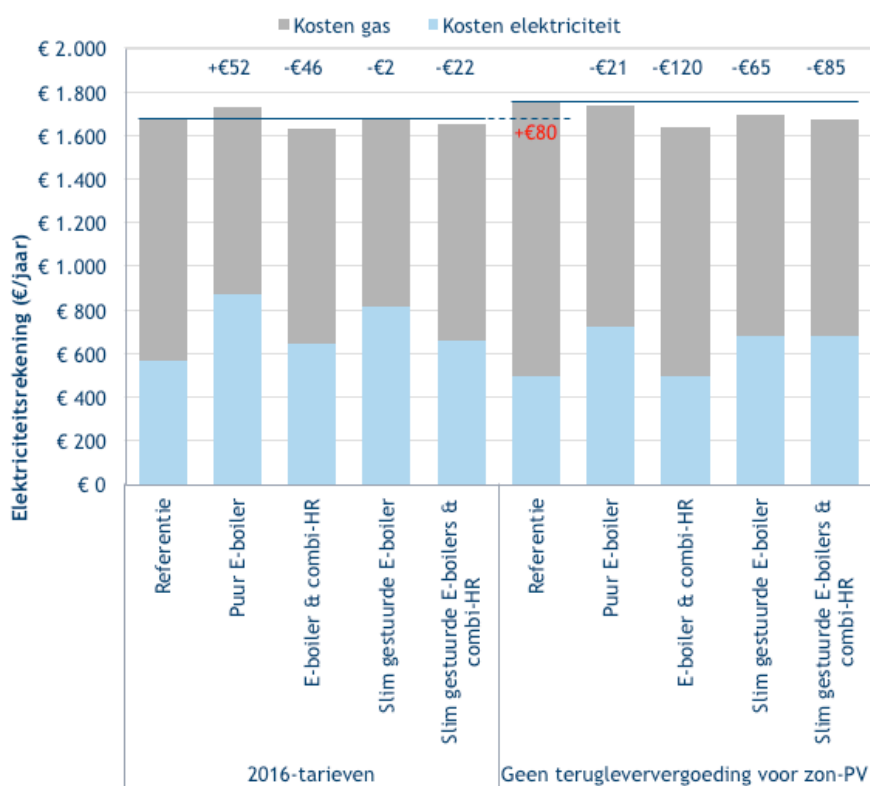


Figuur 4.5 Jaarlijkse kosten met aangepaste belastingtarieven op aardgas

Te zien is dat de simulatie met andere belastingtarieven er nogal anders kan uitzien. Door de toegenomen belasting op gas weegt de besparing op gas door de elektrische boiler zwaar door en zijn alle technische varianten en alle strategieën financieel gunstig, in zowel variant A als B. De slim gestuurde boiler genereert de grootste opbrengst: ca 125 euro per jaar in variant A en in variant B zelfs € 265 op jaarbasis. Een opbrengst van minimaal €100 per jaar is naar verwachting nodig om een goede business case te maken. Hieruit kan geconcludeerd worden dat met andere belastingtarieven er zeker mogelijkheden zijn voor de E-boiler.

#### 4.5 Gevoeligheid voor de terugleververgoeding

In sommige markten ontstaan problemen met de invoeding van zon-PV elektriciteit op het net (Spanje<sup>9</sup>). In toekomstscenario's met een zeer groot opgesteld vermogen aan zon-PV opwekkingscapaciteit ontstaat er op zonnige dagen een aanbod dat de elektriciteitsvraag kan overstijgen. In dergelijke gevallen zal de terugleververgoeding ter discussie komen te staan. Het extreme geval dat er geen terugleververgoeding meer is, is in de onderstaande figuur in beeld gebracht, voor de huidige energiebelastingtarieven. Het verdienmodel voor de E boiler verbetert in alle configuraties met zo'n € 60 in dit geval. In de referentie wordt zo'n 60% van de zon-PV opbrengst teruggeleverd, en deze productie wordt nu echt gratis. De E-boiler kan dit goed gebruiken, en in het geval waar er een combinatie is met de HR-combiketel ontstaat ook bij de huidige overige tarieven ruimte voor een gunstige business case.



Figuur 4.6 Jaarlijkse kosten voor strategie 1 en 2 zonder terugleververgoeding

#### 4.6 Omdenken: hoeveel kWh aan zonnestroom moet worden benut om van een rendabele business case te kunnen spreken?

Om de mogelijkheden van inpassing van een elektrische boiler te bespreken is er een werksessie georganiseerd met een van de fabrikanten van boilers<sup>10</sup>, waar de technische aspecten en de verdienmodellen doorgesproken zijn. In deze werksessie kwam ook naar voren dat - gezien de beperkte investering voor de installatie van een boiler - er een mogelijke business case is bij jaarlijkse variabele opbrengsten boven de reeds genoemde € 100.

9 "Spains government approves the "sun tax", in : PV magazine, 9 nov 2015.  
 10 Utrecht, 12 januari 2016, deelname van 3 medewerkers van Nefit & Bosch.

We zullen ons nu richten op hoe we tot dit bedrag kunnen komen, uitgaande van de huidige (2016) energiebelastingtarieven. Wanneer we eerst bepalen wat de opbrengst is van 1 kWh die niet wordt teruggeleverd, maar wordt benut in een elektrische boiler, dan kunnen we vervolgens bepalen hoeveel kilowattuur op jaarbasis moeten worden benut om € 100 te besparen. Deze exercitie is voor strategie 1 (zoveel mogelijk benutten van eigen opwek).

1 kWh zonnestroom die niet wordt teruggeleverd, maar wordt benut in een elektrische boiler heeft twee inkomsten/kosten-effecten voor de consument:

- Gederfde inkomsten: vanwege minder teruggeleverde energie
- Een besparing op kosten voor aardgas in de HR-ketel.

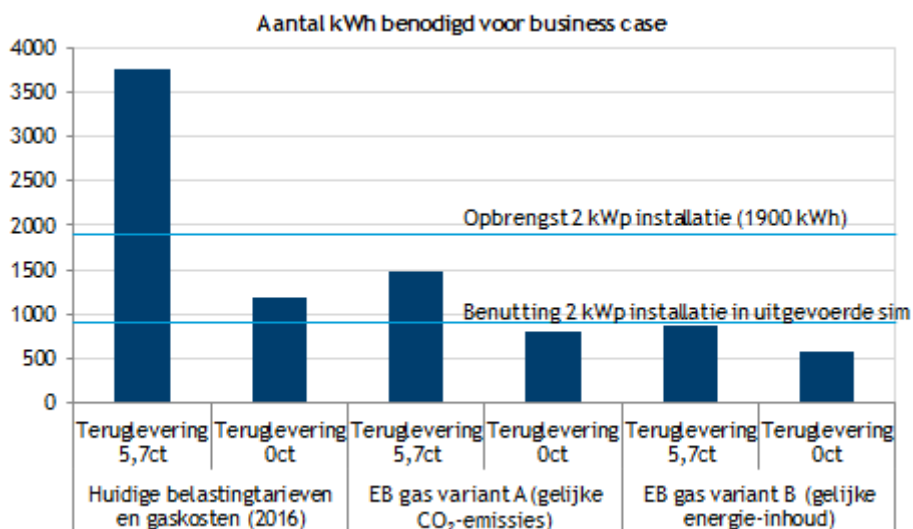
In onderstaande tabel zijn deze effecten gekwantificeerd. Hierbij is uitgegaan van zowel de huidige terugleververgoeding (huidig prijsniveau) als de situatie wanneer er geen terugleververgoeding meer zou zijn. Ook zijn de verschillende varianten voor de aardgasprijs inclusief belastingen opgenomen: (huidige prijzen, belasting cf. variant A - gelijke CO<sub>2</sub>-emissie elektriciteit/gas; resp. variant B - belastingen op basis van gelijke energie-inhoud).

TARIEFSYSTEEM	HUIDIGE BELASTING-TARIEVEN (2016)		VARIANT A (GELIJKE CO <sub>2</sub> -EMISSIONS)		VARIANT B (GELIJKE ENERGIE-INHOUD)	
Totale gasprijs	€ 0,60		€ 0,90		€ 1,24	
Terugleververgoeding	5,7 ct	0,0 ct	5,7 ct	0,0 ct	5,7 ct	0,0 ct
Gederfde inkomsten	5,7 ct	0,0 ct	5,7 ct	0,0 ct	5,7 ct	0,0 ct
Besparing op aardgas	8,4 ct	8,4 ct	12,5 ct	12,5 ct	17,1 ct	17,1 ct
Netto besparing	2,7 ct	8,4 ct	6,8 ct	12,5 ct	11,4 ct	17,1 ct
Aantal kWh benodigd	3757	1197	1475	802	874	583

Toelichting: Als een kWh niet wordt ingevoerd in het net maar wordt omgezet in warmte 'kost' dat bij de huidige belastingtarieven en terugleververgoeding 5,7 €ct aan gederfde inkomsten. Daartegenover staat dat 8,4 ct wordt bespaard op de aardgasinzet (uitgaande van een rendement van 74% op bovenwaarde). Netto is er dus 2,7 ct besparing. Om dat te laten optellen tot 100€/jaar om een boiler terug te verdienen, dient ca 3700 kWh aan zon-PV te worden gebruikt voor warmtetoepassing. Dat is meer dan haalbaar is met een 2 kWp zon-PV systeem.

Het aantal kWh dat benodigd is voor de business case voor de verschillende varianten staat in onderstaande figuur, waarin ook lijnen zijn getrokken bij de gemiddelde jaaropbrengst van een zon-PV installatie van 2 kWp en de benutting die in de uitgevoerde simulatie bleek.

Gezien het feit dat uit de simulaties blijkt dat op basis van een 2 kWpiek systeem op jaarbasis ruim 900 kWh kunnen worden benut in de E-boiler, kan worden gesteld dat er afhankelijk van de ontwikkeling van de energietarieven haalbare business cases denkbaar zijn, zeker bij installaties groter dan 2 kWpiek.



#### 4.6.1 Conclusie

In dit hoofdstuk is de financiële impact van de resultaten uit hoofdstuk 3 geanalyseerd voor eindconsumenten. De energierekening voor een huishouden bestaat uit meerdere componenten. Niet alleen de tarieven die voor energie worden betaald zijn belangrijk, ook de terugleververgoeding en belastingen zijn sterk van invloed op de financiële haalbaarheid. Voor al deze parameters zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

Over de business case zijn de volgende algemene conclusies te trekken:

- Bij de huidige energiebelastingtarieven en huidige terugleververgoeding ontstaat er een kleine 50 euro aan jaarlijks financieel voordeel voor de doorgerekende case. Dit lijkt betrekkelijk gering en voorsnog niet voldoende om grootschalig elektrische boilers te gaan installeren, maar er moet wel worden opgemerkt dat de uitgevoerde case uitgaat van 2 kWp aan zon-PV en bij grotere installaties is het voordeel ook groter.
- Bij veranderingen in de energiebelastingtarieven op elektriciteit en gas tot het niveau van een tarief op basis van gelijke belasting van de CO<sub>2</sub> emissies van de energiedragers, blijkt dat 100-125 euro aan financieel voordeel bestaat, afhankelijk van de regelstrategie (dom/slim).
- Dit voordeel is ook te behalen als de terugleververgoeding voor zon-PV niet meer van toepassing is. Wanneer er geen vergoeding is voor de teruggeleverde zonnestroom verandert de businesscase in positieve zin. Het is echter denkbaar wanneer deze vergoeding 0 is, deze ook had mee moeten worden genomen in het simulatiemodel en het algoritme, en dat de simulatie dit “slimmer” op had moeten lossen.

- Ditzelfde geldt in feite ook voor de energiebelastingstarieven. Bij de start van het onderzoek en de ontwikkeling van het slimme algoritme was bij de onderzoekers nog onvoldoende bekend hoe belangrijk de relatieve tarieven zijn voor wat er onder de streep aan financieel voordeel ontstaat. Dat is nu zeer helder geworden.
- Er is geen conclusie te trekken over of 'slimme aansturing' nu een betere strategie is dan optimaliseren voor de eigen opwek. Er is wel een voordeel van het handelen op de onbalansmarkt gekwantificeerd, echter dit voordeel is betrekkelijk klein in verhouding tot andere tariefcomponenten die van toepassing zijn (energiebelasting, ondersteuning duurzame energie, en terugleververgoeding).

We zien de volgende verbeterpunten:

1. De energierekening kent meerdere componenten.. De simulatie is uitgevoerd op basis van tarieven op de commodity markten en het balanceringsmechanisme, maar de belastingtarieven en terugleververgoeding zijn niet meegenomen in de 'slimheid' van de algoritmes van het model. In een nieuwe versie van het algoritme kan dit beter geïntegreerd worden. De gevoeligheidsanalyses die zijn gepresenteerd zijn gedaan buiten de simulatie om, door de tarieven te variëren.
2. Een tweede interessante vervolgstap is het uitbreiden met de warmtevraag voor ruimteverwarming met warmtepompen om te zien of dit de haalbaarheid van met name het slimme aansturen vergroot. Het is mogelijk dat in een all-electric woning een warmtepomp bijdraagt aan het warmtapwater (voorverwarmt of geheel met WP maken) bovendien levert een warmtepomp een hogere efficiëntie dan een E-boiler met weerstandverwarming, wat de business case ten goede zal komen.

Zolang het salderen blijft bestaan is er geen marktmodel voor de elektrische boiler die met zonnestroom wordt geladen. Ook energie-/flexibiliteitsdiensten die het invoeden van zon-PV proberen te voorkomen, zijn niet levensvatbaar.

Aan de hand van de resultaten die gepresenteerd zijn in dit hoofdstuk kan geconcludeerd worden dat er op dit moment, voorjaar 2016, een bescheiden businesscase lijkt te ontstaan zodra salderen wordt afgeschaft. De berekende 50 euro is nog niet genoeg, maar er zijn situaties denkbaar waar dat meer kan zijn (o.a. grotere installaties). In de toekomst biedt de E-boiler meer mogelijkheden wanneer belastingen en/of terugleververgoeding worden aangepast en kan de investering worden gedekt met opbrengsten van meer dan 100 euro per jaar.



# 5. Verdienmodellen

In dit hoofdstuk behandelen we kort de verdienmodellen die mogelijk zijn bij de eerder besproken strategieën.

## 5.1 Strategie 1 – maximale benutting eigen opwek

In deze strategie is het uitgangspunt dat vanwege het verdwijnen van de salderingsregeling de consument er naar streeft om de zelf opgewekte zonnestroom maximaal zelf te benutten.

### Verdienmodel 1A

Indien de consument al beschikt over een elektrische boiler hoeft deze enkel te investeren in een regeling die zorgt voor het optimaal benutten van zonnestroom. De consument investeert zelf en profiteert zelf maximaal van de baten.

Traditioneel

Hardware



Energie



Consument koopt boiler aan via installateur  
Consument sluit contract met energieleverancier  
Hardware- en energieketen staan volledig los van elkaar

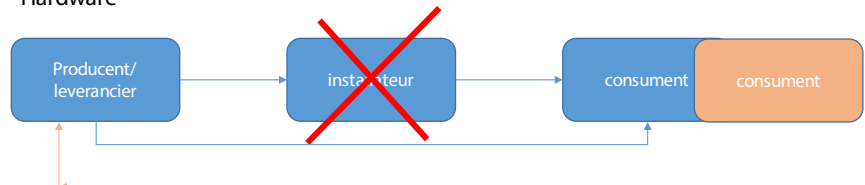
*Verdienmodellen 1B en 1C*

Indien de consument tapwater produceert met een HR-combiketel (en dus niet beschikt over een elektrische boiler), zal een investering nodig zijn in een elektrische boiler en zal deze installatie- en regeltechnisch moeten worden ingepast. De regeling (software) die hiervoor benodigd is zal meer complex zijn naarmate er voor consumenten nieuwe tariefstructuren worden ingevoerd (denk aan Time of Use tarieven). Er zijn nu twee mogelijkheden:

- De consument investeert zelf
- Alle baten komen ten goede van de consument
- De investering wordt gedaan door een energiedienstenleverancier
- Consumenten zien vaak op tegen een investering, ook al is de terugverdientijd kort. Niet alle consumenten beschikken over voldoende liquide middelen. Het is daarom mogelijk aantrekkelijk voor commerciële dienstverleners of producenten van apparatuur om de apparatuur middels huurconstructies aan te bieden.
- De consument betaalt een maandelijks huurbedrag voor de boiler. De marge voor de consument wordt in dit geval kleiner, omdat de energiedienstenleverancier ook een marge dient te maken.

Voorwaartse integratie hardware producent

Hardware



Energie



Hardware producent levert energiedienst aan consument  
 Consument wordt volledig ontzorgd.  
 Integratie hardware en energieketen.

Voorwaartse integratie energieleverancier

Hardware



Energie



Energieleverancier levert energiedienst  
 Consument sluit contract met energieleverancier  
 Integratie hardware- en energieketen



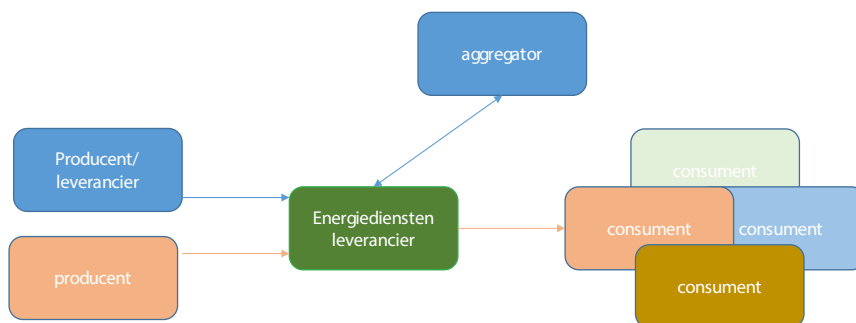
## 5.2 Strategie 2 – slim gestuurde E-boiler

Strategie 2 kenmerkt zich door tussenkomst van een aggregator die kan handelen op de APX-markt en/of de onbalansmarkt. De aggregator heeft behoefte aan flexibel vermogen, en moet voldoende vermogen kunnen aansturen om op een zinnige wijze aan die markten deel te nemen. Dit maakt het nodig om op grotere schaal diensten te kunnen aanbieden en zo het benodigde volume te behalen. Niet alleen kan zo een grotere marge worden behaald per klant uit efficiency voordelen, ook kan door de wet van de grote aantallen een grotere beschikbaarheid van de flexibiliteit die zij aanstuurt gerealiseerd worden.

De aggregator is een energiedienstenverlener. Om consumenten te laten participeren, is het cruciaal dat hij de consument ontzorgt. Er zijn hiervoor verschillende mogelijkheden, in toenemende mate van dienstverlening:

- Ter beschikking stellen van een elektrische boiler en een gegarandeerd tapwater comfort tegen een kostenvoordeel voor de consument (ten opzichte van de situatie waarbij meer wordt teruggeleverd)
- Integreeren van ruimteverwarming.
- Hierdoor verkrijgt de aggregator meer flexibiliteit
- Overnemen van de gehele energiehuishouding tegen een gegarandeerd maximum aan energiekosten.

Nieuwe functie: aggregator



Energieleverancier levert energiedienst aan meerdere consumenten  
 Consument sluit contract met energiedienstenleverancier  
 Energieleverancier kan zelf aggregator functie vervullen, dan wel contract aangaan met partij die aggregator functie vervult

### *Energiedienstenleveranciers*

De volgende partijen kunnen de beschreven energiediensten aanleveren:

- Leveranciers van apparatuur
- Denk aan fabrikanten/leveranciers van ketels, boilers, meet- en regelapparatuur
- Energieleveranciers
- Projectontwikkelaars
- Verhuurders
- Energie coöperaties
- Overige partijen (zuivere esco's)



# 6. Conclusies en vervolgstappen

In dit onderzoek hebben we gekeken naar de haalbaarheid van een E-boiler voor huishoudens, om te functioneren als een buffer om zon-PV invoeding te benutten voor warm tapwaterproductie.

De gedachte is dat straks, als de salderingsregeling minder van toepassing is, er vraag ontstaat naar nieuwe nuttige toepassingen van zon-PV “overschotten” omdat die op momentane basis nog maar weinig waard zijn.

In dit onderzoek, uitgevoerd in een consortium van in totaal 5 partijen, hebben we een exploratieve haalbaarheidsstudie gedaan naar dit concept.

Het is gebleken dat je inderdaad met een kleine elektrische boiler van 195 liter een zeer groot deel van de overschotten zon-PV kunt benutten. We hebben verder twee sturingsalgoritmes toegepast, enerzijds een puur lokale optimalisatie en anderzijds een slimme marktkoppeling. De E-boiler biedt ruimte voor flexibiliteit die op de onbalansmarkt ontsloten zou kunnen worden. Echter sturing op prijzen biedt weinig extra ten opzichte van maximale benutting van het eigen PV vermogen, dit komt door de huidige (2016) verschillen in belastingen tussen gas en elektriciteit.

Het verdienmodel is bij de huidige energiebelastingtarieven voor de gevallen dat de warmtapwatervraag met een HR-combiketel wordt verzorgd, niet heel gunstig (ca 40 euro bruto opbrengst per jaar). Dit kan wel sterk beter worden indien de belastingtarieven op aardgas omhoog gaan. Als de tarieven van de energiebelasting voor aardgas en elektriciteit bijvoorbeeld gelijk gesteld worden op basis van de CO<sub>2</sub> inhoud van de energiedragers, dan zijn er al grote kansen voor een gunstige propositie (ruim meer dan 100 euro bruto-opbrengst per jaar).

Vervolgstappen die nu in beeld zijn:

1. Modelling met aangepast algoritme (effect energiebelasting en bv. nihil terugleververgoeding)
2. Uitbreiding met ruimteverwarming en (hybride)warmtepomp.

In een workshop met Nefit Bosch is aangegeven dat zij verder gaan met de resultaten van het onderzoek. Ook andere boilerfabrikanten zullen we betrekken in de uitkomsten van dit onderzoek.



# Literatuurlijst

Alle links laatst gecontroleerd: 23 maart 2016

- Berenschot, CE Delft, Overview, 2015. De rol van de eindgebruiker in relatie tot systeemintegratie: Advies aan de Topsector Energie. Utrecht: Berenschot, maart 2015. Online beschikbaar: <http://topsectorenergie.nl/wp-content/uploads/2015/04/Systeemintegratie-Eindrapport-Perceel-4-Eindgebruikers-Berenschot-3-april-2015.pdf>
- CE Delft & KYOS (2016, te verschijnen). The POWERFLEX model, scheduling flexibility in short term power markets. Delft: CE (2016, nog te verschijnen)
- CE Delft (2015). Verschuivingen Energiebelasting met extra variant. Delft: CE, Oktober 2015. Online beschikbaar: [http://www.ce.nl/publicatie/verschuivingen\\_energiebelasting\\_verkenning\\_effecten/1647](http://www.ce.nl/publicatie/verschuivingen_energiebelasting_verkenning_effecten/1647)
- ECN & PBL (2015) - Nationale Energieverkenning 2015. Online beschikbaar: <https://www.ecn.nl/nl/energieverkenning/>
- Roselund, C. (2015) Spains government approves the “sun tax”, in : *PV magazine*, 9 nov 2015.. Online beschikbaar: [http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/spains-government-approves-the-sun-tax\\_100021485](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/spains-government-approves-the-sun-tax_100021485)
- Tweede Kamer, Verslag van algemeen overleg voorzienings- en leveringszekerheid energie. Vergaderjaar 2014–2015, 29 023, nr. 177 (23 september 2014). Online beschikbaar: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/kst-29023-177.pdf>



# Bijlagen

## Bijlage 1

In de studie hebben we voor de day ahead markt in 2023 prijzen gebruikt zoals gesimuleerd door PowerFlex<sup>11</sup>. Het model is een geavanceerd marktmodel voor de marginale kosten van elektriciteitsopwekking, die voor ieder uur uit een gesimuleerd jaar de meest economische inzet van centrales berekent. Het is een unit commitment model met dynamische economische dispatch van centrales waarmee nauwkeurige prijssimulaties zijn te maken. Er zijn twee simulaties uitgevoerd voor het jaar 2023, voor strategie 1 en 2 is gebruik gemaakt van simulatie 2:

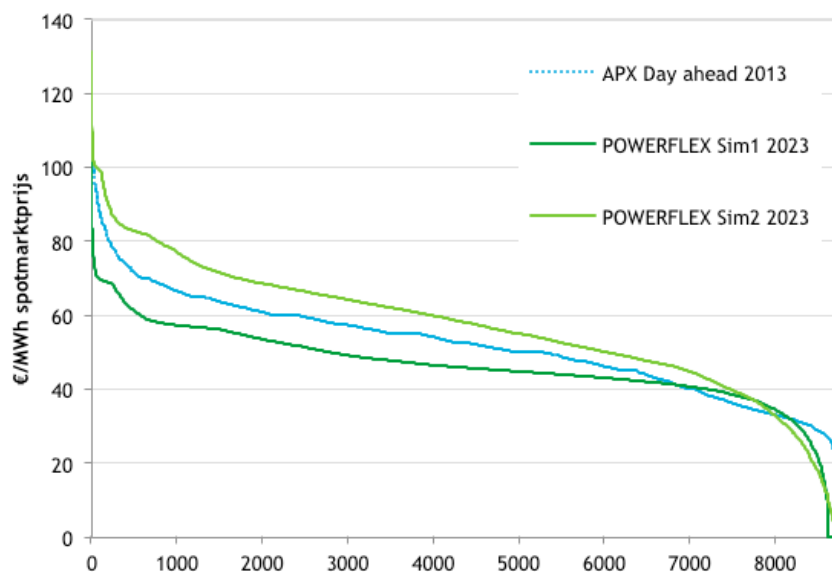
Prijssimulatie 1	Geen groei elektriciteitsvraag, gasprijns gemiddeld, CO <sub>2</sub> -prijs laag, kolen gemiddeld
Prijssimulatie 2	Groei elektriciteitsvraag 0,5% p.j. (2013->2023); hoge gas & CO <sub>2</sub> -prijzen; goedkopere kolen

De scenario's zijn gemaakt met een opgesteld vermogen van hernieuwbaar conform het SER energieakkoord. Voor de berekeningen zijn energieprijzen voor kolen, gas en CO<sub>2</sub> belangrijke inputs; deze zijn in simulatie 1 en 2 als volgt gekozen:

		SIMULATIE 1	SIMULATIE 2
Kolen	€/GJ	€ 2,80	€ 2,26
Gas	€/MWh	€ 25,00	€ 35,00
EU ETS	€/t CO <sub>2</sub>	€ 15,00	€ 30,00

De prijzen zijn als prijsduurkrommes opgenomen in Figuur 1. Te zien is dat in alle scenario's een beperkt aantal uren ontstaan waarbij de gesimuleerde spotprijs lager is dan de gasprijns. Dit is de basis van de inzet van de elektrische boiler. De tweede simulatie ('Sim2') is voor de berekeningen gebruikt, deze is gemaakt voor hoge gasprijzen. In dit scenario is de E-boiler ongeveer 25% van de tijd van het jaar goedkoper dan gas (inclusief rendement, afgezien van energiebelastingen).

<sup>11</sup> Het PowerFlexmodel is een model van CE Delft dat samen is ontwikkeld met KYOS Energy Consulting.



*Figuur 1. Prijsduurkrommes van gerealiseerde en gesimuleerde day ahead prijzen*

Uiteraard zijn dit soort prijssimulaties voor de toekomst onzeker omdat er onderliggend fundamentele onzekerheden zijn in de kosten van kolen, gas, CO<sub>2</sub>, maar ook techniekontwikkeling en beleidskeuzes zijn belangrijk. Het opgesteld vermogen van wind en zon en ontwikkelingen in het productiepark (aantal draaiende kolencentrales en WKK's) beïnvloeden de prijsvorming en de schuivte van de prijsduurcurve sterk. Daarnaast is belangrijk of er nieuwe technieken komen in de sfeer van nieuwe (flexibele) vraag-categorieën, deze nieuwe technieken kunnen bijvoorbeeld de 'staart' van de kromme weer doen stijgen. Verder is goed om te vermelden dat deze prijssimulaties zijn gemaakt met de ontwikkelversie van het model van november 2015 en uitgaan van het productiepark van 2015. Een andere doorkijk in de toekomst biedt de studie 'de rol van de eindgebruiker in relatie tot systeemintegratie'<sup>12</sup>. In dat rapport zijn een aantal 2030 prijsscenario's behandeld die significant méér 'nul-uren' laten zien dan bovenstaande simulaties, hetgeen duidelijk de noodzaak voor het realiseren van technieken zoals slim gestuurde elektrische boilers illustreert. Voor het doorrekenen van business cases geeft het echter een te positief beeld om met honderden (tot duizenden) uren per jaar met 0 €/MWh te rekenen voor de elektriciteitskosten - want er zijn altijd wel kapers op de kust voor goedkope energie, zoals slim gestuurde elektrische boilers.

<sup>12</sup> Berenschot, CE Delft, Overview, 2015

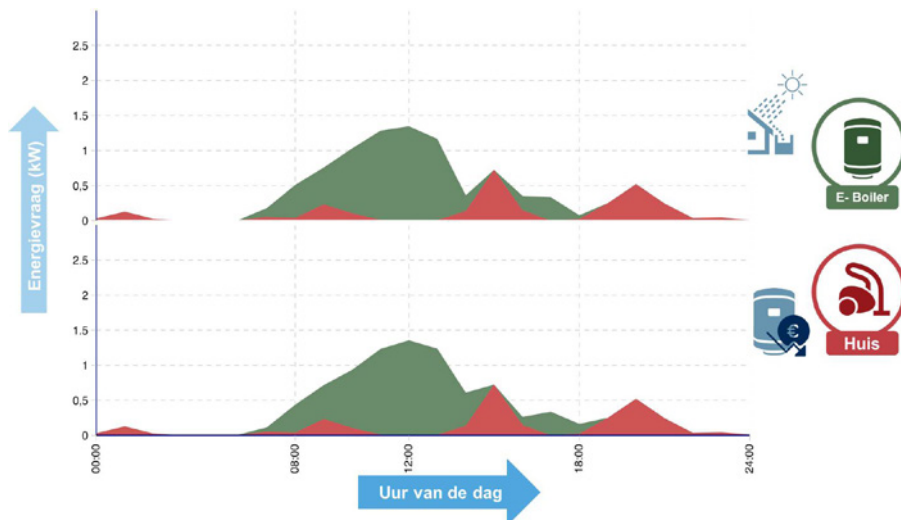


## Bijlage 2

Bij de simulaties zijn de volgende uitgangspunten gebruikt:

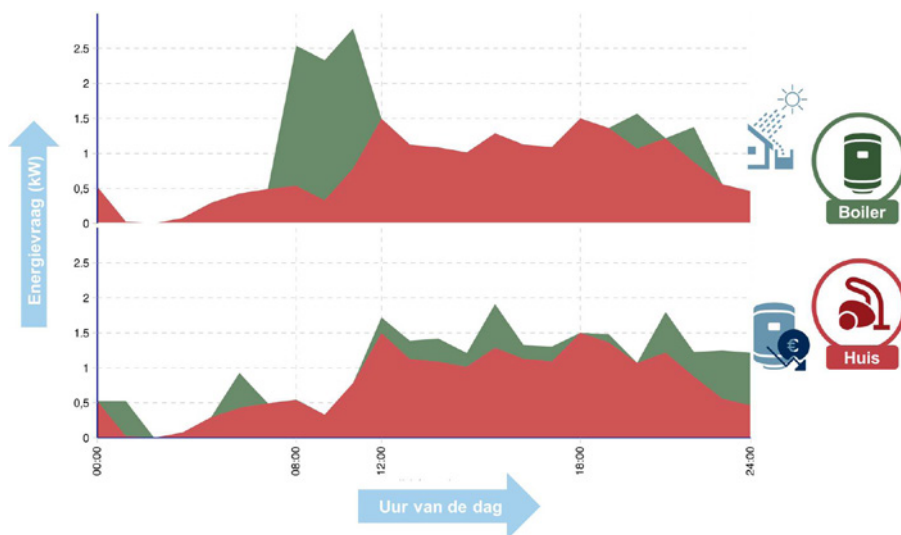
- Alle berekeningen zijn uitgevoerd op kwartier basis
- Opgewekte zon-PV energie : praktijkdata zon-PV productie van installaties beheerd vanuit het consortium
- Gehanteerde watertemperaturen, deze definiëren de hoeveelheden warmte die kan worden opgeslagen zoals dat is meegenomen in de simulatie (let op conservatieve waarden)
- Tboiler: 64 °C
- Tkoud water: 13 °C
- Tdouche: 38.5 °C
- Verbruik 1 douchebeurt: 63 l (bron: Milieuentraal)
- Minimum comfortniveau: 2 douchebeurten in boiler
- Volume boiler: 195 l
- Vermogen boiler (max): 2 kW
- De boiler kan op deellast worden bedreven
- Efficiëntie boiler: 100%
- Efficiëntie ketel: 74%
- PV-panelen: 2 kWp (8 panelen a 250 Wp), AC vermogen, productie op jaarbasis 1908 kWh.
- Warmteverbruik tapwater: ~8 GJ per jaar (2222.2 kWh)
- E verbruik huis: 3500 kWh/jaar
- E verbruik profiel: Gecombineerd profiel uit Zonnedael dataset, geïnterpoleerd (Liander, dag klant 14 / jaar klant 41)
- APX prijzen gesimuleerd voor 2023 (CE Delft, Powerflex Sim2 2023)
- Onbalansprijzen 2014 (alleen relevant voor strategie 2)
- Gasprijs constant 35 €/MWh
- Geen extra warmteverliezen, dus stilstandsverliezen van boiler zijn niet becijferd.

**Bijlage 3**



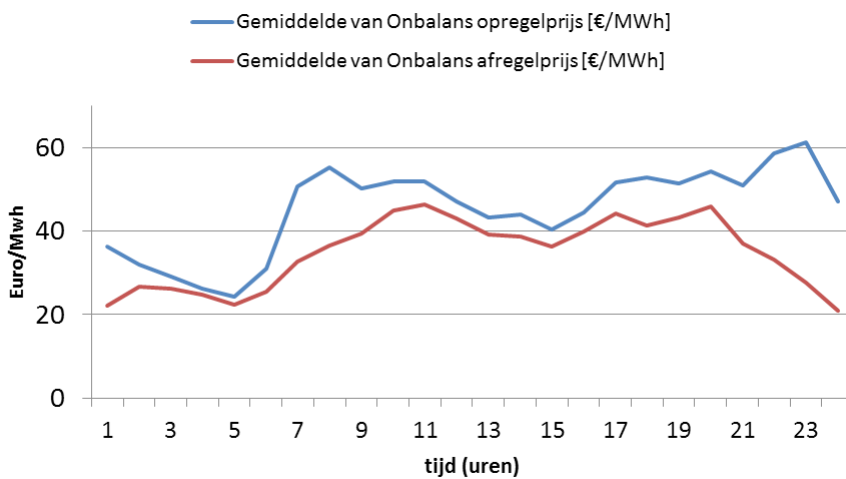
*Figuur 1. Warmste zomerdag ochtend douche*

Op de Y-as staat de energievraag/productie in kW, op de X-as staat het uur van de dag voor de verschillende seizoenen. De bovenste rij laat strategie 1 zien zonder prijssturing, op de tweede rij staan de resultaten van strategie 2 wel op basis van prijssturing. In groen is de energievraag van de boiler weergegeven, in rood het overige elektriciteitsverbruik van het huishouden, de zon-PV installatie is hieruit gelaten. Zichtbaar is het laden van de boiler met zonne-energie in de zomer.



*Figuur 2. Koudste winterdag ochtend douche*

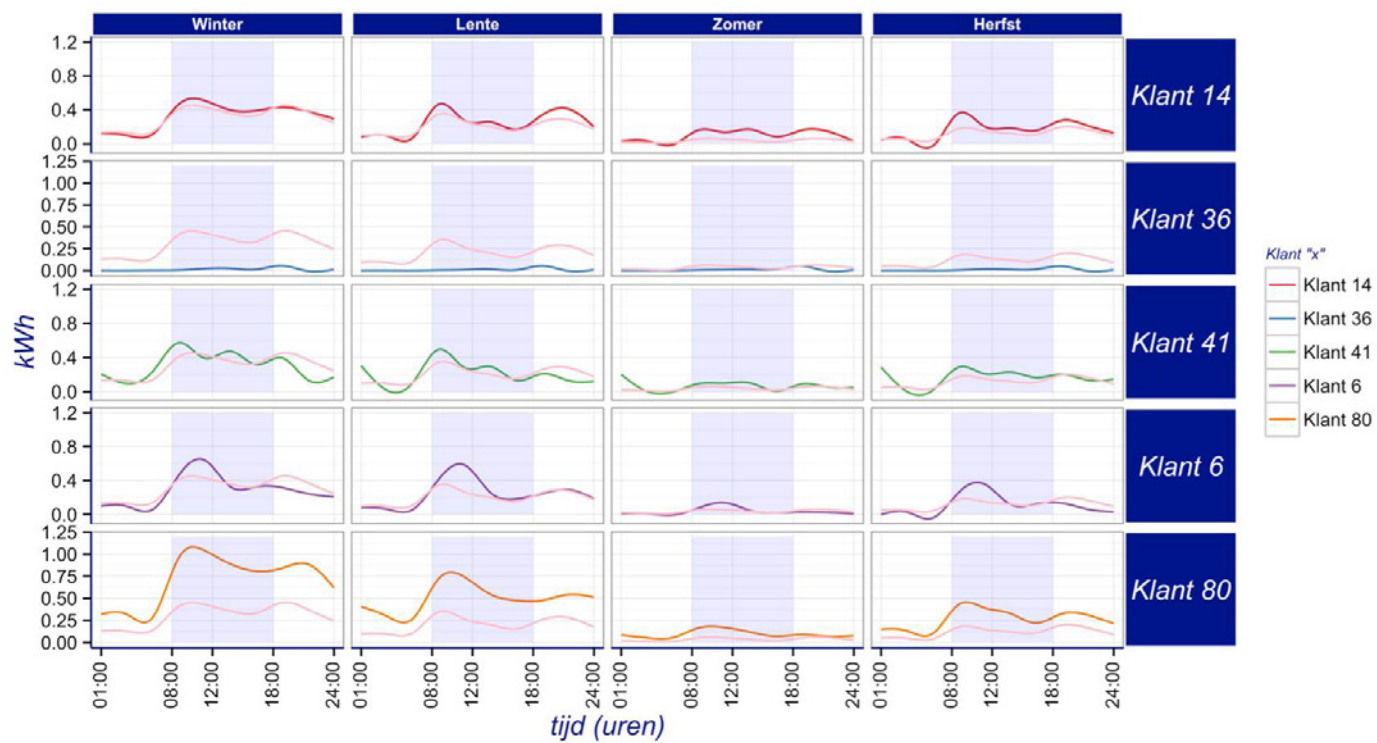
Op de Y-as staat de energievraag/productie in kW, op de X-as staat het uur van de dag voor de verschillende seizoenen. De bovenste rij laat strategie 1 zien zonder prijssturing, op de tweede rij staan de resultaten van strategie 2 wel op basis van prijssturing. In groen is de energievraag van de boiler weergegeven, in rood het overige elektriciteitsverbruik van het huishouden, de zon-PV installatie is hieruit gelaten. De piekvraag van de boiler van het net in strategie 1 in de ochtend komt door de lage boiler lading door zonne-energie vanwege de winter. Voor strategie 2 is deze energie gedurende dag op goedkope momenten van het net gehaald zoals in de avonduren te zien is.



*Figuur 3. Gemiddelde van de prijzen over de dag voor de Onbalansmarkt*

Afregelen en opregelen op de onbalansmarkt zijn te beredeneren vanuit productie vermogen, het afregelen van productie vermogen betekent dus meer afname in termen van de boiler. Opregelen van productie betekent dus minder verbruiken in termen van de boiler.

## Bijlage 4



Figuur 1. Voor de simulaties is gebruik gemaakt van het gecombineerd profiel van klant 14 en 41 uit bovenstaand figuur.







Berenschot Groep B.V.  
Europalaan 40, 3526 KS Utrecht  
Postbus 8039, 3503 RA Utrecht  
T 030 2 916 916  
E [contact@berenschot.nl](mailto:contact@berenschot.nl)  
[www.berenschot.nl](http://www.berenschot.nl)

Berenschot is een onafhankelijk organisatieadviesbureau met 350 medewerkers wereldwijd. Al bijna 80 jaar verrassen wij onze opdrachtgevers in de publieke en private sector met slimme en nieuwe inzichten. We verwerven ze en maken ze toepasbaar. Dit door innovatie te koppelen aan creativiteit. Steeds opnieuw. Klanten kiezen voor Berenschot omdat onze adviezen hen op een voorsprong zetten.

Ons bureau zit vol inspirerende en eigenwijze individuen die allen dezelfde passie delen: organiseren. Ingewikkelde vraagstukken omzetten in werkbaar constructies. Door ons brede werkerterrein en onze brede expertise kunnen opdrachtgevers ons inschakelen voor uiteenlopende opdrachten. En zijn we in staat om met multidisciplinaire teams alle aspecten van een vraagstuk aan te pakken.

Berenschot is aangesloten bij de E-I Consulting Group, een Europees samenwerkingsverband van toonaangevende bureaus. Daarnaast is Berenschot lid van de Raad voor Organisatie-Adviesbureaus (ROA) en hanteert de ROA-gedragscode.