

Tariefsturing bij huishoudelijke apparatuur

Een 'proof of concept'

Auteur: Philip Lely

Review commentaar: Rolf Velthuys

Inleiding

Binnen het project Flexines ligt de uitdaging om een 'proof of concept' te leveren van de beïnvloeding van het huishoudelijk energiegebruik door een bij voortduring actueel energietariefprofiel voor een komende periode van een paar uur tot een dag of een week. Het doel is dat de gebruiker van energie over de betreffende periode de laagste kosten betaalt, zonder dat zijn gebruikscomfort daarbij wezenlijk wordt aangetast. De kostenreductie ontstaat dan door het optimaal in de tijd schuiven van de inschakeling van apparatuur zonder dat de comfortmarges voor het gebruik worden overschreden.

Deze notitie geeft de bevindingen van de modelstudie.

Kostenreductie voor het huishouden.

De doelstelling van het project Flexines is het verlagen van de kosten van het gebruik aan energie op een aansluiting of huishouden. Dit moet worden bereikt door het geplande energieverbruik (binnen het huishouden) te verplaatsen naar momenten waar de energie het goedkoopste is zonder dat het comfort van de gebruiker daar onder lijdt. Het focus is dus niet gericht op het verminderen van energiegebruik, maar op het verlagen van de kosten. Bij een juiste prijsstelling van energie kan op deze wijze het betreffende energiegebruik worden afgestemd op de beschikbaarheid van bv. duurzame bronnen of op de beschikbaarheid van transportvermogen.

Comfortgrenzen

Het gebruik van apparatuur moet het comfort van de gebruiker ondersteunen. Meestal is dit comfort verbonden met grenzen. Te denken valt aan:

Maximale en minimale temperatuur bij ruimteverwarming (stel: de kamertemperatuur moet liggen tussen 19,5°C en 21°C);

Maximale en minimale temperatuur in de koelkast (stel: die moet liggen tussen 2°C en 7°C);

Maximale en minimale temperatuur van de diepvries (stel: deze moet liggen tussen -18°C en -28°C);

De was moet over bv. 6 uur klaar zijn.

Deze opsomming laat zien dat als de grenzen zeer nauw gekozen worden er vrijwel tot niet kan worden verschoven bij het inschakelen van de apparatuur. De comfortgrenzen vertalen zich binnen Flexines dus in een mogelijke kostenvoordeel voor de gebruiker, een 'homo economicus'. Voor hem geldt: hoe groter de comfort grenzen, hoe groter het mogelijke kostenvoordeel.

In het vervolg van deze notitie gelden steeds de hierboven genoemde comfortgrenzen.

Apparaten zoals verwarming, koelkast of diepvries, apparaten die dus een temperatuurtraject binnen grenzen moeten bewaken, worden vanaf nu aangeduid als thermische buffers, terwijl de wasmachine, maar ook de droger of de afwasmachine, apparaten waarvan de start slechts in de tijd verschoven kan worden, worden als verschuivers aangeduid. De term thermische buffer is gekozen omdat er warmte of koude kan worden opgeslagen door de temperatuur tijdelijk binnen de comfortgrenzen een beetje te verhogen resp. te verlagen. De warmte of koude kan weer worden gebruikt door de temperatuur tijdelijk wat te dalen resp. te laten oplopen. Omdat de betreffende apparatuur elektriciteit produceert of gebruikt gedraagt een thermische buffer zich voor het elektriciteitsnet als een virtuele accu. De omvang van deze accu is dus afhankelijk van de ruimte tussen de comfortgrenzen.

Extern tariefprofiel

De reductie van kosten moet dus worden bereikt door het verschuiven van de in- en uitschakeling van apparatuur. Daarbij is het externe tarief dat moeten worden betaald aan leveranciers (of afnemers) van gas en elektriciteit het uitgangspunt. Het externe tarief is een "profiel" omdat het uit een reeks van tarieven bestaat, voor elk onderscheiden tijdslot een tarief. Per tijdslot kan het tarief sterk wisselen, bv. als de energie afkomstig is uit wind of zon, maar ook als er sterke onbalans is op het net.

Binnen Flexines hebben de tijdsloten een lengte van 15 minuten. Deze lengte mag echter variëren en behoeft niet constant te zijn. Het aantal tijdsloten is vrij te kiezen en hangt samen met de periode waarover het kosten minimum moet worden bepaald. In de praktijk zal deze periode telkens een tijdslot opschuiven zodat op elk tijdstip op de dag bv. 12 uur vooruit gekeken wordt.

Er is een extern tariefprofiel voor:

1. Afname gas,

BIJLAGE 2 TARIEFSTURING BIJ HUISHOUDELIJKE APPARATEN

2. Afname elektriciteit
3. Teruglevering elektriciteit

Kostenreductie-methodiek

De methodiek richt zich op koste verlaging van het gehele gebruik aan energie. Hoewel het doel van de gebruiker zal zijn de laagste kosten te betalen, richt de ontwikkelde methodiek zich op het in belangrijke mate verlagen van de kosten zonder daarbij te streven naar de aller laagste kosten. Hierbij geldt: goed is goed genoeg.

Bij het reduceren van de energiekosten is de referentie het externe tariefprofiel in combinatie met het energiegebruik zonder dat er apparatuur bewust wordt beïnvloed.

De laagste kosten worden in eerste instantie berekend door op basis van het externe tariefprofiel per apparaat te zoeken naar de meest aantrekkelijke verschuivingen. Meestal levert dit per apparaat al een behoorlijke relatieve kostenreductie op.

Het gedrag van de apparaten wordt dan dus bepaald door het externe tariefprofiel, een tariefprofiel dat in de ogen van de energiemarkt op dat moment moet gelden. Dat externe tariefprofiel behoeft echter binnen het huishouden nog niet tot de meest optimale inzet van apparatuur leiden, er heeft immers nog geen onderlinge afstemming op het specifieke gebruik (inclusief eventuele productie van energie) van het huishouden plaats gevonden. Daarom wordt er, met het externe tariefprofiel als uitgangspunt, geprobeerd of er door aanpassing van dat profiel, de apparaten binnen het huishouden nog beter op elkaar kunnen worden afgestemd. Daartoe wordt er een intern tariefprofiel gecreëerd, het zg. 'stuurprofiel'. De kosten voor het energiegebruik dat volgt uit de aansturing van de apparaten met dit stuurprofiel, worden vervolgens wel bepaald met het externe tariefprofiel. Er wordt een groot aantal verschillende stuurprofielen achtereenvolgend aan de apparaten aangeboden. Het stuurprofiel dat de laagste kosten met zich meebrengt is het stuurprofiel dat de apparatuur het best op elkaar afstemt.

De kostenreductie vindt dus in 2 stappen plaats:

Referentie: geen aansturing van apparatuur, wel afrekenen met het externe tarief;

1. Aansturing met extern tariefprofiel: apparaat bepaalt zelf op basis van het externe tariefprofiel zijn optimale inzet. Het daaruit volgende gebruik wordt afgerekend tegen het externe tarief;
2. Onderlinge afstemming van de apparatuur mbv. het stuurprofiel met vervolgens afrekening tegen het externe tarief.

Gebruikte algoritmen

Alle hierna te behandelen concepten werken op basis van profielen. Zo'n profiel bestaat uit een reeks 'waarden' voor de betreffende tijdsloten. De waarden zijn daarbij ontleend aan het externe energietariefprofiel of aan het stuurprofiel. Voor de werking van het concept voor de verschuivers en de buffers maakt de herkomst van het profiel niets uit. Bij de beschrijving van deze concepten wordt daarom steeds de term profiel gebruikt.

Het concept voor het zoeken naar het voordeligste inschakelpatroon van de thermische buffers is ontleend aan de methoden die in een routeplanner worden gebruikt.

Het concept voor de 'verschuivers' bestaat uit het systematisch uitproberen van een verschuiving en het daarbij met de tariefprofielen direct uitrekenen van de kosten.

Voor het vinden van een stuurprofiel ten einde het gedrag van buffers en verschuivers op de aansluiting beter op elkaar af te stemmen, wordt gebruikgemaakt van zg. genetische algoritmen.

De concepten voor de routeplanner en het genereren van het stuurprofiel worden nu achtereenvolgend op hoofdlijnen besproken. Daarna volgt een puntsgewijze beschrijving van de ontwikkelde algoritmen.

Routeplanner voor thermische buffers

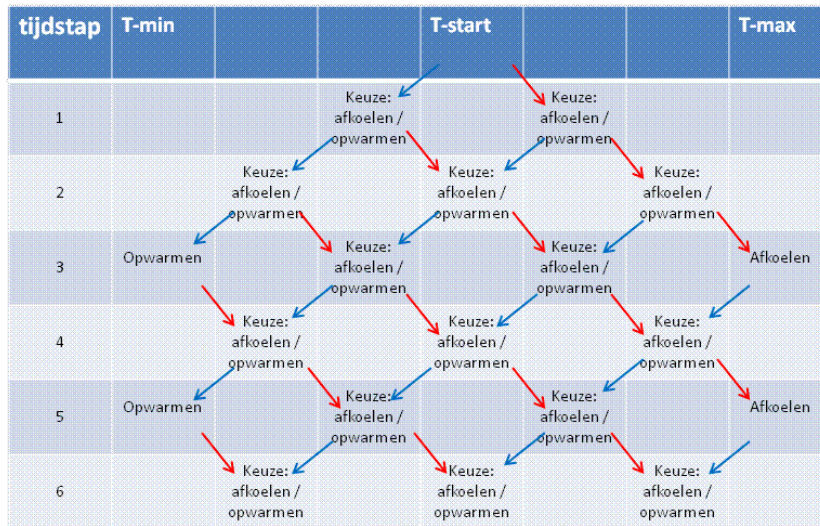
Voor een apparaat dat geclassificeerd is als thermische buffer wordt binnen de geldende temperatuurgrenzen naar een temperatuurtraject gezocht dat, gegeven het profiel, het meest voordelig in kosten is. Hierbij kan de thermische buffer vaak worden vertaald naar een elektrische buffer, gelijk aan een accubatterij. In het geval van koeling kan het dieper dan gebruikelijk koelen worden gezien als een opladen met -, en het vanuit deze diepgekoelde toestand laten opwarmen, als het afgeven van elektriciteit. Immers door de diepe koeling zal de koeling een tijd geen elektriciteit nodig hebben en vermeden afname kan worden gezien als een vorm van productie. Bij verwarming mbv. een μ -wkk kan het laten afkoelen van de ruimte tot de minimale temperatuur eveneens worden gezien als opladen omdat bij het opwarmen tot de maximale temperatuur er elektriciteit geproduceerd wordt. De belading van de buffer kan dus worden afgeleid uit de temperatuur in relatie tot de comfortgrenzen. Alle buffers op een aansluiting kunnen worden gesommeerd door elke buffer te wegen met de tijdens op- of ontlading gemoeide elektriciteit.

Uitgangspunt van het ontwikkelde zoekconcept is dat, uitgaande van een bepaalde temperatuur T_{start} , een temperatuurtraject naar T_{eind} wordt gezocht tegen de laagste kosten. (T_{eind} is vrij te kiezen tussen comfortgrenzen, het lijkt voor de hand te liggen om deze gelijk te stellen aan de gewenste gemiddelde temperatuur.) Dit temperatuurtraject is op

BIJLAGE 2 TARIEFSTURING BIJ HUISHOUDELIJKE APPARATEN

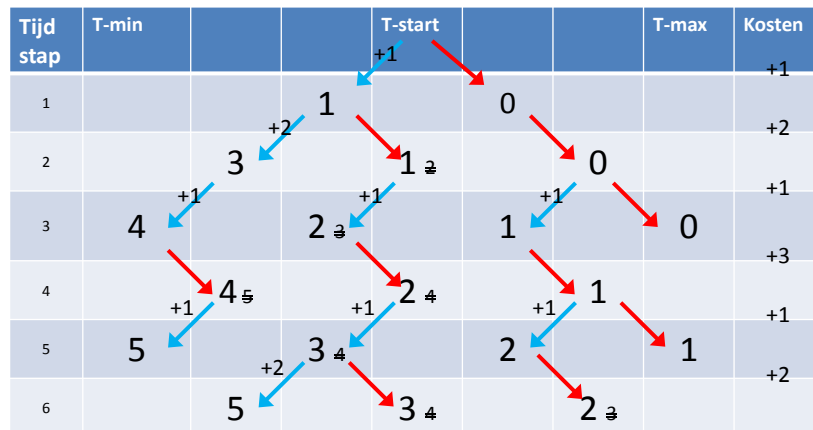
vele manieren te kiezen door combinaties van afkoelen en opwarmen. De gemiddelde temperatuur zal per gekozen traject wel verschillen maar altijd tussen de comfortgrenzen, T_{max} en T_{min} , liggen. De kosten van een traject hangt af van de tijdstippen waarop actief gekoeld of verwarmd moet worden in combinatie met het dan geldende tarief uit het profiel. Voor een koelkast zal het opwarmen niets kosten terwijl het afkoelen wel kosten veroorzaakt. Echter omdat het tijdstip van koelen (energieverbruik) verschoven kan worden, kunnen de kosten van de verschillende routes verschillen. Bij ruimteverwarming worden de kosten juist bij het opwarmen gemaakt, maar verder is er geen principieel verschil met de koelkast.

In figuur 1 wordt het mechanisme geïllustreerd voor de koelkast. De rode pijltjes geven het mogelijke opwarmen aan, terwijl de blauwe duiden op afkoelen. De aangegeven tijdstappen hebben steeds een zelfde lengte en hebben een dusdanige lengte dat het theoretische temperatuurverschil langs de twee mogelijke routes naar de zelfde temperatuur twee tijdstappen later, acceptabel klein is. In de ontwikkelde routeplanner is daarom de tijdstap 1 minuut¹, maar ook grotere tijdstappen zijn mogelijk.



Figuur 1: Mogelijke routes binnen een thermische buffer

Door een tariefprofiel voor de kosten per tijdstap aan te nemen kan met behulp van het bovenstaande schema de werking op hoofdlijnen in figuur 2 worden getoond.



+2 / Kosten voor afkoeling gedurende de stap #: totaal gemaakt kosten t/m de stap ¥: kosten van het alternatieve traject

Bij trajecten met gelijke kosten krijgt het traject met als laatste stap 'afkoeling', de voorkeur.

Figuur 2: Voorbeeld van routes die bij een tariefprofiel worden gevonden

¹ In dit concept is gekozen om met vaste tijdstappen te werken. Het concept had ook kunnen worden ontwikkeld voor vaste temperatuurstappen. Dit zou de berekeningen ingewikkelder hebben gemaakt zonder dat er wezenlijk andere resultaten zouden ontstaan.

BIJLAGE 2 TARIEFSTURING BIJ HUISHOUDELIJKE APPARATEN

Voorwaarde voor het goed functioneren van dit concept is dat er voor zowel de afkoeling als voor de opwarming een goed voorspelmodel ter beschikking staat. In de praktijk zullen de parameters van dit model telkens moeten worden aangepast aan de fysische toestand van het systeem. Optredende wijzigingen zijn: de inhoud van de koelkast of de temperatuurinstelling. Als er wat in de koelkast wordt gelegd is de temperatuur van dat wat er in gaat natuurlijk niet bekend. Het model moet al dergelijke informatie uit de temperatuurontwikkeling vrij snel kunnen afleiden. Dat is een zware opgave.

Het is vanzelfsprekend dat onbekende gebeurtenissen in de toekomst niet te modelleren zijn. In deze notitie is verondersteld dat de koelkast zich in een stationaire toestand blijft bevinden.

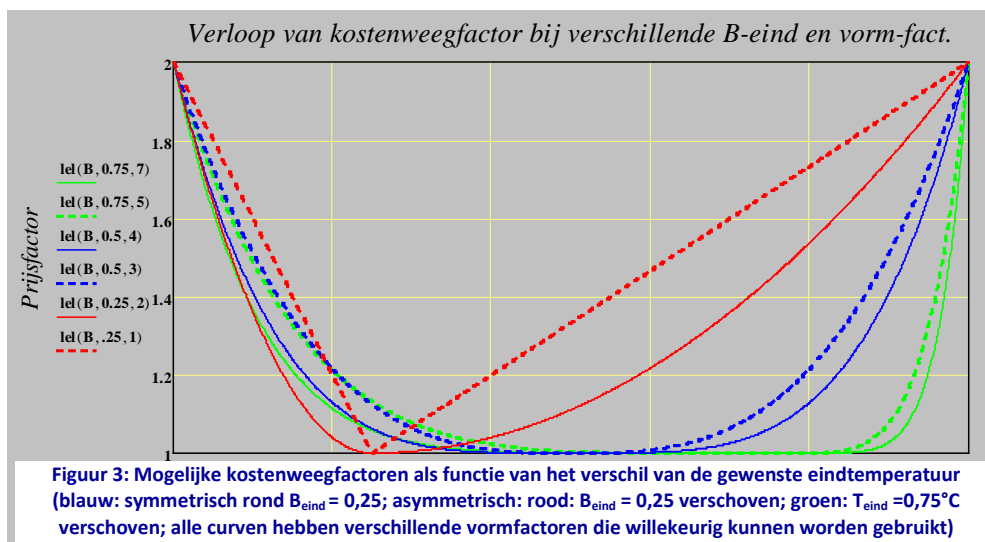
Zoals opgemerkt moet het temperatuurtraject steeds tussen vaste onder- en bovengrenzen blijven. Ter wille van een meer generieke benadering wordt in het vervolg gesproken over de Buffergraad (B). De buffergraad wordt voor de koelkast gedefinieerd als:

$$B = (T - T_{\max}) / (T_{\min} - T_{\max})$$

Bij verwarming worden T_{\min} en T_{\max} verwisseld.

Omdat een apparaat vlak voor een grens kan zijn ingeschakeld en de uitschakeling pas na een minimale tijd mag plaatsvinden waardoor er een overschrijding van de betreffende grens optreedt, is er een methodiek ontwikkeld om de harde 'plotselinge' grens te vertalen naar een zachte grens via een bij het naderen van de grens oplopende toeslagfactor op het stuurtarief. Hierdoor wordt voorkomen dat er te grote excursies buiten de grenzen ontstaan. De steilte van deze toeslagfactor kan, evenals de hoogte, met parameters worden gekozen. De waarde van de factor is $\equiv 1$ bij de opgegeven gewenste B_{eind} .

In de onderstaande figuur wordt het verloop afgebeeld van de toeslagfactor met $B_{\text{eind}} = 0,25, 0,5$ resp. $0,75$ en met oplopende steilte parameters (van 1 t/m 7). De toeslagfactor op de grenzen is gesteld op 2. De vorm van de kromme kan mbv. een vormfactor worden gekozen.



Genereren stuurprofiel

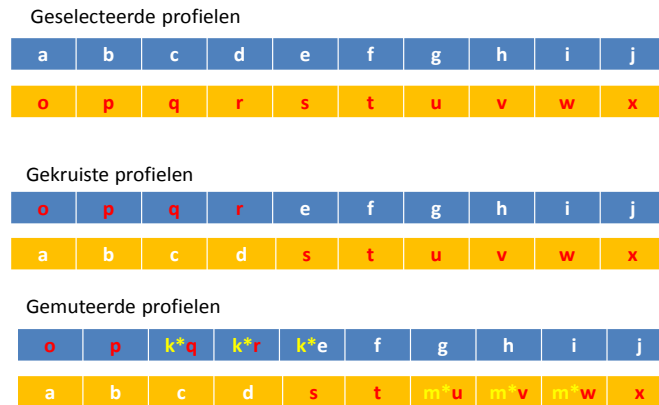
Voor het vinden van een stuurprofiel, dat voor alle apparaten hetzelfde is, wordt gebruik gemaakt van genetische algoritmen. Het gebruikte genetisch algoritme muteert het externe tariefprofiel tot een stuurprofiel. De uit te proberen stuurprofielen worden in een cyclisch proces proefondervindelijke aan de afzonderlijke apparaten aangeboden die vervolgens met hun inschakelpatronen antwoorden. De energiekosten behorend bij de sommatie van deze inschakelpatronen, worden bepaald tegen het externe tariefprofiel. Zijn deze kosten 'lager' dan die uit een voorgaande processtap dan is er voortgang geboekt. Door dit proces een groot aantal keren te herhalen en daarbij de meest profijtelijke stuurprofielen te bewaren en te gebruiken voor het genereren van nieuwe, wordt uiteindelijk een lager kostenniveau gevonden. Meestal wordt dit proces na een tevoren opgegeven aantal iteraties gestopt. Als de kosten niet verder meer dalen is verder rekenen niet meer zo zinvol. Echter, er bestaat altijd nog een kans dat er een profijtelijker stuurprofiel kan worden gevonden. In die zin is het mogelijk dat het optimale stuurprofiel niet gevonden wordt met deze methode.

Genetisch algoritme

BIJLAGE 2 TARIEFSTURING BIJ HUISHOUDELIJKE APPARATEN

Een genetisch algoritme gebruikt random-technieken om een kostenfunctie(kosten(x)) te optimaliseren, in dit geval te minimaliseren. x kan hierbij een vector zijn met veel elementen. x is in deze studie een stuurtariefprofiel met 480 elementen (1 dag lang, elke 5 minuten).

Gedurende de berekeningen wordt een aantal vectorelementen random gevarieerd. De variatie van de vectorelementen ontstaat door twee vectoren uit de verzameling op een willekeurige met elkaar te kruisen. Tevens wordt er in de daarna ontstane nieuwe vectoren eventueel een willekeurige mutatie op een willekeurige plaats aangebracht. In deze studie wordt er in de helft van de gevallen gemuteerd. De onderstaande figuur wil inzicht geven in het gevolgde genetische proces.



Figuur 4: Schema van de bewerkingen binnen het gebruikte genetisch algoritme

De vector(het gebruikte stuurtariefprofiel) wordt op rangorde van kosten toegevoegd aan een verzameling van vectoren waaruit in de volgende run een nieuw stuurprofiel wordt afgeleid. Is de maximale omvang van de verzameling bereikt, dan maken de random gekozen vectoren plaats voor nieuwe. De waarschijnlijkheid om te worden verwijderd wordt beïnvloed door de met dat profielvector verbonden energiekosten.

De selectie van het vectorpaar dat voor kruising gebruikt wordt, geschiedt random waarbij geldt hoe lager de kosten des te groter is de kans op selectie.

Wiskundig kan dit genetische algoritme worden opgevat als een 'trial & error' methode die impliciet gebruik maakt van de binnen de kostenfunctie verborgen gradiënten. Voordeel is dat er zonder ingewikkelde gradiënten met partiële afgeleiden toch een resultaat kan worden gevonden. Nadeel van deze methode is dat de resultaten in principe niet exact reproduceerbaar zijn en slechts een globale betekenis hebben zonder dat er de zekerheid is dat het optimum wordt bereikt.

Dit op evolutionaire inzichten gebaseerde algoritme heet genetisch omdat de mechanismen zijn ontleend aan het kruisen van genen in het voortplantingsproces. Evolutionair gezien hebben genen die sterke nakomelingen leveren een grotere kans van overleven. Daarnaast treden er ook spontane mutaties op die de diversiteit van de populatie veroorzaken.

Toetsing

Om de werking van het concept van tariefsturing te toetsen is er een simulatiemodel gebouwd (zie figuur 5). Voor de toetsing zijn er voorspelmodellen gebouwd voor koelkast, diepvries, ruimteverwarming met warmte uit een μ -wkk, wasmachine en PV-panelen. De karakteristieke modelparameters zijn dusdanig gekozen dat het modelgedrag van deze apparaten lijkt op hoe zij in de praktijk functioneren.

Om de reductie van energiekosten te kunnen volgen worden de volgende varianten met elkaar vergeleken met het externe tariefprofiel als basis:

Uitgangspunt: energiekosten in het referentiegeval waarbij geen buffering of verschuiving wordt toegepast

Stap 1: energiekostenreductie na gebruik van uitsluitend de routeplanner of de verschuiver in combinatie met het externe energietariefprofiel

Stap 2: er wordt mbv. stuurprofielen gezocht naar een nog verdere kostenreductie.

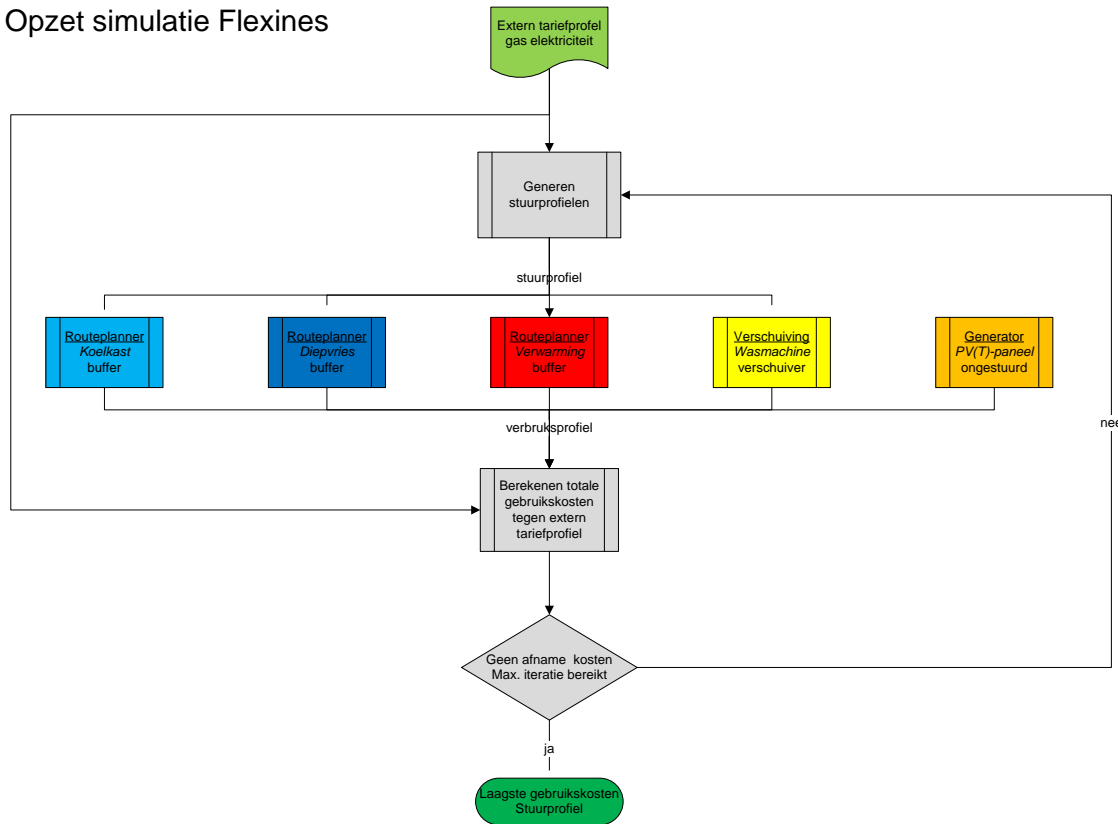
Teneinde een beeld te krijgen van de invloed van de buiten temperatuur op de resultaten, dus de invloed van de μ -wkk, zijn de simulaties uitgevoerd voor verschillende dagen: de meest gemiddelde dag, de koudste dag, de warmste dag en de meest zonnigste dag uit de periode 2000 t/m 2010. De buitentemperatuur- en zonstralingsgegevens van het KNMI-weerstation te Eelde worden daarvoor gebruikt. Voor diezelfde dagen wordt ook het onbalanstarief van Tennet als extern tariefprofiel gebruikt om de elektriciteitskosten te bepalen.

BIJLAGE 2 TARIEFSTURING BIJ HUISHOUDELIJKE APPARATEN

Voor aardgas is een tariefprofiel bedacht dat in grote blokken varieert tussen € 0,055 tot € 0,075 per kWh_{gas}.

De berekeningen beslaan telkens een evaluatieperiode van 24 uur. Die periode wordt doorgerekend met tijdstapjes van 2,5 minuten en met een voorschrijdend tijdslot van 1 uur. Er wordt telkens 4 uur vooruit gekeken.

Opzet simulatie Flexines



Figuur 5: Stroomdiagram simulatie Flexines

Resultaten

Uit de resultaten moet blijken of het ontwikkelde principe van tariefsturing werkt. Daarom komen nu de volgende vragen achtereenvolgend aan de orde:

1. Hoe ziet de referentie eruit;
2. Worden er energiekosten bespaard;
3. Is de besparing significant;
4. Waardoor wordt de besparing veroorzaakt;
5. Wat zijn de gevolgen voor de inzet van de apparatuur.

Bij het interpreteren van de numerieke resultaten mag aan de absolute waarde van de uitkomsten maar een beperkte betekenis worden gegeven. Er zijn immers een groot aantal aannames gedaan. De beschouwing richt zich daarom op de verschillen tussen de gemaakte berekeningen.

Het inzicht in de kosten ontstaat aan de hand van staafdiagrammen die betrekking hebben op een aantal onderscheiden dagen. Deze dagen zijn geselecteerd uit de periode van 2000 t/m 2010 (zie tabel) op basis van de weergegevens van het KNMI-weerstation Eelde. Daarnaast zijn de berekeningen uitgevoerd voor de dag waarop het tarief van TenneT voor de onbalans maximaal varieerde.

Koudste dag: 2003-01-09
Gemiddelde dag: 2005-10-16
Gewijzigd comfort: 2005-10-16
Warmste dag: 2006-07-05
Zonnigste dag: 2009-06-23
Max. onbalans: 2010-07-09

Tabel 1, lijst met de bij de berekening voor klimaatgegevens en voor onbalanstarieven gebruikte kenmerkende dagen

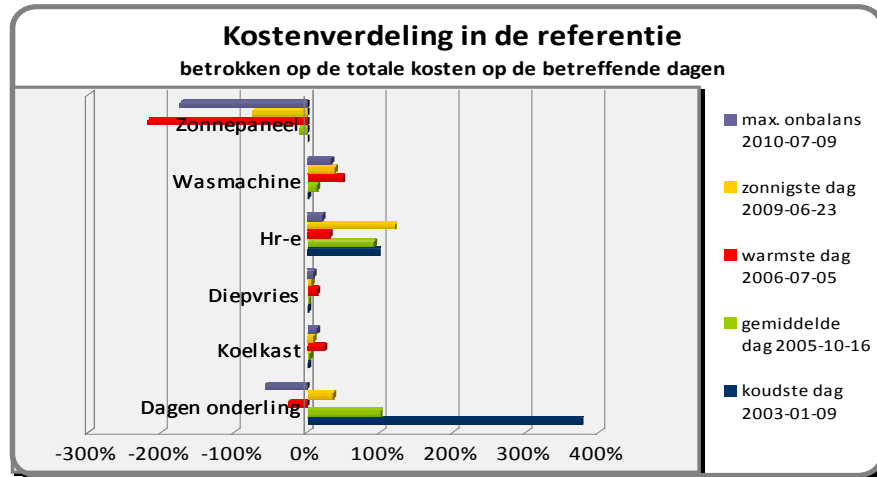
De berekeningen zijn ook uitgevoerd voor de gemiddelde dag waarop de grenzen voor het verwarmingscomfort zijn aangepast van 19,5 °C tot 21°C naar 18,5 °C tot 21,5°C. Dit is gedaan om de invloed van het gekozen comfort globaal te

BIJLAGE 2 TARIEFSTURING BIJ HUISHOUDELIJKE APPARATEN

verkennen. Om de invloed van het bij teruglevering aan het net eventueel teruggeven van de Energie Belasting aan de aangeslotene zichtbaar te maken is ook hier een berekening aan gewijd. Het teruggeven van de Energie Belasting aan de aangeslotene ligt voor de hand omdat hij reeds deze Energiebelasting over het gebruikte aardgas heeft betaald of heeft geïnvesteerd in zonnepanelen. Deze berekeningen worden in de paragraaf 'gevoeligheden' besproken.

De referentie

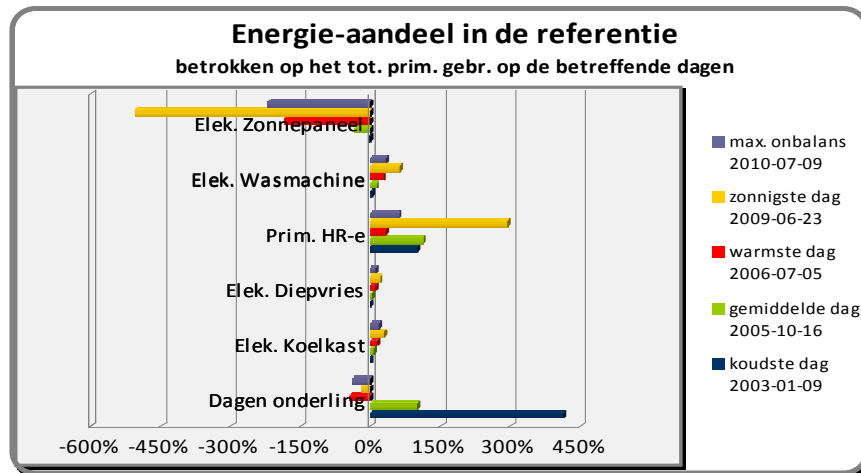
Bij de beschouwingen is het goed om te weten dat van de 5 in de berekening betrokken installaties de diepvries en de koelkast een relatief klein aandeel hebben in de energiekosten en daarmee tevens een relatief kleine invloed op de resultaten zullen hebben. Dit blijkt duidelijk uit figuur 6.



Figuur 6: Kostenaandelen op 5 kenmerkende dagen als percentage van de totale kosten op de betreffende dagen.

De gebruikskosten worden gedomineerd door de netto energiekosten van de verwarming met de HR-e ketel of, op zonnige/warme dagen, door het zonnepaneel. Omdat de dag met de maximale onbalans in de zomer viel, is ook dan de bijdrage van het zonnepaneel relatief groot.

Ter vergelijking van de totaalkosten op de dagen onderling is ook de kostenverhouding tussen de dagen onderling opgenomen. Er ontstaat een zelfde beeld. De verschillen worden in belangrijke mate veroorzaakt door het relatief grote verschil tussen de leveringstarieven en de tarieven voor teruglevering.



Figuur 7: Energieaandeel in de referentie, betrokken op het primaire energiegebruik op de betreffende dagen.

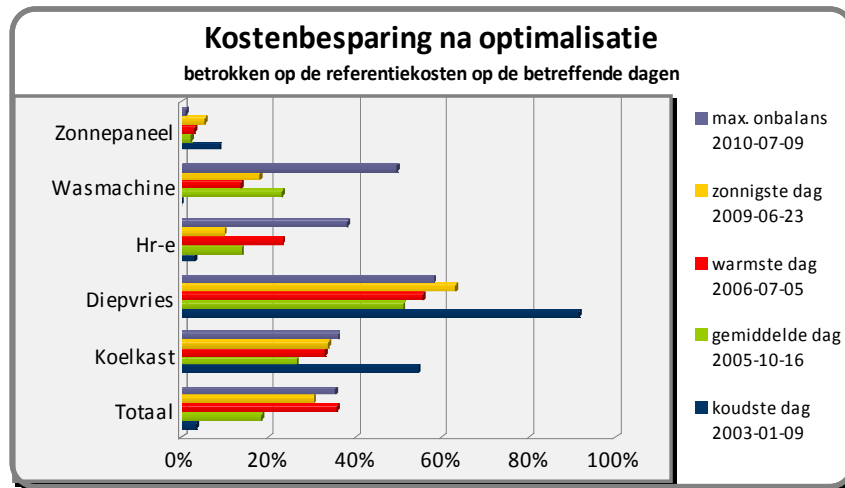
De verderop in deze paragraaf te presenteren kostenbesparing moeten tegen de achtergrond van deze twee figuren worden geïnterpreteerd.

Uit figuur 6 blijkt dat er op de warmste dag en de dag dat de onbalans maximaal is per saldo wordt verdiend op de teruglevering van elektriciteit, terwijl op de zonnigste dag er wordt teruggeleverd, maar er netto nog wel energiekosten zijn.

Energiekosten

BIJLAGE 2 TARIEFSTURING BIJ HUISHOUDELIJKE APPARATEN

Uit figuur 8 blijkt dat het gebruikte optimalisatie algoritme op alle onderzochte dagen tot een kostenbesparing ('Totaal') ten opzicht van de bij die dag behorende referentie leidt.



Figuur 8: Kostenbesparing na optimalisatie als percentage van de referentiekosten

Indien de beschouwing zich richt op de gemiddelde dag, dan blijkt alle apparatuur op de bijbehorende referentiekosten te besparen, behalve het zonnepaneel. Dat de kosten daar blijken te stijgen, komt omdat er tijdens de zonschijn op die dag momenten voorkomen waarop het onbalanstarief negatief is.

Figuur 8 leert verder dat op de energiekosten van koelkast en diepvries in relatieve zin met het beschreven optimaliseringalgoritme fors valt te besparen. Dit geldt in wat mindere mate voor de wasmachine. Combinatie van figuur 8 en figuur 6 leidt tot het inzicht dat de HR-e ketel, hoewel die maar een beperkte kostenreductie laat zien, wel de grootste bijdrage levert aan de totale kostenreductie. Immers in figuur 6 domineren de kosten voor de verwarming door de HR-e ketel.

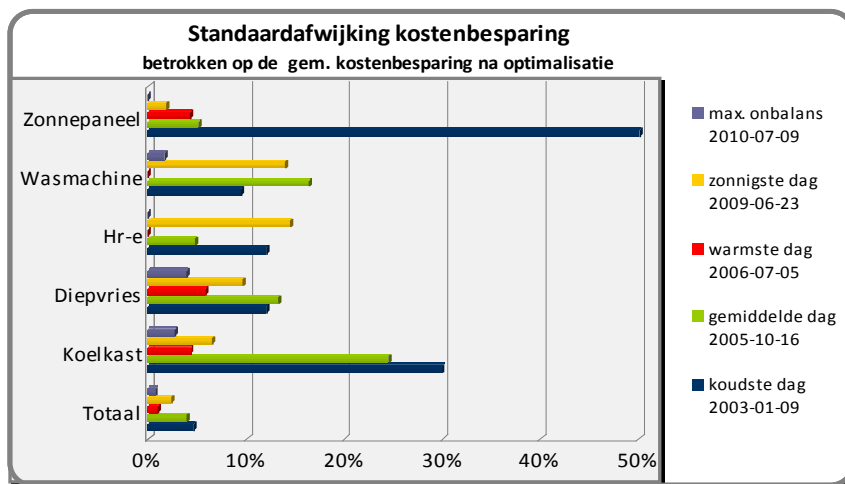
Op de koudste dag is de relatieve besparing maar heel gering. Echter in absolute zin blijkt die kostenbesparing van dezelfde orde als die op de gemiddelde dag. Dat geldt ook voor de andere dagen.

Significantie

Om de betrouwbaarheid van de bereikte kostenbesparing te kunnen beoordelen zijn alle berekeningen 5 maal uitgevoerd en is de standaardafwijking van het totaal en resultaten per apparaat bepaald. (vanwege het gebruik van random-trekkingen binnen het genetisch algoritme, is elke berekening uniek en verschillen de resultaten).

In figuur 5 worden deze waarde gepresenteerd als percentage van het gemiddelde kostenbesparing. Naar blijkt is deze relatieve standaardafwijking voor de totale kostenbesparing in alle gevallen verrassend klein. Indien 30% als norm voor significantie wordt genomen, dan lijken de totale kostenbesparing op alle dagen significant en qua spreiding weinig verschillen. Opvallend is de spreiding op de koudste dag. Dat lijkt een aspect voor nader onderzoek.

Samenvattend mag worden gesteld het ontwikkelde algoritme in staat is om in de simulatie een significante kostenbesparing te berekenen.



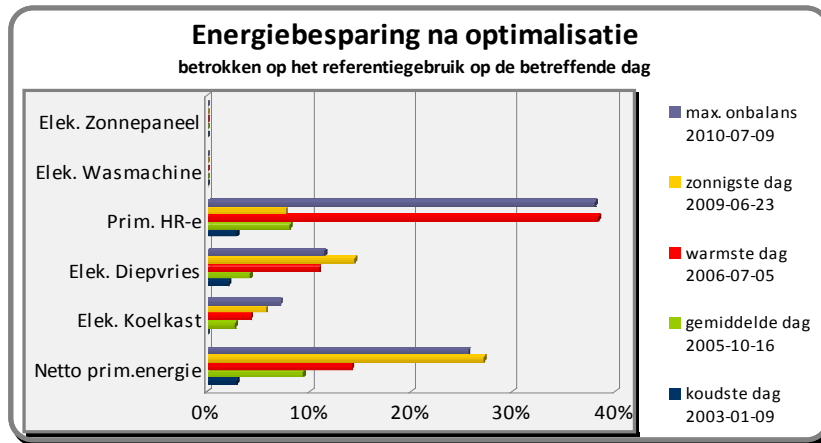
Figuur 9: Standaardafwijking van de kostenbesparing in relatie tot de gemiddelde kostenbesparing na optimalisatie

Analyse

De berekende energiekostenbesparing kan 2 oorzaken hebben:

1. Er is een energiebesparing opgetreden;
2. Er is slim energie ingekocht of verkocht.

Om een mogelijke energiebesparing zichtbaar te maken is verondersteld dat de in huis opgewekte elektriciteit in de centrale met een gemiddeld rendement van 45% op bovenwaarde zou zijn opgewekt. Er wordt dus gekeken naar de benodigde netto hoeveelheid primaire energie in vergelijking tot de in de referentie benodigde energie (zie figuur 10).

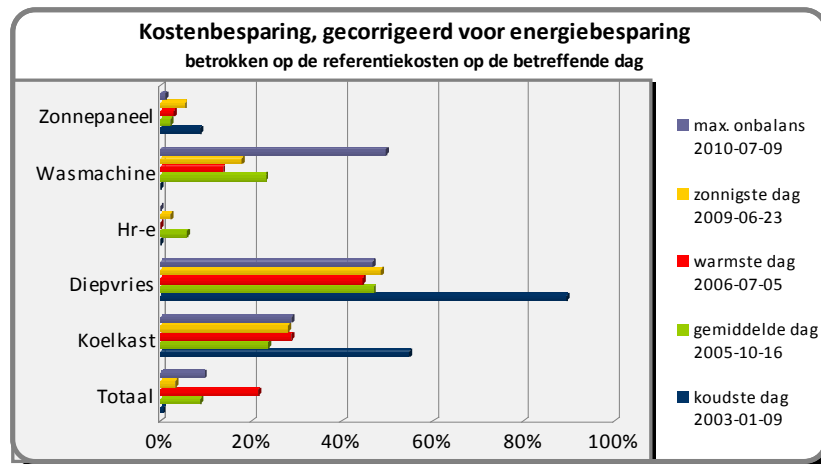


Figuur 10: Energiebesparing na optimalisatie, betrokken op het referentiegebruik op de betreffende dagen

Het lijkt opvallend dat de wasmachine en het zonnepaneel niet bijdragen aan de energiebesparing. Dit komt omdat zij in de referentie evenveel energie gebruiken resp. produceren als na optimalisatie. Het wasprogramma is niet gewijzigd en de zon is niet meer of minder gaan schijnen.

De opgetreden energiebesparing betekent dat de grenzen van het comfort beter zijn benut. Bij nadere bestudering blijkt dat met name het gebruikte genetisch algoritme hier aan bijdraagt.

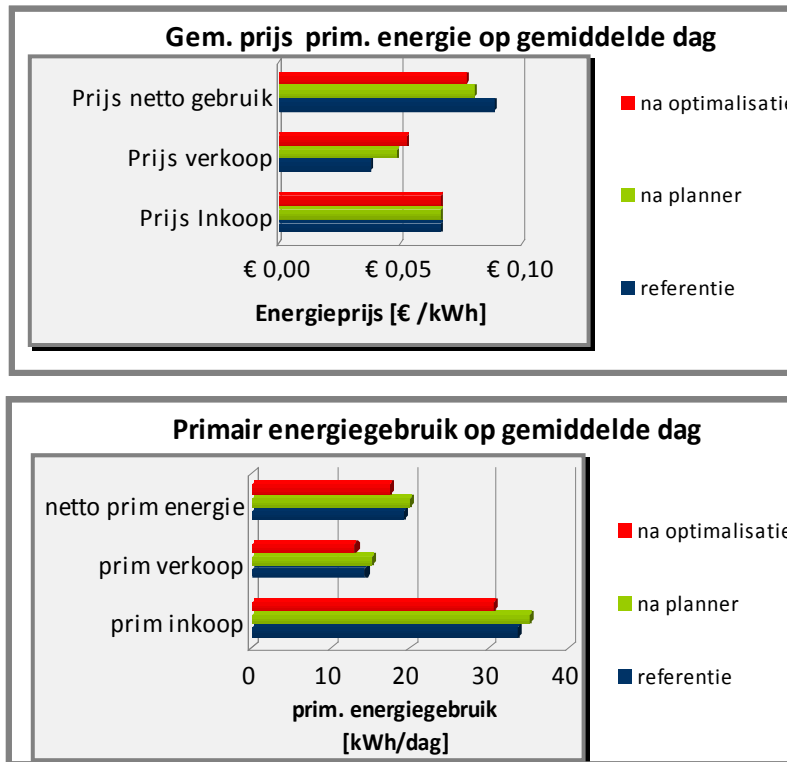
Of er slimmer energie is ingekocht blijkt nadat de kostenbesparing in figuur 11 is gecorrigeerd voor de energiebesparing.



Figuur 11: Kostenbesparing, gecorrigeerd voor energiebesparing, betrokken op de referentiekosten op de betreffende dagen

Er blijkt dus ook slimmer te zijn ingekocht of verkocht, behalve op de zonnigste dag. Uit de achterliggende gegevens blijkt dat het gebruikte planningsalgoritme nu een belangrijke bijdrage te levert.

Voor de gemiddelde dag is dit in de onderstaande figuren verder uitgewerkt.



Figuur 12 en 13: Gebruik en prijs primaire energie gedurende de gemiddelde dag

Deze figuren laten zien dat het planningsalgoritme met name de verkoopprijs van energie weet te beïnvloeden. Dit wijst erop dat het moment van verkopen gunst wordt beïnvloed. Het te verkopen energievolume blijft vrijwel gelijk. Hier wordt nu indirect de werking van de thermische buffers zichtbaar.

Voor koelkast, diepvries en wasmachine kan slim worden ingekocht. Voor de HR-e ketel lukt dit nauwelijks. Naar de oorzaak hiervan wordt nog gezocht. Per saldo blijkt op de gemiddelde dag, maar zeker op de warmste dag en tijdens de dag met de maximale onbalans, slim inkopen te slagen. Op de zonnigste dag lijkt de HR-e ketel dit te verhinderen.

Samenvattend mag, ondanks de kanttekeningen met betrekking tot de energiebesparing, worden geconcludeerd dat anticiperen op de energietarieven met het ontwikkelde optimalisatie algoritme, leidt tot een kostenreductie, zij het dat deze reductie maar in beperkte mate wordt bereikt door slim in te kopen en in belangrijke mate door op de juiste momenten energie te besparen. Het 'proof of principle' is daarmee op modelniveau geleverd.

Zoals was te verwachten verschillen de kostenaandelen van de gemiddelde dag en de dag met gewijzigd comfort niet. Omdat op de gemiddelde dag wordt teruggeleverd aan het net en de inkomsten voor deze teruglevering door het terugkrijgen van de Energie Belasting zijn gestegen, dalen de totale referentiekosten zoals blijkt niet onaanzienlijk.