

Optimaliseren van elektrische huishoudelijke lastprofielen met dynamisch tarief

Dries VAN DE VELDE

Promotor: Greet Vanden Berghe Masterproef ingediend tot het behalen van
de graad van master of Science in de
Co-promotor: Lies Debruyne industriële wetenschappen: Elektronica-ICT

Academiejaar 2023 - 2024

©Copyright KU Leuven

Deze masterproef is een examendocument dat niet werd gecorigeerd voor eventuele vastgestelde fouten.

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, kan u zich richten tot KU Leuven Technologiecampus Gent, Gebroeders De Smetstraat 1, B-9000 Gent, +32 92 65 86 10 of via e-mail iiw.gent@kuleuven.be.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

Dankwoord

Het afronden van deze thesis is voor mij een belangrijke mijlpaal en ik had dit niet gekund zonder de steun en hulp van bepaalde mensen.

Allereerst wil ik graag mijn promotor, Greet Vanden Berghe, en mijn co-promotor, Lies Debruyne bedanken. Hun waardevolle feedback, goede begeleiding en kritische vragen op de juiste momenten hebben mijn onderzoek echt verder geholpen. Dankzij onze regelmatige bijeenkomsten en hun bereidheid om altijd mee te denken, kreeg ik veel waardevolle inzichten.

Daarnaast wil ik mijn familie, en in het bijzonder mijn ouders, bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun tijdens het maken van deze thesis.

Tot slot wil ik iedereen bedanken die op welke manier dan ook heeft bijgedragen aan het voltooien van deze thesis.

Abstract

In een groener wordend energielandschap wordt het steeds belangrijker om het elektriciteitsverbruik slim te plannen. Dit is het gevolg van een toenemende fluctuatie in zowel de energieopwekking als het energieverbruik. De fluctuatie in opgewekt vermogen doorheen de dag is voornamelijk toe te schrijven aan de opkomst van hernieuwbare energiebronnen. Hernieuwbare bronnen leveren namelijk niet altijd dezelfde hoeveelheid elektriciteit. Wat betreft energieverbruik, is de fluctuatie in verbruikt vermogen vooral toe te schrijven aan de opkomst van bepaalde grootverbruikers zoals elektrische wagens. Het is vanzelfsprekend dat er een grote piek in energievraag zal ontstaan, wanneer iedereen tegelijkertijd bepaalde verbruikers gaat aanschakelen.

Er zijn in Vlaanderen verschillende maatregelen genomen om dit probleem aan te pakken. Een van deze maatregelen is het capaciteitstarief. Dit is een tarief waarbij een extra vergoeding aangerekend wordt volgens de grootte van het piekverbruik. Grote piekvermogens kunnen het elektriciteitsnet in een onbalans brengen. Daarnaast is er het dynamisch energietarief dat verschillende energieprijzen per uur aanbiedt aan klanten met een digitale elektriciteitsmeter. Dit moedigt consumenten aan om elektriciteit te verbruiken wanneer er veel elektriciteit beschikbaar is, en de prijs dus laag is.

Zonder aanpassingen in het lastprofiel zal een dynamisch energietarief in de meeste gevallen echter niet goedkoper uitkomen dan een vast tarief. Het is dus belangrijk om goed te plannen bij een dynamisch energietarief. Men kan handmatig gaan rekening houden met al deze tarieven, maar dit wordt al snel complex. Wanneer men ook nog over zonne-energie en thuisbatterijen beschikt, zal de complexiteit van het plannen alleen maar toenemen. Daarom is het raadzaam om een HEMS (Home Energy Management System) te gebruiken. Dit is een systeem dat slim apparaten kan aan- en uitschakelen rekening houdend met comfort en kost om het dynamisch energietarief zo voordelig mogelijk te gebruiken.

Deze thesis heeft als doel de elektriciteitskost voor de consument te minimaliseren. Hiervoor wordt een applicatie ontwikkeld met grafische gebruikersinterface. Zo kunnen verschillende scenario's makkelijk met elkaar vergeleken worden.

Trefwoorden: capaciteitstarief, dynamisch energietarief, Home Energy Management System

In a greening energy landscape, it is becoming increasingly important to smartly schedule electricity consumption. This is due to increasing fluctuation in both power generation and consumption. The fluctuation in power generated throughout the day is mainly due to the emergence of renewable energy sources. In fact, renewable sources do not always supply the same amount of electricity. As for energy consumption, the fluctuation in power consumed is mainly due to the emergence of certain large consumers such as electric cars. It is obvious that there will be a big spike in energy demand when everyone starts switching on certain consumers at the same time.

Several measures have been taken in Flanders to address this problem. One of these measures is the capacity tariff. This is a tariff where an additional fee is charged according to the amount of peak consumption. These large peak capacities can put the electricity grid in an imbalance. There is also the dynamic energy tariff that offers different energy prices per hour, to customers with a digital electricity meter. This encourages consumers to consume electricity when electricity is plentiful and therefore the price is low.

However, without adjustments to the load profile, a dynamic energy tariff will not come out cheaper than a fixed tariff in most cases. It is therefore important to plan well when using a dynamic energy tariff. One can start manually taking all these tariffs into account, but this quickly becomes complex. If one also has solar power, home batteries and so on, the complexity of planning will only increase. Therefore, it is advisable to use a HEMS (Home Energy Management System). This is a system that can smartly switch appliances on and off taking into account comfort and cost to maximise the price advantage of the dynamic energy tariff.

This thesis aims to minimise the cost of electricity for consumers. For this purpose, an application is developed with graphical user interface. This will allow easy comparison of different scenarios.

Keywords: capacity tariff, dynamic energy tariff, Home Energy Management System

Inhoudsopgave

1 Inleiding	1
1.1 Voordelen bij het plannen van lastprofielen	1
1.1.1 Impact op de overbelasting van het energienet	1
1.2 De opbouw van de huidige energiefactuur	2
1.2.1 De nettarieven	2
1.2.2 De energiekost	4
1.3 Verbruikers categoriseren voor energy scheduling	5
1.3.1 Onderbreekbare verbruikers	6
1.3.2 Niet-onderbreekbare verbruikers	6
1.3.3 Verbruikers met een gekend verbruiksprofiel	6
1.3.4 Verbruikers met een flexibel verbruiksprofiel	6
1.4 Bestaande scheduling systemen	7
2 Dataverzameling	8
3 Algoritme	12
3.1 Complexiteit van het plannen	12
3.1.1 Planningscomplexiteit	12
3.1.2 Integratie van thuisbatterijen	13
3.1.3 Modellering van de batterij	13
3.2 Testscenario's	14
3.2.1 Oplossingsvisualisatie	17
3.3 Implementatie algoritme	18
3.3.1 Brute force	18
3.3.2 Branch and bound algoritme	21
3.4 Gegenereerde testinstanties	25
3.4.1 Fluctuerende dynamische prijzen, veel zonne-energie, geen thuisbatterij	25

3.4.2	Fluctuerende dynamische prijzen, weinig zonne-energie, geen thuisbatterij	27
3.4.3	Constante dynamische prijzen, veel zonne-energie, geen thuisbatterij	29
3.4.4	Constante dynamische prijzen, weinig zonne-energie, geen thuisbatterij	31
3.4.5	Algemene trends resultaten	33
3.4.6	Thuisbatterij	33
3.4.7	Basislastprofiel	34
3.5	Grafische gebruikersinterface	35
3.5.1	Tauri	35
4	Conclusie en verder onderzoek	36
4.1	Conclusie	36
4.2	Verder onderzoek	37
A	Beschrijving van deze masterproef in de vorm van een wetenschappelijk artikel	39
B	Poster	45

Lijst van figuren

1.1	Samenstelling nettarieven gezin met elektriciteitsverbruik van 3500 kWh [1]	2
1.2	Besparingskansen dynamisch tarief [5]	5
1.3	Verschillende starttijden voor twee niet onderbreekbare verbruikers met gekend verbruiksprofiel geplot met bijhorende kostprijs	7
2.1	Voorbeeld van de zonne-energie voorspellingen van Elia	9
2.2	Percentageafwijking van verwachte waarde t.o.v. gemonitorde capaciteit	10
2.3	Verbruik per kwartier voor een vaatwasser	10
3.1	Opgewekte zonne-energie zonnige en wisselvallige dag	16
3.2	Voorbeeld visualisatie van gepland elektriciteitsverbruik met zonnepanelen en 5 apparaten	17
3.3	Binaire boom schedulingsprobleem	18
3.4	Brute force timing	19
3.5	Binaire boom met afgeknipte takken	21
3.6	Lastprofiel 10_d fluctuerende dynamische prijs, veel zonne-energie zonder batterij	26
3.7	Lastprofiel 10_c fluctuerende dynamische prijs, veel zonne-energie zonder batterij	26
3.8	Lastprofiel 10_d fluctuerende dynamische prijs, weinig zonne-energie zonder batterij	28
3.9	Lastprofiel 10_c fluctuerende dynamische prijs, weinig zonne-energie zonder batterij	28
3.10	Lastprofiel 10_d relatief constante dynamische prijs, veel zonne-energie zonder batterij	30
3.11	Lastprofiel 10_e relatief constante dynamische prijs, veel zonne-energie zonder batterij	30
3.12	Lastprofiel 10_d relatief constante dynamische prijs, weinig zonne-energie zonder batterij	32

3.13 Lastprofiel 10_a relatief constante dynamische prijs, weinig zonne-energie zonder batterij	32
3.14 Lastprofiel 2a geen thuisbatterij met basislast	34
3.15 Lastprofiel 2a thuisbatterij met basislast	34
3.16 Screenshot ontwikkelde applicatie	35

Lijst van tabellen

3.1	Vergelijking van sorteercriteria aan de hand van resultaten voor fluctuerende prijzen, 11 mei zonne-instantie, zonder thuisbatterij	23
3.2	Fluctuerende prijs, zonnige dag, geen thuisbatterij	25
3.3	Fluctuerende prijs, wisselvallige dag, geen thuisbatterij	27
3.4	Constante prijs, zonnige dag, geen thuisbatterij	29
3.5	Constante prijs, wisselvallige dag, geen thuisbatterij	31
3.6	Fluctuerende prijs, 11 mei 24 zonne-energie, thuisbatterij 1,25kWh, omvormer 2,5kW	33

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Voordelen bij het plannen van lastprofielen

1.1.1 Impact op de overbelasting van het energienet

De steeds meer aanwezige hernieuwbare energie in ons huidig energielandschap zorgt voor een volatief energieopwekkingspatroon. Het is namelijk zo dat zonnepanelen enkel energie opwekken wanneer de zon schijnt, net zoals windmolens enkel energie opwekken wanneer er voldoende wind is. Naast de opwekking vertoont het energieverbruik een gelijkaardige tendens. De steeds meer aanwezige elektrische wagen is een echte grootverbruiker. Wanneer iedereen op dezelfde tijdstippen zijn elektrische wagen laadt ontstaan er grote afnamepieken. Wanneer men deze twee zaken naast elkaar zet, wordt de onbalans tussen de productie en de consumptie duidelijk.

Deze onbalans wordt opgevangen door het gebruik van gascentrales, batterijparken en het aankopen van buitenlandse energie. Deze methoden zijn echter vaak duur.

Om het verbruik van de consument meer in lijn te brengen met de productie van elektriciteit wordt het dynamisch- en capaciteitstarief toegepast.

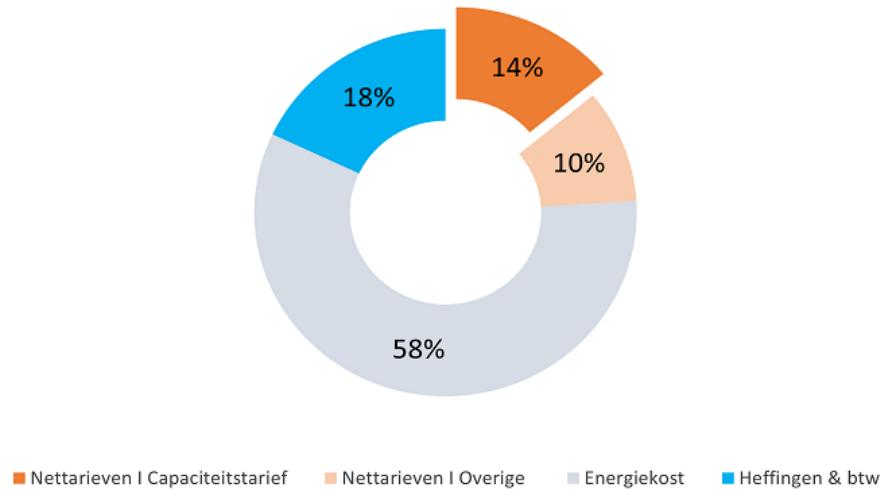
Bij het dynamisch energietarief verschilt de elektriciteitsprijs per uur. Het uurlijks prijsverschil moedigt aan om elektriciteit te gebruiken wanneer er een overschot is. Zo wordt de onbalans tussen productie en consumptie beperkt.

Het capaciteitstarief is een verplichte kost die aangerekend wordt voor grote piekverbruiken. De consumenten worden door dit tarief aangemoedigd om hun elektriciteitsverbruik te spreiden doorheen de dag.

Om met het dynamische tarief en capaciteitstarief de afrekeningskost te minimaliseren is het nodig het verbruik van de consument te plannen. Dit is waar de nood voor het plannen van lastprofielen, ook energy scheduling genoemd, naar boven komt.

1.2 De opbouw van de huidige energiefactuur

De elektriciteitsfactuur in Vlaanderen is opgebouwd uit verschillende delen. Zo zijn er naast de energiekost zelf ook nog nettarieven, heffingen en btw zoals Figuur 1.1 illustreert.



Figuur 1.1: Samenstelling nettarieven gezin met elektriciteitsverbruik van 3500 kWh [1]

1.2.1 De nettarieven

De nettarieven bevatten de kosten voor het energietransport van producent tot consument. Hiermee worden de transmissiekosten voor het hoogspanningsnet, beheerd door Elia, betaald. Dit hoogspanningsnet verdeelt de elektriciteit tot aan de distributienetten die Fluvius beheert. Net als het hoogspanningsnet, worden ook de distributienetten vergoed met inkomsten uit de nettarieven.

Distributienettarieven worden jaarlijks vastgelegd door de Vlaamse regulator van de elektriciteits- en gasmarkt (VREG).

De nettarieven worden zowel voor energieverbruik als voor injectie op het net aangerekend. Het capaciteitstarief, dat in onderstaande paragraaf uitgelegd wordt, is hier een uitzondering op. Dit tarief is enkel geldig voor de afnamepieken [2].

Wat is het capaciteitstarief en waarom is dit nodig?

Het capaciteitstarief, geïntroduceerd op 1 januari 2023, vormt een nieuwe methode voor de berekening van een deel van de netwerkkosten. Dit tarief is een vaste kost, onafhankelijk van het totale elektriciteitsverbruik. De impact van het capaciteitstarief op de totale energiekost blijft voor de meeste huishoudens beperkt [1]. De bepaling van het capaciteitstarief varieert en is afhankelijk van twee factoren: de gebruikte meetmethode en de sociaaleconomische situatie van de consument.

Capaciteitstarief: situatie met digitale elektriciteitsmeter

Een digitale meter registreert het elektriciteitsverbruik per seconde. Uit deze gegevens wordt het gemiddelde vermogen per kwartier berekend. Maandelijks wordt vervolgens het hoogste kwartiervermogen bepaald. Dit kwartiervermogen heeft een ondergrens van 2.5 kW, waardoor alle gebruikers een minimumbijdrage leveren voor het gebruik van het elektriciteitsnet. Het uiteindelijke capaciteitstarief wordt vastgesteld door het gemiddelde te nemen van de hoogste kwartiervermogens over de afgelopen 12 maanden [1].

Capaciteitstarief: situatie met een analoge elektriciteitsmeter

Analoge meters zijn niet in staat kwartierpieken te registreren. Bij gebrek aan deze gegevens wordt voor analoge meters een vast bedrag aangerekend als capaciteitstarief. Dit bedrag is gelijk aan de minimumbijdrage van 2.5 kW die gebruikers met een digitale meter betalen [1].

Capaciteitstarief: situatie met sociaal tarief

Het capaciteitstarief is niet van toepassing op consumenten die in aanmerking komen voor het sociaal tarief [1].

1.2.2 De energiekost

De energiekost, bepaald door de leverancier, bestaat uit verschillende componenten. Ten eerste is er een vaste vergoeding voor administratieve diensten. Daarnaast is er de energiecomponent, die het grootste deel van de energiekost vormt. Deze is direct gecorreleerd met het verbruik en wordt uitgedrukt in EUR/kWh. Ten slotte zijn er de kosten voor groene stroom, opgelegd door de Vlaamse overheid vanwege klimaatdoelstellingen. Deze verschillende componenten samen vormen de totale energiekost voor de consument.

De kosten voor groene stroom kunnen door de leverancier geïntegreerd worden in de energiecomponent of apart worden aangerekend. In het laatste geval verschijnen ze op de factuur als een afzonderlijke kost [3].

Bij de keuze van een energiecontract moet de consument afwegen tussen de zekerheid van een vaste prijs en de mogelijkheid van lagere (maar ook potentieel hogere) prijzen bij variabele en dynamische contracten [3].

Vaste energiecomponent

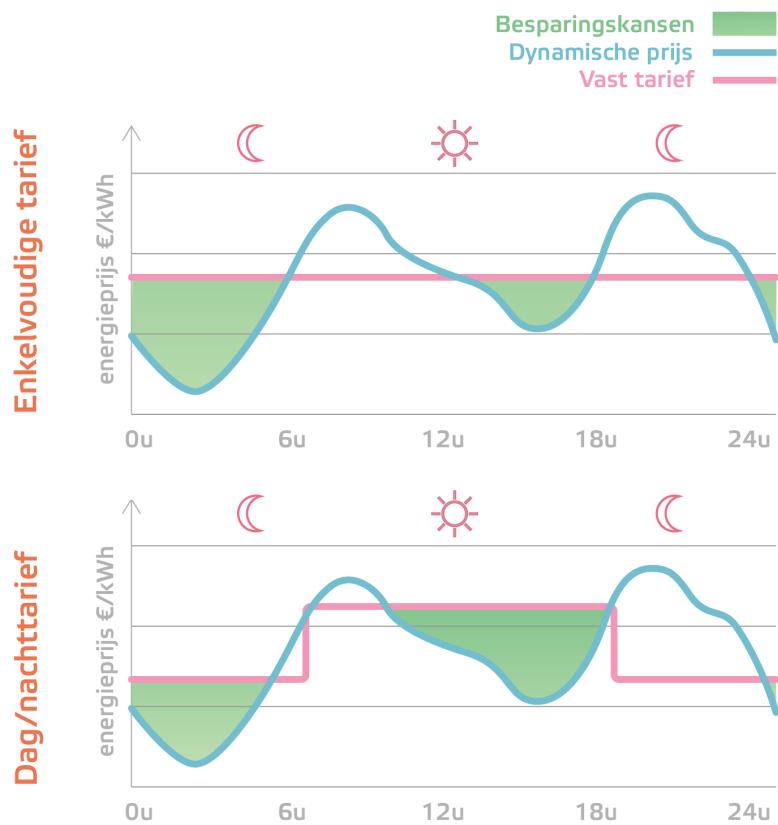
Een vast energietarief houdt in dat de energieprijs vast is over de volledige contracttermijn [3].

Variabele energiecomponent

Bij een variabel energietarief wordt de prijs vastgelegd per vooraf gekozen termijn, maandelijks of per kwartaal. De prijs is gebaseerd op de energiebeurzen. Op voorhand is niet gekend welke prijs wordt gebruikt gedurende de verschillende periodes [3].

Dynamische energiecomponent

Aangezien een digitale meter het energieverbruik continu monitort, is het mogelijk om verschillende prijzen per uur aan te bieden. Dit is wat bij een dynamisch tarief gebeurt. De prijzen worden dan bepaald aan de hand van de voorspelde vraag/aanbodverhouding. Gezien deze prijzen normaal gezien een dag op voorhand gekend zijn, kan de consument hier rekening mee houden. De bedoeling is dan de energie zoveel mogelijk te verbruiken wanneer de prijzen laag zijn. Er wordt wel verwacht dat de consument effectief rekening gaat houden met zijn verbruikspatroon bij een dynamisch energiecontract. Indien men tijdens de piekuren veel energie zou gebruiken en in de daluren niet is een vast of variabel tarief een betere keuze [4].



Figuur 1.2: Besparingskansen dynamisch tarief [5]

1.3 Verbruikers categoriseren voor energy scheduling

Vooraleer men elektrische verbruikers kan plannen, is het nodig om onderscheid te maken tussen de verschillende soorten. Er zijn verbruikers met een onderbreekbaar, niet-onderbreekbaar, gekend en flexibel verbruiksprofiel.

1.3.1 Onderbreekbare verbruikers

Onderbreekbare verbruikers kunnen gepauzeerd worden zonder dat dit een invloed heeft op de werking van het apparaat. Deze groep bevat bijvoorbeeld warmtepompen, laadpalen, thuisbatterijen, etc.

1.3.2 Niet-onderbreekbare verbruikers

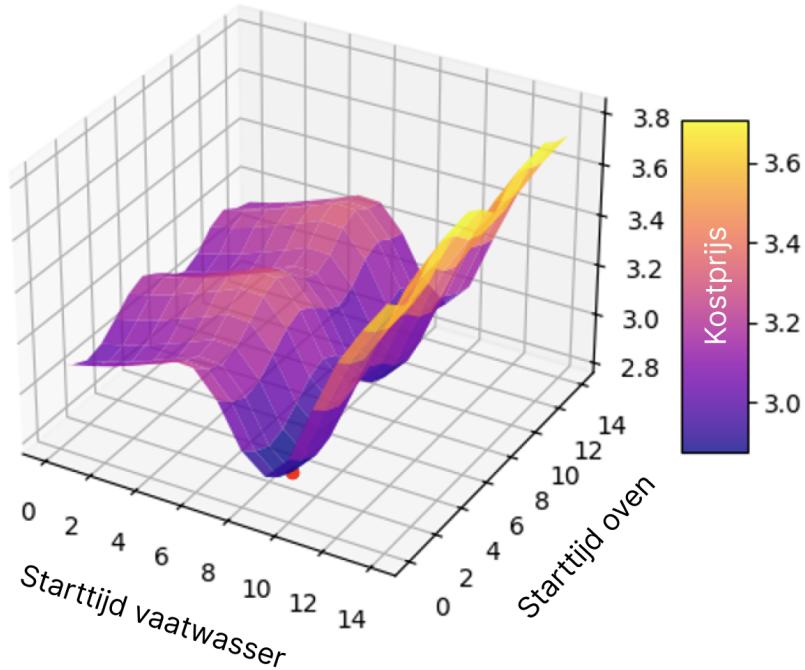
Niet-onderbreekbare verbruikers kunnen niet gepauzeerd worden, omdat dit een invloed zou kunnen hebben op de werking van het apparaat en het comfort van de gebruiker. Een oven, wasmachine, droogkast kunnen bijvoorbeeld in theorie wel onderbroken worden, maar kan voor ongemak bij de gebruiker zorgen. Bij een wasmachine die onderbroken wordt, is het mogelijk dat de persoon er geen last van heeft. Het programma zal bij onderbreking echter niet gewoon hervat kunnen worden, zonder dat bijvoorbeeld het water eerst opnieuw opgewarmd wordt. Daarnaast zijn er ook verbruikers zoals een tv, koffiemachine, etc. waarbij het helemaal niet wenselijk is om deze te onderbreken tijdens hun werking. Voor sommige van deze verbruikers, zoals een tv, zal het ook niet wenselijk zijn om deze überhaupt te plannen. Men moet hierbij enkel de starttijden van het apparaat bepalen in de planning. Wanneer men slechts 2 apparaten plant, is het mogelijk om de kostprijs t.o.v. deze starttijden te plotten zoals in figuur 1.3.

1.3.3 Verbruikers met een gekend verbruiksprofiel

Verbruikers met een gekend verbruiksprofiel kunnen bijvoorbeeld een wasmachine, droogkast en vaatwasser zijn. Om deze verbruikers te plannen is een start- en eindtijd te bepalen. Als het een apparaat is dat onderbroken kan worden, dan dienen ook de momenten van onderbreking bepaald te worden in de planning.

1.3.4 Verbruikers met een flexibel verbruiksprofiel

Verbruikers met een flexibel verbruiksprofiel zijn verbruikers zoals een warmtepomp, laadpaal, thuisbatterij, etc. waar het verbruiksprofiel aangepast kan worden op elk moment in de cyclus. Voor het plannen van deze verbruikers kan men naast de start- en eindtijd ook het vermogen op elk moment bepalen. Dit geeft veel vrijheid bij het plannen van deze verbruikers, wat resulteert in meer potentieel tot besparingen. Typisch zijn dit ook de grootverbruikers die een grote impact hebben op de energiefactuur.



Figuur 1.3: Verschillende starttijden voor twee niet onderbrekbare verbruikers met gekend verbruikaprofiel met bijhorende kostprijs

1.4 Bestaande scheduling systemen

In de praktijk bestaan er reeds systemen die energy scheduling toepassen. Enkele voorbeelden hiervan zijn laadpalen die het opladen van elektrische voertuigen plannen op basis van dynamische energieprijzen [6]. Daarnaast zijn er systemen ontwikkeld die verschillende soorten verbruikers plannen met het doel om zelf opgewekte energie optimaal te benutten.

Mogelijke verbeteringen

De huidige systemen richten zich steeds op specifieke toepassingen. Sommige focussen uitsluitend op het plannen van laadpalen, terwijl andere zich richten op het maximaliseren van zelfverbruik. Er bestaat echter nog geen compleet systeem dat diverse soorten verbruikers kan plannen, rekening houdt met dynamische energieprijzen, zelf opgewekte energie in de planning integreert, het capaciteitstarief in overweging neemt en dit alles visualiseert.

Hoofdstuk 2

Dataverzameling

Vooraleer men apparaten plant is volgende data nodig: de dynamische energieprijzen, de voorspellingen van de zonneopbrengst en de verbruiksprofielen van de te plannen apparaten.

Dynamische energieprijzen

De dynamische energieprijzen zijn normaliter een dag op voorhand beschikbaar. Deze data kan dagelijks verzameld worden bij de energieleverancier. Bij energieleverancier Eneco publiceren ze de prijzen voor de volgende dag op hun website [7]. De prijzen die door Eneco worden weergegeven zijn de EPEX-beursprijzen waaraan ze een dag op voorhand elektriciteit inkopen. Dit is niet de volledige energiecomponentprijs, maar is wel het enige deel dat per uur varieert. Naast de beursprijs die varieert worden er enkele vaste kosten bij opgeteld.

Voorspellingen zonne-energie

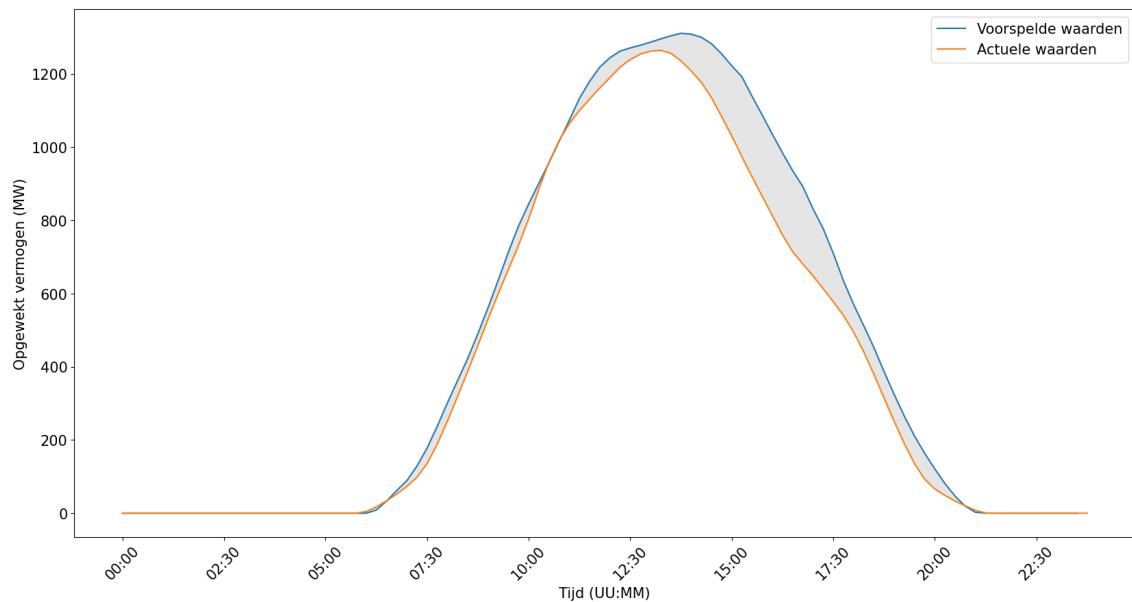
Voor systemen met zonnepanelen te plannen is kennis van de zonneopbrengst essentieel. Deze informatie wordt verkregen via voorspellingen, aangeboden door verschillende instanties. In deze analyse vergelijken we twee aanbieders: het Vlaamse energie- en klimaatagentschap en Elia.

Het Vlaamse energie- en klimaatagentschap [8] biedt uurlijkse voorspellingen van zonneopbrengst. Deze gegevens zijn beschikbaar per provincie en worden gegenereerd met behulp van software van 3E.

Elia daarentegen verstrekkt voorspellingen met een hogere resolutie van een kwartier, eveneens beschikbaar per provincie. Hun dienst onderscheidt zich door het aanbieden van meer actuele informatie, wat blijkt uit de totale gemonitorde omvormerscapaciteit die ze hanteren. Bovendien biedt Elia meerdere updates per dag en de mogelijkheid om voorspellingen achteraf te vergelijken met de werkelijke zonneopbrengst [9].

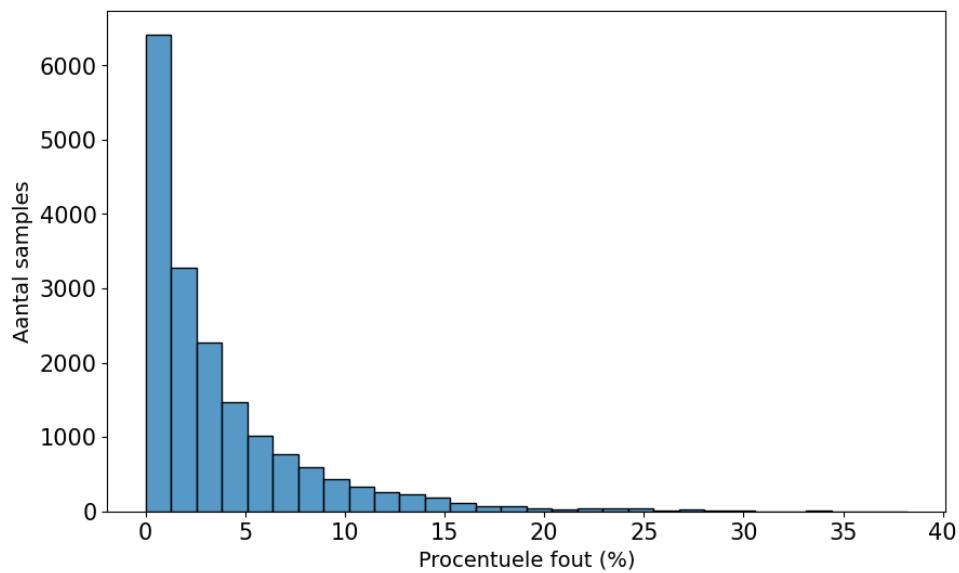
Na vergelijking is Elia de meest geschikte bron voor dit onderzoek. De hogere tijdsresolutie van Elia's voorspellingen verhoogt de nauwkeurigheid van de data. Daarnaast bieden de frequente updates en de mogelijkheid tot vergelijking met werkelijke opbrengsten een waardevol inzicht in de betrouwbaarheid van de voorspellingen.

Figuur 2.1 toont aan dat er weinig verschil is tussen de voorspelde en de reële zonne-energieproductie. Uiteraard is dit maar een momentopname van een dag waar duidelijk de volledige dag zon aanwezig was, wat de voorspelling een stuk eenvoudiger maakt. Wanneer het weer wisselvallig is het moeilijker accurate voorspellingen te maken.



Figuur 2.1: Voorbeeld van de zonne-energie voorspellingen van Elia

Wanneer alle voorspellingen van Elia van 2023 worden vergeleken met de actuele waarden, wordt een beter zicht over de algemene nauwkeurigheid van de voorspellingen verkregen. Bij ontleding van figuur 2.2 blijkt dat de gemiddelde fout over een volledig jaar tussen de voorspellingen die om 18:00 uur de dag ervoor worden vrijgegeven en de reële waarden zeer klein is, en exact 3,7 procent van het totale vermogen is. Gezien deze nauwkeurigheid zijn deze voorspellingen goed geschikt voor de planning van de apparaten.

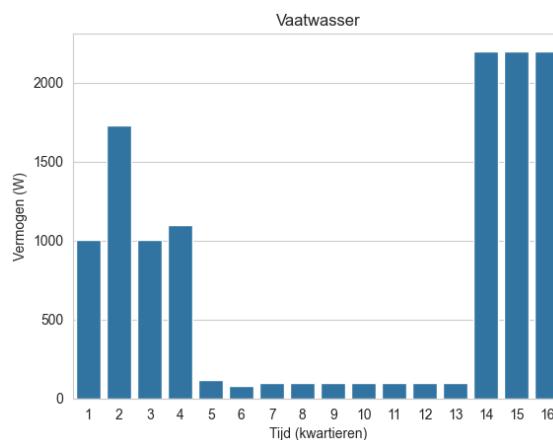


Figuur 2.2: Percentageafwijking van verwachte waarde t.o.v. gemonitorde capaciteit

Verbruiksprofielen apparaten

Naast de dynamische energieprijzen en de zonne-energievoorspellingen is het ook nodig om de verbruiksprofielen van de apparaten te kennen.

De meeste huishoudelijke apparaten hebben geen constant energieverbruik in hun werkingscyclus. Een vaatwasser moet eerst water opwarmen, wat veel energie vraagt. Vervolgens moet het water enkel rondgepompt worden wat minder energie vraagt, waarna de vaat gedroogd moet worden wat opnieuw meer energie vraagt. Een vaatwasser heeft dus geen constant verbruik, zoals te zien op figuur 2.3.



Figuur 2.3: Verbruik per kwartier voor een vaatwasser

Het is dus nodig om het verbruiksprofiel van apparaten in detail te kennen om een goede planning te kunnen maken. We kunnen zelf metingen uitvoeren indien we de planning willen afstemmen op een specifiek apparaat.

Er zijn echter ook openbare datasets beschikbaar waarin de verbruiksprofielen van verschillende apparaten zijn opgenomen. De domestic electricity demand dataset of individual appliances in Germany (DEDDIAG) [10] bevat de verbruiksprofielen van verschillende apparaten samen met bepaalde apparaatprogramma's. Er zijn voor deze dataset digitale stekkers gebruikt, die het verbruik van het te meten apparaat elke seconde naar een server sturen, waar de data worden opgeslagen.

Deze verbruiksprofielen kunnen eenvoudig uit een databank worden uitgelezen met een Python-script. Vervolgens kan de data worden omgezet van energie per seconde naar gemiddelde energie per kwartier.

Aangezien zowel de voorspellingen van de zonne-energie als het capaciteitstarief een resolutie hebben van een kwartier en de dynamische prijzen per uur worden vastgesteld, hanteren we in deze thesis tijdsintervallen van een kwartier om de consistentie en nauwkeurigheid in alle berekeningen en analyses te garanderen.

Hoofdstuk 3

Algoritme

3.1 Complexiteit van het plannen

Het optimaliseren van een huishoudelijk lastprofiel met dynamische energietarieven, capaciteitstarief en zonne-energie is een complex planningsprobleem. Het doel is de totale energiekosten te minimaliseren door het optimaal inplannen van huishoudelijke apparaten, rekening houdend met het capaciteitstarief, dynamische elektriciteitsprijzen, zonne-energieproductie en eventueel een thuisbatterij. Een optimale planning betekent dat alle apparaten zodanig zijn ingepland dat het niet mogelijk is een planning met lagere kosten te verkrijgen.

3.1.1 Planningscomplexiteit

In het eenvoudigste scenario, waarbij alleen de starttijden van apparaten met vooraf bekende verbruiksprofielen bepaald moeten worden, is het al snel onhaalbaar om via een brute-force methode (het overlopen van alle mogelijke combinaties) de optimale oplossing te vinden. Voor onderbreekbare apparaten kan de planning gezien worden als het inplannen van meerdere sub-apparaten. Bijvoorbeeld, als een apparaat 10 kW moet laden en dit over 4 tijdsloten kan gebeuren, moeten er 4 starttijden van elk een kwartier bepaald worden.

De complexiteit wordt aanzienlijk verhoogd door het capaciteitstarief. Dit tarief zorgt voor een exponentiële toename in het aantal mogelijke combinaties bij het plannen van meerdere apparaten, aangezien de capaciteitskost pas bepaald wordt nadat alle apparaten zijn ingepland, waardoor het probleem niet per apparaat opgesplitst kan worden. De optimale oplossing voor een individueel apparaat, namelijk inschakelen wanneer de prijzen het laagst zijn, leidt niet noodzakelijk tot de globaal optimale oplossing. Dit komt doordat het gecombineerde energieverbruik op deze tijdstippen kan resulteren in een hogere capaciteitskost.

3.1.2 Integratie van thuisbatterijen

De integratie van thuisbatterijen voegt een extra dimensie toe aan het optimalisatieprobleem. Batterijen kunnen gebruikt worden om overtollige zonne-energie op te slaan, maar het laden van de batterij met netenergie kan soms voordeliger zijn als deze energie later verbruikt of geïnjecteerd wordt wanneer de energieprijs hoger is. Om praktische redenen wordt er voor gekozen om geen energie van de batterij terug in het net te injecteren, aangezien deze energie de volgende dag nog gebruikt kan worden.

3.1.3 Modellering van de batterij

De modellering van de batterij brengt extra uitdagingen met zich mee. Voor een thuisbatterij met een omvormerscapaciteit van 5000 W kan de batterij met maximaal 5000 W op- of ont-laden worden. Een fijne granulariteit, bijvoorbeeld 1 W stappen, zou resulteren in tienduizend mogelijke toestanden per tijdstip, wat computationeel niet haalbaar is. Om de complexiteit te beheersen, wordt in dit model gekozen voor een vereenvoudigde benadering waarbij de batterij ofwel met vol vermogen wordt geladen, ofwel niet wordt geladen.

Deze complexiteit maakt het noodzakelijk om een algoritme te ontwikkelen dat efficiënt kan omgaan met de verschillende beperkingen en variabelen in het systeem.

3.2 Testscenario's

Om de performantie van het algoritme grondig te kunnen evalueren, werd besloten diverse testscenario's te ontwikkelen. Deze aanpak werd gekozen omdat de samenstelling van apparaten in een lastprofiel een aanzienlijke invloed kan hebben op de complexiteit van de optimalisatie.

Voor praktische simulaties moet gestart worden met een basislastprofiel. Dit profiel omvat alle verbruikers waarvoor het plannen niet wenselijk of praktisch haalbaar is. Hieronder vallen typisch apparaten met een moeilijk te verschuiven verbruikspatroon, zoals huishoudelijke verlichting, koelkast, diepvriezer en computers. De apparaten die men wel wenst te plannen worden dan bovenop dit basisprofiel gepland. Hoe meer apparaten we in het basisprofiel opnemen, hoe minder vrijheid er is om te plannen en dus hoe minder optimalisatiemogelijkheden.

In vele scenario's zal het basisprofiel het overgrote energieverbruik bevatten. Dit wil dan ook zeggen dat bij de optimalisatie het grootste deel van de kost aan een basisprofiel toe te wijzen is. Aangezien het relatieve verschil in totale kostprijs van de optimalisatie zal verwarten, wordt ervoor gekozen om de basisprofielen weg te laten uit de metingen en testscenario's zonder batterij.

Een basislastprofiel zal daarnaast voornamelijk uit lage verbruikswaarden bestaan, wat ervoor zorgt dat dit ook weinig effect heeft op het capaciteitstarief. De apparaten die men wil plannen zijn typisch grote verbruikers. Een vaatwasser zal bijvoorbeeld meestal de piek van een basisprofiel evenaren of overschrijden.

Basisprofielen weglaten zal weinig effect hebben op de complexiteit van de optimalisatie, aangezien deze basisprofielen opgemaakt zijn voor een volledige dag, wat inhoudt dat deze een vaste plaats hebben en niet gepland worden.

De toevoeging van een basislastprofiel in een scenario met een thuisbatterij die ook via het elektriciteitsnet kan worden opgeladen, vergroot de complexiteit van het optimalisatieprobleem aanzienlijk. Dit komt doordat het constante energieverbruik van het basislastprofiel de batterij meer kansen biedt om haar opgeslagen energie te ontladen en vervolgens weer op te laden, wat resulteert in een continu proces van laden en ontladen gedurende de dag.

Testinstantie generator

Aangezien er geen instanties bestaan om het ontwikkelde algoritme op te testen wordt er een instantiegenerator gemaakt.

De instantiegenerator maakt gebruik van een backlog aan profielen van waargenomen apparaatverbruiken, zonnepaneelopbrengsten en elektriciteitsprijzen. Batterijen worden hierin niet opgenomen, aangezien deze voor te stellen zijn met eenvoudige parameters. We stellen een batterij voor met een initiële laadstand, indien deze leeg is 0 kWh, en totale batterijcapaciteit van bijvoorbeeld 5 kWh en een omvormervermogen van bijvoorbeeld 2.5 kW. De generator neemt als input of we een instantie met of zonder zonnepanelen willen, welk type dag, welk type energieprofiel en hoeveel apparaten men wil plannen.

Eens de inputparameters meegegeven zijn worden de apparaten getagd met een piekverbruik, tijdsduur en een variabiliteit. De apparatenprofielen die langer duren dan een halve dag worden weggefilterd uit de testsets. Deze apparaten mogen weggelaten worden omdat bij apparaten met lange tijdsduur t.o.v. de totale tijdsduur het aantal mogelijke starttijdcombinaties sterk wordt gereduceerd.

Na het taggen van de apparaten worden er diverse apparaatinstanties aangemaakt.

Apparaatinstantie a

In deze instantie wordt er gesorteerd op basis van hoog naar laag piekvermogen en standaarddeviatie, wat aangeeft hoe gespreid de kwartiervermogens van een apparaat zijn. Er worden apparaten met uiteenliggende piekverbruiken en standaarddeviatie geselecteerd.

Apparaatinstantie b

In deze instantie wordt er op dezelfde manier gesorteerd als in instantie a. Om de instantie op te maken worden ook uiteenliggende piekverbruiken gebruikt, maar met kleine standaarddeviaties.

Apparaatinstantie c

In deze instantie wordt enkel gesorteerd op standaarddeviatie en worden de apparaten met de grootste standaarddeviaties eerst toegevoegd.

Apparaatinstantie d

In deze instantie wordt enkel gesorteerd op de standaarddeviatie zoals in instantie c, maar worden de kleinste standaarddeviaties eerst toegevoegd.

Willekeurige apparaatinstantie

In deze instantie kiezen we willekeurige apparaten om toe te voegen.

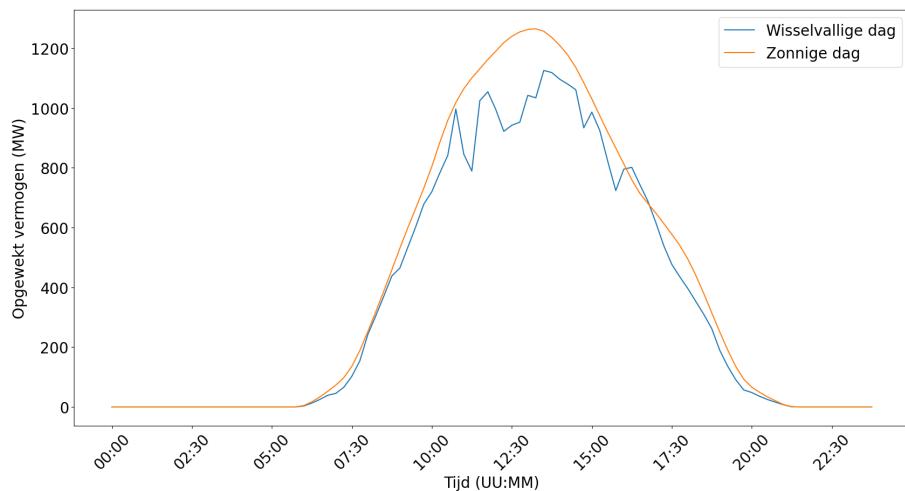
Energieprijs

Nu alle apparaten gekozen zijn, moet er een dynamisch energieprijsprofiel gekozen worden. Wanneer een energieprijsprofiel grote pieken en dalen bevat zien we dat de pieken ongunstig zijn om apparaten te gaan plannen vanwege hun hoge prijs. Daardoor kunnen deze tijdssloten grotendeels genegeerd worden in het plannen. Dit leidt er toe dat prijsprofielen met pieken makkelijker te plannen zijn dan profielen die weinig tot geen pieken bevatten. Om deze pieken waar te nemen wordt de standaarddeviatie van de kostprijzen genomen. Hoe groter deze is, hoe meer pieken en dalen er zijn.

Zonneopbrengst

Als we zonnepanelen opnemen in de optimalisatie, is een zonneopbrengstprofiel nodig. Voor het categoriseren van zonneopbrengstprofielen wordt een verschil gemaakt tussen zonnige dagen met weinig bewolking en wisselvallige dagen, wat voor meer pieken zorgt. Bewolkte dagen worden in deze thesis niet opgenomen aangezien het effect hiervan vergeleken kan worden met een instantie zonder zonnepanelen.

Voor deze categorisatie worden alle verschillen tussen opeenvolgende waarden opgeteld en vermindert met 2 keer het piekvermogen van de zonneopbrengst. Wanneer er slechts één keer een piek bereikt wordt zoals de zonnige dag op figuur 3.1 bekomen we een waarde dicht bij nul. Bij meerdere pieken en onregelmatigheden op wisselvallige dagen bekomen we grote waarden.

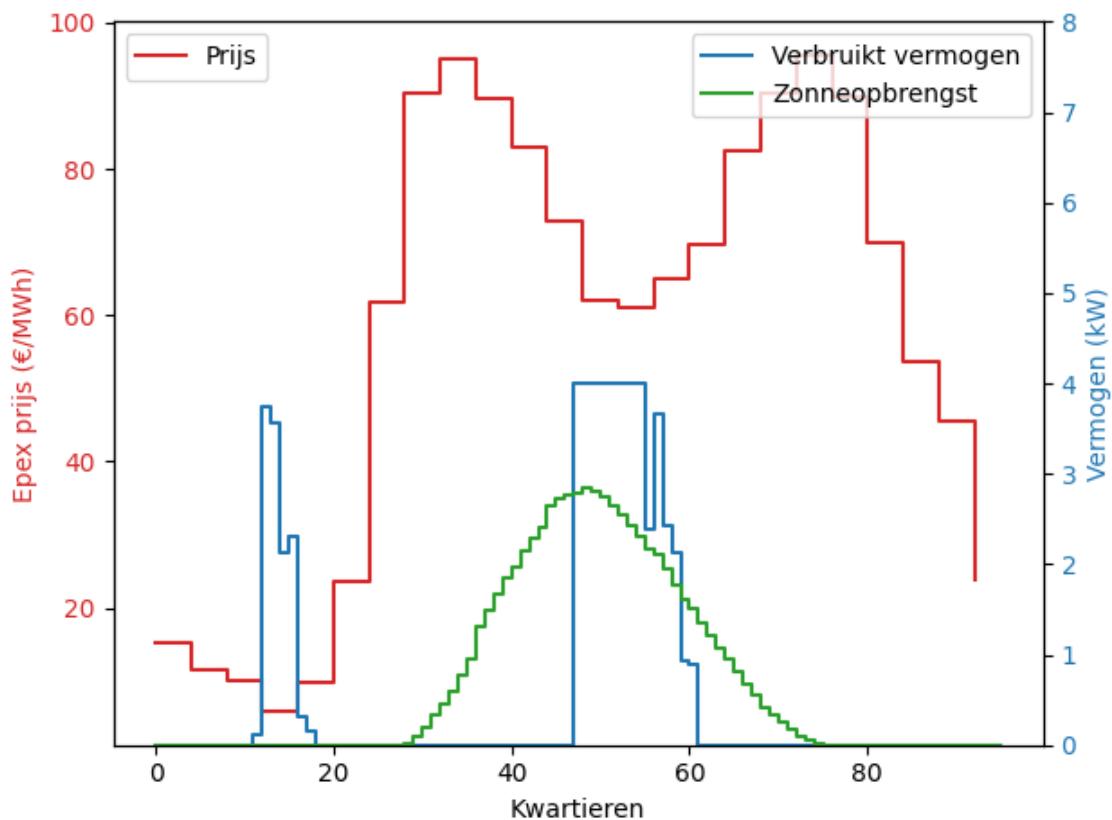


Figuur 3.1: Opgewekte zonne-energie zonnige en wisselvallige dag

3.2.1 Oplossingsvisualisatie

Om een inzicht te krijgen in de gemaakte optimalisatie per instantie, is het belangrijk om deze uitkomsten grafisch weer te geven. Op deze manier kunnen makkelijk patronen herkend worden van verschillende scenario's.

Figuur 3.2 toont een voorbeeldoplossingsvoorstelling. De rode lijnen tonen de dynamische beursprijs aan. De blauwe lijn toont het totaal verbruikte vermogen op elk moment. De groene lijn toont de zonneopbrengst op elk moment aan. Op de verticale as staat de EPEX-beursprijs, wat de dynamische marktprijs is. Op de horizontale as staan alle tijdssloten.



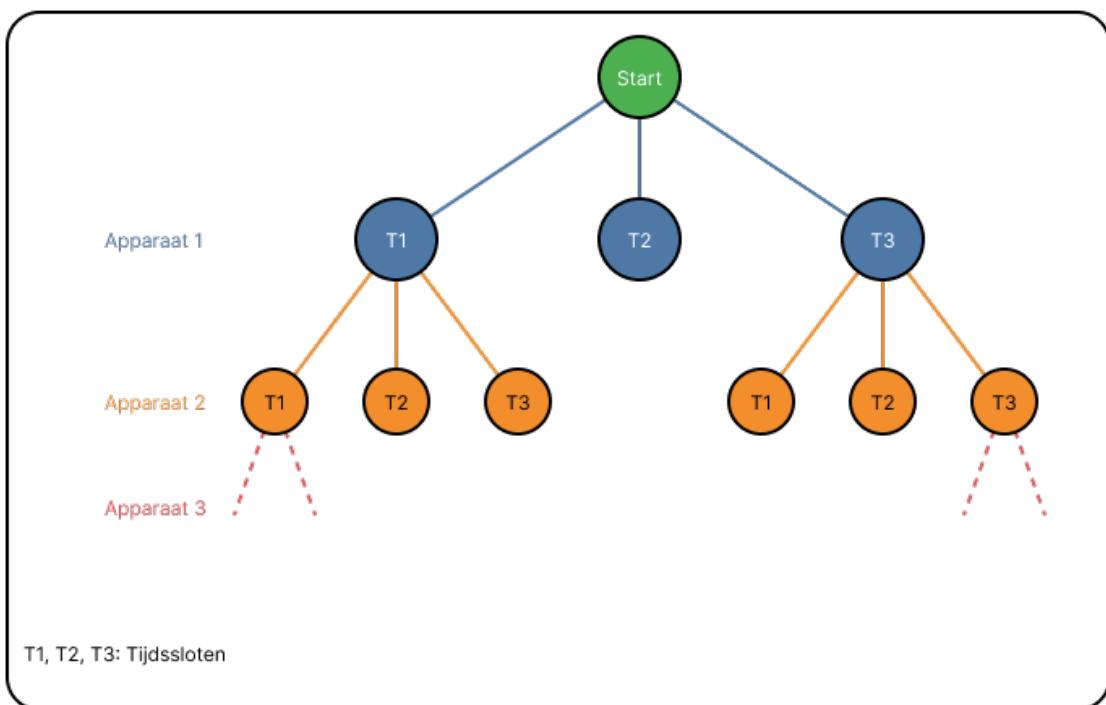
Figuur 3.2: Voorbeeld visualisatie van gepland elektriciteitsverbruik met zonnepanelen en 5 apparaten

3.3 Implementatie algoritme

3.3.1 Brute force

3.3.1.1 Starttijden apparaten

Voor eenvoudige scenario's met beperkte omvang kan brute force gebruikt worden, wat inhoudt dat we alle mogelijke starttijden per apparaat overlopen. We hebben gekozen voor een boomstructuur om de mogelijke combinaties te overlopen, zoals geïllustreerd in Figuur 3.3. We definiëren n als het aantal te plannen apparaten en k als het aantal mogelijke tijdstippen waarop elk apparaat kan starten.

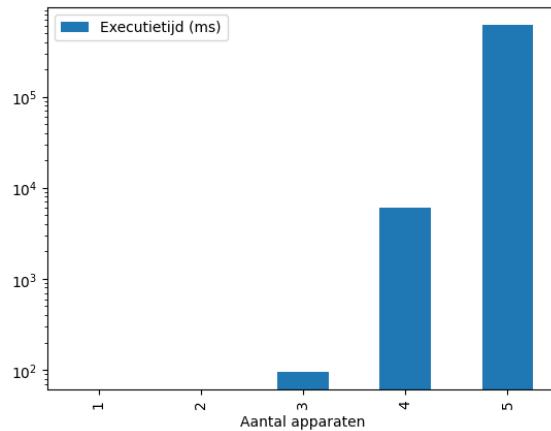


Figuur 3.3: Binaire boom schedulingsprobleem

We gebruiken voor elk van de n apparaten een lus die alle k mogelijke starttijden nagaat. Deze lussen zijn in elkaar genest, wat resulteert in een exponentiële tijdscomplexiteit:

$$O(k^n)$$

Aangezien het aantal mogelijke berekeningen exponentieel toeneemt met het aantal apparaten, is de brute force methode ongeschikt voor grote problemen. Ter illustratie van deze beperking hebben we gemeten dat een instantie met slechts 5 apparaten al 10 minuten rekentijd vergt, zoals aangegeven in Figuur 3.4.

**Figuur 3.4:** Brute force timing

3.3.1.2 Batterijen en andere regelbare apparaten

De optimalisatie van het batterijgebruik is niet zo eenvoudig als simpelweg energie opladen wanneer er te veel is aan zonne-energie en deze afgeven wanneer nodig. Vanwege de dynamische energieprijzen is het namelijk ook mogelijk dat de prijs laag is in de namiddag en zeer hoog laat in de avond. Dit maakt mogelijk dat het meest kostenefficiënte batterijgebruik is om de batterij in de namiddag volledig op te laden en vervolgens de opgeslagen energie 's avonds, wanneer de kosten veel hoger zijn, te verkopen, in plaats van te kiezen voor maximaal zelfverbruik. Aangezien we planningen maken per dag is het echter niet nuttig om de batterij in de avond volledig te legen, daarom wordt ervoor gekozen om geen energie van de batterij in het net te injecteren.

Het is ook belangrijk om rekening te houden met de verliezen die optreden bij een thuisbatterij. Men zal nooit de energie die in de batterij opgeslagen wordt er volledig uit kunnen halen, er treden onder andere verliezen op bij de omzetting tussen gelijk- en wisselspanning.

Om optimaliteit te garanderen, moeten we dus ook alle mogelijke batterijsenario's overlopen. De complexiteit hiervan hangt af van de batterij- en omvormerspecificaties, zoals de totale capaciteit in kWh en de maximale energie die de batterij kan laden en ontladen.

Wanneer een granulariteit ingesteld wordt op het omvormervermogen van de batterij, bijvoorbeeld 100 W is het onmogelijk om alle combinaties uit te rekenen. Door het teveel aan combinaties kiezen we zoals eerder vermeld om ofwel de batterij volledig op te laden ofwel niet.

Zelfs bij deze granulariteit waarbij volledig opgeladen wordt of niet zijn er $O(n^{96})$ mogelijkheden waarbij n het aantal mogelijke oplaadstaten per kwartier zijn. In dit scenario zijn er dus

$$2^{96} = 7,9 * 10^{28}$$

mogelijkheden voor enkel de batterij. Bij deze combinaties moet het schedulen van de apparaten nog opgeteld worden. Het is dus onmogelijk om alle combinaties volledig door te rekenen zonder ongunstige delen van de oplossingen weg te snijden. Bovendien zal de grote meerderheid van deze oplossingen niet geldig zijn, aangezien de batterij vaak te ver ontladen of opgeladen zal worden zonder geldigheidscontrole.

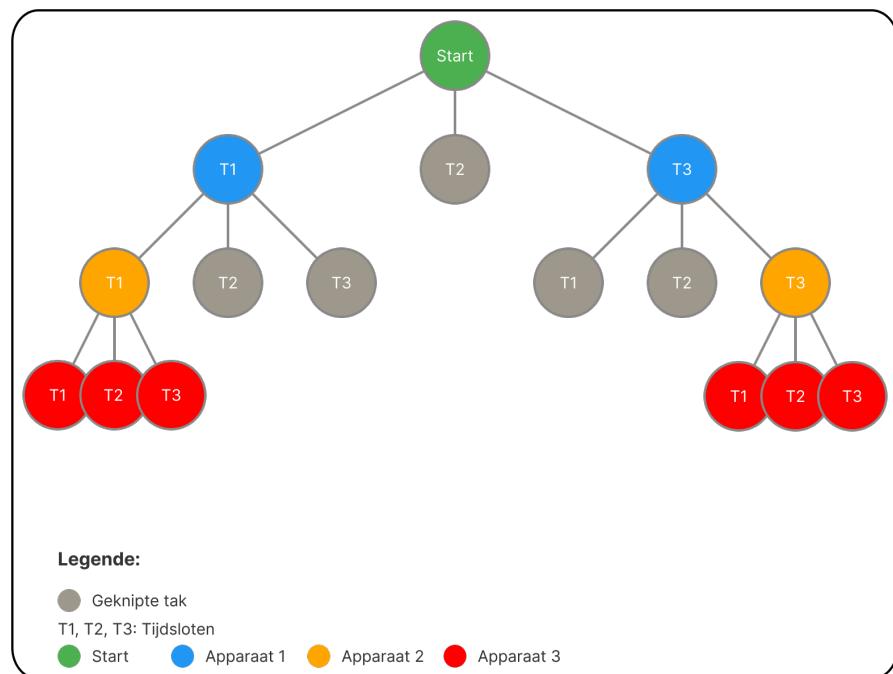
3.3.2 Branch and bound algoritme

Branch and bound is een algoritme dat wordt gebruikt om optimalisatieproblemen efficiënt op te lossen. In tegenstelling tot de eerder besproken brute force methode, die alle mogelijke oplossingen doorzoekt en daardoor snel onhaalbaar wordt voor grotere problemen, wordt met branch and bound op een intelligentere manier te werk gegaan.

3.3.2.1 Werking van het algoritme

Het basisidee achter branch and bound is om de zoektocht naar de optimale oplossing te versnellen door het probleem systematisch op te splitsen in kleinere deelproblemen. Deze deelproblemen worden één voor één onderzocht, maar op een manier die ervoor zorgt dat grote delen van de zoekboom die zeker niet tot de optimale oplossing leiden, vroegtijdig kunnen worden uitgesloten zoals in Figuur 3.5. De uitgesloten oplossingen worden dan uit de boom gehaald door de verbindingen ook gekend als takken weg te knippen.

In het ontwikkelde algoritme voor de optimalisatie van huishoudelijke lastprofielen passen we branch and bound toe om de beste starttijden voor de verschillende apparaten te bepalen. We beginnen met een lege oplossing, wat betekent dat er nog geen apparaten ingepland zijn. Vervolgens voegen we de apparaten één voor één toe aan de planning, waarbij we voor elk apparaat de mogelijke starttijden evalueren. Dit is het branch gedeelte van het algoritme, waarbij we als het ware een boomstructuur van mogelijke oplossingen opbouwen.



Figuur 3.5: Binaire boom met afgeknipte takken

3.3.2.2 Berekening van grenzen

Het berekenen van goede boven- en ondergrenzen is noodzakelijk voor de efficiëntie van het branch and bound algoritme. Goede grenzen zorgen ervoor dat grote delen van de zoekboom snel uitgesloten kunnen worden.

Initiële bovengrens Om een goede initiële bovengrens te bepalen, starten we niet zomaar bij de eerst mogelijke starttijd voor elk apparaat. In plaats daarvan berekenen we eerst een oplossing door de apparaten slim te verdelen over de beschikbare tijdsperiode. Hiervoor splitsen we de tijdsperiode op in evenveel intervallen als er apparaten zijn. Vervolgens wijzen we elk apparaat toe aan een interval en zoeken binnen dat interval naar het tijdsinterval met de laagste energieprijs voor dat specifieke apparaat. Dit tijdsinterval wordt dan gekozen als de starttijd voor het apparaat in de initiële oplossing.

Hoewel dit niet altijd de beste oplossing oplevert, geeft het wel een indicatie en stelt het ons in staat om vanaf het begin delen van de zoekboom uit te sluiten. Deze initiële bovengrens is niet altijd even scherp als de bovengrens die in de eerste iteraties van het branch and bound algoritme zelf berekend wordt, maar kan in sommige gevallen toch bijdragen aan de efficiëntie.

Ondergrens De ondergrens speelt een grote rol bij het uitsluiten van suboptimale deeloplossingen. De manier waarop deze ondergrens berekend wordt, hangt af van de aanwezigheid van zonnepanelen en een thuisbatterij.

Als er geen zonnepanelen en thuisbatterij zijn, kan de ondergrens eenvoudig bepaald worden door voor elk apparaat de goedkoopste starttijd te kiezen en deze kosten op te tellen. Eventuele bijkomende kosten door het overschrijden van de capaciteitslimiet worden hier nog aan toegevoegd. Het is onmogelijk om lager dan deze prijs te gaan, gezien zonder capaciteitstarief dit altijd in de optimale oplossing resulteert.

Met zonnepanelen maar zonder thuisbatterij moet bij het bepalen van de goedkoopste starttijd voor elk apparaat rekening gehouden worden met de beschikbare zonne-energie. Extra capaciteitskosten kunnen nu niet meer eenvoudig worden toegevoegd, omdat de zonne-energie de verbruikspiek kan reduceren.

Wanneer er zowel zonnepanelen als een thuisbatterij aanwezig zijn, moet ook de potentiële winst door slim gebruik van de batterij worden meegenomen in de ondergrens. Hiervoor wordt de maximale winst die de batterij kan opleveren gebaseerd op de reeds geplande apparaten afgetrokken van de ondergrens zoals berekend in het scenario met enkel zonnepanelen. Deze aangepaste ondergrens is minder sterk, maar houdt rekening met alle aspecten van het probleem.

3.3.2.3 Optimalisatie door slim sorteren

Een laatste techniek om de efficiëntie van het branch and bound algoritme te verhogen is het slim sorteren van de apparaten voordat ze ingepland worden. Uit experimenten in tabel 3.1 blijkt dat het meestal best is om de apparaten te sorteren op dalend totaal energieverbruik. Op die manier zorgen de eerste apparaten die ingepland worden voor grotere verschillen in de bovengrens, wat leidt tot het sneller kunnen snoeien van suboptimale takken. Naast de tijd die het duurt om de optimale oplossing te bekomen zijn het aantal doorlopen nodes weergegeven, het aantal nodes stelt het aantal combinaties voor. Op Figuur 3.5 zijn de nodes weergegeven door de bolletjes. Hoe minder nodes er zijn hoe meer takken er gesnoeid zijn.

8 apparaten	Gemiddeld vermogen		Totaal vermogen		Piekvermogen	
	Tijd (s)	Nodes	Tijd (s)	Nodes	Tijd (s)	Nodes
testinstantie a	1.2	27612	0.4	4944	0.6	8599
testinstantie b	0.1	430	0.1	368	0.1	430
testinstantie c	3.4	37086	3.5	37086	12.0	114618
testinstantie d	56.8	905572	21.0	370535	23.5	387678
testinstantie e	0.3	3355	0.3	2658	0.5	4124

Tabel 3.1 Vergelijking van sorteercriteria aan de hand van resultaten voor fluctuerende prijzen, 11 mei zonne-instantie, zonder thuisbatterij

In sommige gevallen, vooral wanneer er een apparaat is met een zeer hoge verbruikspiek die een groot effect heeft op de capaciteitskosten, kan het beter zijn om te sorteren op piekvermogen in plaats van totaal vermogen. Maar over het algemeen, zeker wanneer er ook een thuisbatterij en zonnepanelen zijn die pieken kunnen afvlakken, blijft sorteren op totaal verbruik de beste keuze.

3.3.2.4 Integratie van thuisbatterijen

De toevoeging van een thuisbatterij aan het systeem vergroot de complexiteit van het optimalisatieprobleem aanzienlijk. Batterijen kunnen gebruikt worden om overtollige zonne-energie op te slaan, maar het kan soms voordeliger zijn om de batterij op te laden met energie van het net als deze energie later verbruikt wordt wanneer de prijs hoger is.

Wanneer een thuisbatterij wordt toegevoegd in het branch and bound algoritme, worden na het bepalen van alle starttijden van de apparaten, alle geldige batterijsenario's doorlopen. Deze stap gebeurt aan het einde van de zoekboom, omdat niet alle geldige batterijsenario's mogelijk zouden zijn als de apparaten nog niet zijn ingepland. Door de apparaten eerst in te plannen, kan de batterij opnieuw worden opgeladen nadat er capaciteit is vrijgemaakt door de batterij te ontladen.

Bij het berekenen van de batterijsenario's is er een initiële energie-inhoud, die we in deze thesis telkens op 0 kWh instellen. Vervolgens is er de maximale batterijcapaciteit, die de maximale hoeveelheid energie definieert die de batterij kan opslaan. Zodra deze grens is bereikt, kan de batterij niet verder worden opgeladen.

De efficiëntie van de batterij geeft aan hoeveel procent van de energie verloren gaat bij het laad- en onlaadproces. Als bijvoorbeeld over een periode 5 kWh naar de batterij wordt gestuurd, zal bij een efficiëntie van 90 % slechts 4,5 kWh effectief in de batterij terechtkomen. Bij het ontladen blijft er dan nog maar 4,05 kWh over.

3.4 Gegenereerde testinstanties

Alle gemeten waarden worden in dit hoofdstuk weergegeven en besproken, voor de besprekking wordt steeds gebruikgemaakt van de grootste instanties met 10 apparaten tenzij het anders vermeld is. In de tabel wordt bijvoorbeeld instantie 6_a aangehaald, dit betekent dat instantie a zoals in het deel over de testinstantie generator uitgelegd wordt, gebruikt is met 6 apparaten. Alle prijzen die weergegeven worden op de lastprofielen zijn EPEX-beursprijzen. Alle genoteerde upper bounds zijn optimale kosten en kunnen dus niet verder verlaagd worden.

3.4.1 Fluctuerende dynamische prijzen, veel zonne-energie, geen thuisbatterij

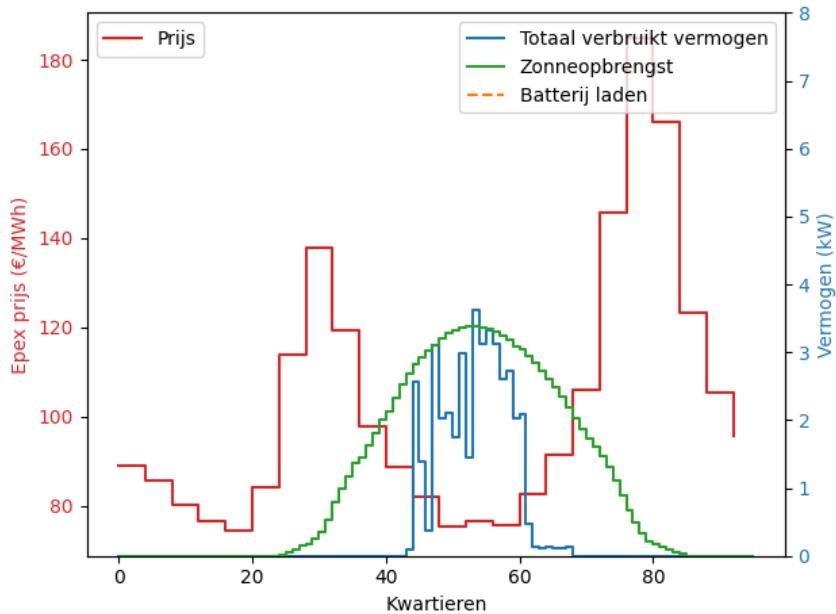
	Geen partial lowerbounds		Partial lowerbounds		
	Upper bound	Tijd (s)	Nodes	Tijd (s)	Nodes
6_a	0,8756	0,1	877	0,0	394
6_b	2,4613	0,0	138	0,0	124
6_c	1,9948	0,1	386	0,0	239
6_d	-0,7094	0,4	5155	0,0	158
6_e	-0,6682	0,7	11695	0,0	152
8_a	0,9165	0,4	4944	0,1	570
8_b	2,4954	0,1	368	0,0	309
8_c	3,8106	3,6	37086	0,3	4597
8_d	-0,6755	21,8	370535	0,0	305
8_e	1,3592	0,3	2658	0,1	731
10_a	2,4491	1,3	8496	0,1	1226
10_b	4,9989	0,6	3862	0,2	2571
10_c	4,0894	10,3	78969	0,9	13279
10_d	-0,6754	637,8	8818271	0,0	210
10_e	5,1057	5,8	430745	0,9	11541

Tabel 3.2 Fluctuerende prijs, zonnige dag, geen thuisbatterij

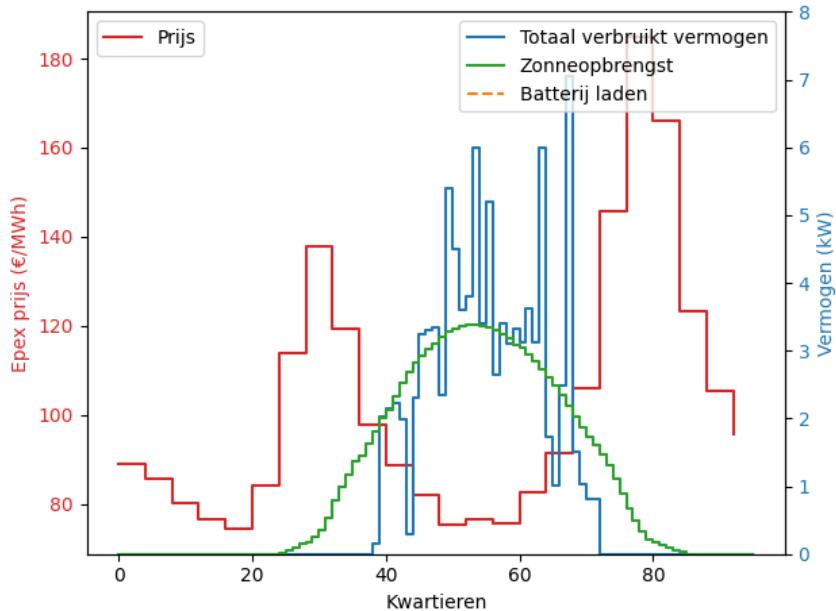
Wanneer de kleinste en grootste tijdmetingen uit tabel 3.2 vergeleken worden, valt het op dat voor de snelste instantie zo goed als alle apparaten op zonne-energie werken zoals Figuur 3.6 toont. Bij de traagste instantie zijn er veel pieken die de zonneopbrengst overtreffen zoals Figuur 3.7 toont. Wanneer het verbruik de zonneopbrengst overschrijdt loopt de energiekost op waardoor tijdssloten met goedkope energieprijzen buiten de zonneopbrengstcurve tot be-

tere prijzen kunnen leiden. Het interessanter worden van deze tijdssloten zorgt ervoor dat er meer tijdssloten geëxplorerd worden door het algoritme, wat tot een grotere rekentijd leidt.

3.4.1.1 Lastprofielen



Figuur 3.6: Lastprofiel 10_d fluctuerende dynamische prijs, veel zonne-energie zonder batterij



Figuur 3.7: Lastprofiel 10_c fluctuerende dynamische prijs, veel zonne-energie zonder batterij

3.4.2 Fluctuerende dynamische prijzen, weinig zonne-energie, geen thuisbatterij

	Geen partial lowerbounds			Partial lowerbounds		
	Upper bound	Tijd (s)	Nodes		Tijd (s)	Nodes
6_a	2,1011	0,8	9888		0,2	4268
6_b	10,766	0,4	3549		0,1	2273
6_c	7,3992	0,2	1832		0,1	677
6_d	1,8809	0,0	62		0,0	50
6_e	2,1011	0,0	340		0,0	172
8_a	4,9901	4,4	54126		1,1	19919
8_b	11,1694	1,3	13837		0,4	6382
8_c	11,8975	80,6	905078		7,4	159711
8_d	1,936	0,0	409		0,0	180
8_e	6,598	0,5	3354		0,1	1724
10_a	9,6437	2421,0	24136706		256,3	4520310
10_b	16,668	2544,0	25827457		160,7	2753724
10_c	13,48	10360,0	112293847		499,8	8496478
10_d	2,1922	0,6	3836		0,1	974
10_e	x	x	x		x	x

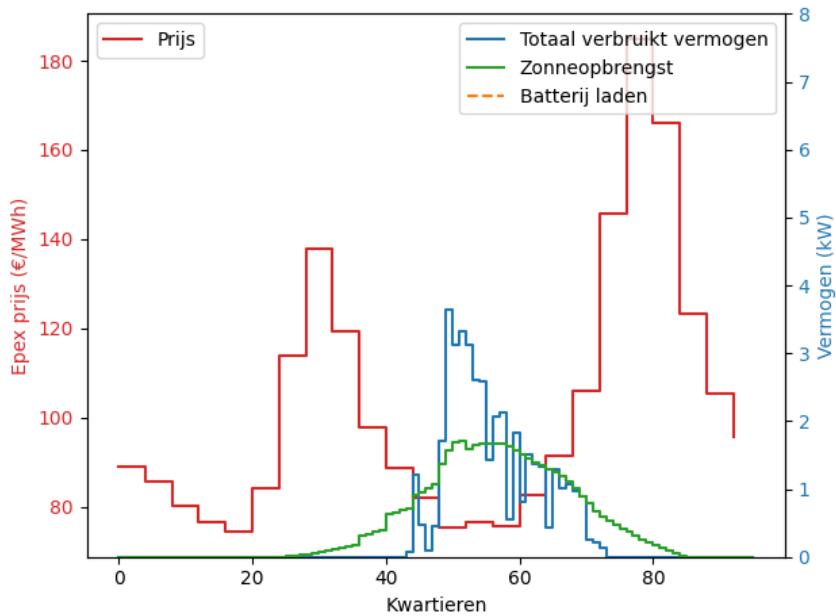
Tabel 3.3 Fluctuerende prijs, wisselvallige dag, geen thuisbatterij

Wanneer tijdmetingen van tabel 3.3 vergeleken worden, valt het op dat net zoals bij tabel 3.2, bij de traagste instantie zo goed als alle apparaten op zonne-energie werken zoals in figuur 3.8 te zien is.

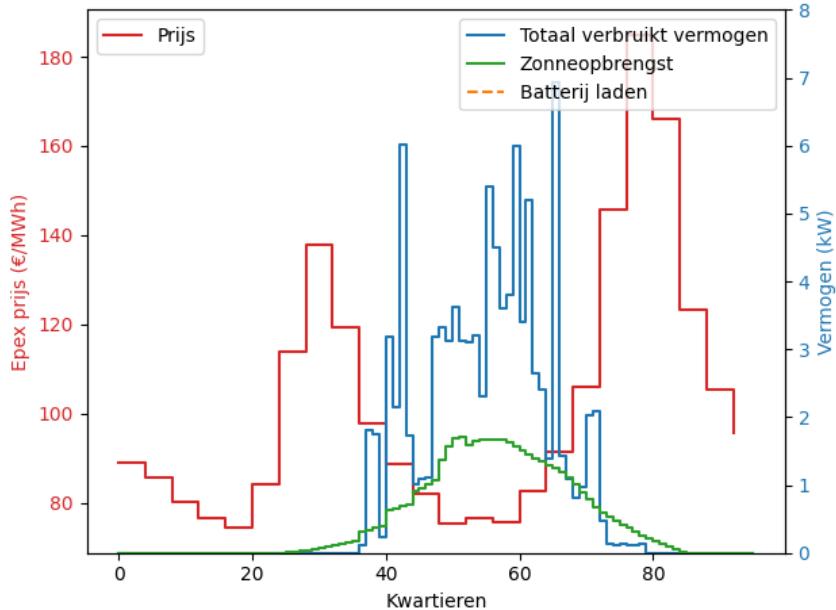
Bij de traagste instantie zijn er opnieuw veel pieken die de zonneopbrengst overtreffen zoals te zien op figuur 3.9.

Het valt op dat het optimaliseren van de instanties in tabel 3.3 langer duurt als in tabel 3.2. Gezien de mindere zonneopbrengst zullen er nog meer pieken overschreden worden als bij tabel 3.2 wat voor een nog langere rekentijd zorgt.

Lastprofielen



Figuur 3.8: Lastprofiel 10_d fluctuerende dynamische prijs, weinig zonne-energie zonder batterij



Figuur 3.9: Lastprofiel 10_c fluctuerende dynamische prijs, weinig zonne-energie zonder batterij

3.4.3 Constante dynamische prijzen, veel zonne-energie, geen thuisbatterij

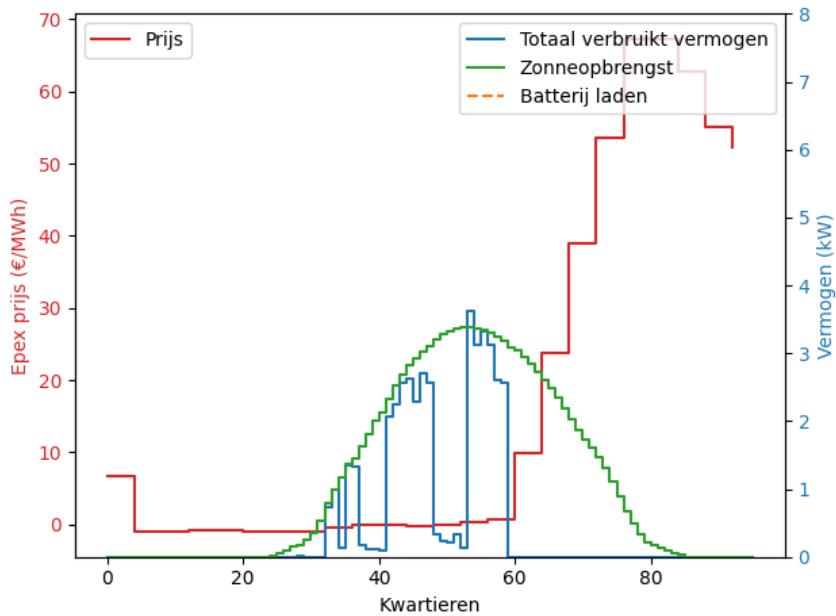
	Geen partial lowerbounds			Partial lowerbounds		
	Upper bound	Tijd (s)	Nodes	Tijd (s)	Nodes	
6_a	0,9169	0,1	543	0,0	259	
6_b	1,8315	0,0	72	0,0	69	
6_c	1,635	0,0	233	0,0	129	
6_d	-0,0666	0,0	7	0,0	7	
6_e	-0,0672	0,0	7	0,0	7	
8_a	0,9169	0,1	553	0,0	269	
8_b	1,8324	0,0	83	0,0	78	
8_c	2,7444	3,1	31714	0,3	4904	
8_d	-0,0667	0,0	9	0,0	9	
8_e	1,1782	0,1	286	0,0	170	
10_a	1,85413	1,0	4958	0,1	1350	
10_b	3,383	0,5	2169	0,2	1760	
10_c	2,86	6,1	47976	0,7	9768	
10_d	-0,0668	0,0	18	0,0	18	
10_e	3,5418	5,3	38230	1,0	13997	

Tabel 3.4 Constante prijs, zonnige dag, geen thuisbatterij

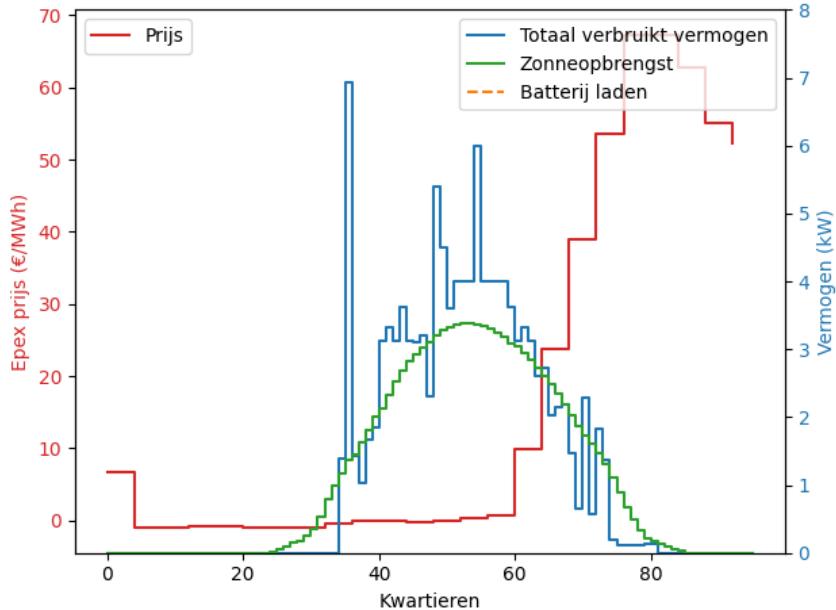
De kleinste tijdsmaat van tabel 3.4 heeft net zoals bij de andere tabellen een verbruik dat bijna volledig uit zonne-energie bestaat zoals te zien in figuur 3.10.

De instantie met de hoogste optimalisatietijd, te zien in figuur 3.11 bestaat uit enkele hoge energiepieken die ver boven de zonneopbrengst uitschieten.

Lastprofielen



Figuur 3.10: Lastprofiel 10_d relatief constante dynamische prijs, veel zonne-energie zonder batterij



Figuur 3.11: Lastprofiel 10_e relatief constante dynamische prijs, veel zonne-energie zonder batterij

3.4.4 Constante dynamische prijzen, weinig zonne-energie, geen thuisbatterij

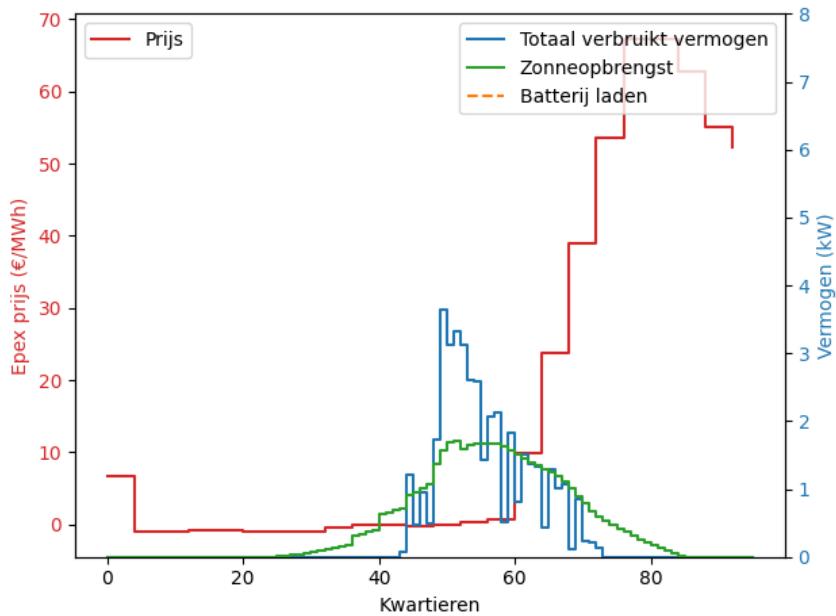
	Geen partial lowerbounds		Partial lowerbounds		
	Upper bound	Tijd (s)	Nodes	Tijd (s)	Nodes
6_a	3,2417	0,7	7916	0,2	3851
6_b	7,258	0,4	3259	0,1	2021
6_c	5,0418	0,2	1569	0,0	627
6_d	1,3747	0,0	34	0,0	34
6_e	1,5012	0,0	118	0,0	92
8_a	3,3761	2,5	23371	0,7	11683
8_b	7,5264	1,2	10674	0,4	5821
8_c	8,0305	102,0	1149393	8,3	182415
8_d	1,3935	0,0	141	0,0	103
8_e	4,4826	0,4	2363	0,1	1410
10_a	6,4713	1883,0	18244049	226,4	3932756
10_b	11,025	987,0	9393465	102,1	1653218
10_c	x	x	x	x	x
10_d	1,534	0,3	1331	0,1	528
10_e	x	x	x	x	x

Tabel 3.5 Constante prijs, wisselvallige dag, geen thuisbatterij

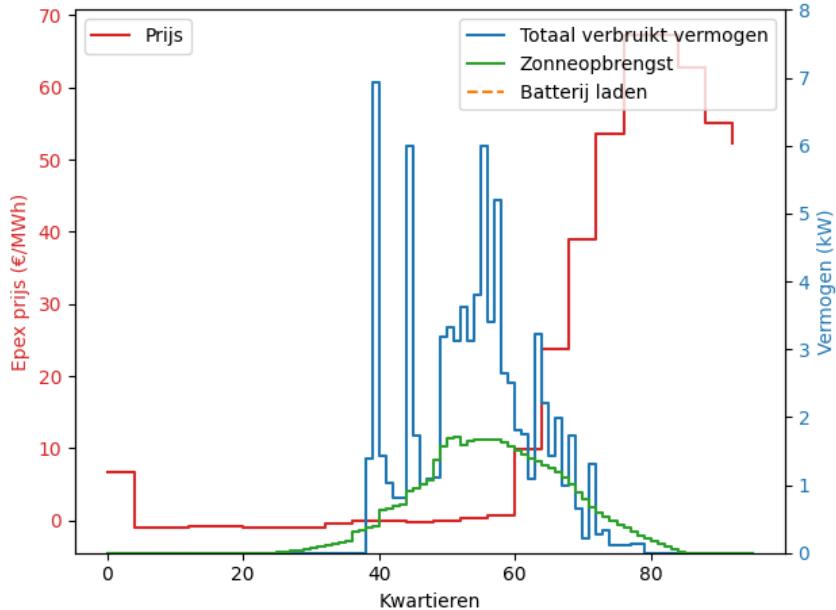
De instantie met de kleinste optimalisatietijd van tabel 3.5 heeft opnieuw een verbruik dat grotendeels uit zonne-energie bestaat zoals te zien in figuur 3.10.

De instantie met de hoogste optimalisatietijd, te zien in figuur 3.10 heeft een verbruik met vele pieken en overschrijdt de opgewekte zonne-energie sterk. Instantie 10_c die na 12 uur nog niet tot een optimale oplossing komt, heeft nog meer pieken.

Lastprofielen



Figuur 3.12: Lastprofiel 10_d relatief constante dynamische prijs, weinig zonne-energie zonder batterij



Figuur 3.13: Lastprofiel 10_a relatief constante dynamische prijs, weinig zonne-energie zonder batterij

3.4.5 Algemene trends resultaten

Bij de analyse van de resultaten wordt duidelijk dat de beschikbaarheid van veel zonne-energie een gunstige invloed heeft op de snelheid waarmee het algoritme een optimale planning kan vinden. De zonne-energiecurve die bijvoorbeeld te zien is op Figuur 3.11 zorgt als het ware voor een zone waarbinnen apparaten makkelijk gepland kunnen worden zonder energiekost, daardoor zullen wanneer een apparaat onder deze curve past geen andere tijdssloten meer overlopen worden. Hoe onregelmatiger het gebruik van een apparaat is, t.o.v. de prijscurve, hoe moeilijker het te plannen is. Aangezien een prijscurve pas wijzigt per 4 kwartieren, en bijna nooit grote en frequente fluctuaties vertoont in vergelijking het verbruik van apparaten, kan gesteld worden dat grote standaarddeviaties bij apparaten voor moeilijker te plannen scenario's zorgen.

3.4.6 Thuisbatterij

	Geen partial lowerbounds		Partial lowerbounds		Batterij toegevoegd			
	Upper bound	Tijd (s)	Nodes	Tijd (s)	Nodes	Upper bound	Tijd (s)	Nodes
6_a	0,8756	0,1	877	0,0	394	-0,023	21,0	97468152
6_b	2,4613	0,0	138	0,0	124	x	x	x
6_c	1,9948	0,1	386	0,0	239	1,6659	13,3	60985876
6_d	-0,7094	0,4	5155	0,0	158	-0,7625	10,3	45740886
6_e	-0,6682	0,7	11695	0,0	152	-0,6682	3,4	12328664

Tabel 3.6 Fluctuerende prijs, 11 mei 24 zonne-energie, thuisbatterij 1,25kWh, omvormer 2,5kW

In tabel 3.6 wordt het effect weergegeven van een batterij bij het plannen van een scenario waarin geen basislastprofiel is opgenomen. Bij de meeste instanties is er een prijswinst aanwezig, deze zou nog groter kunnen zijn moest de batterijcapaciteit vergroot worden. Een grotere batterijcapaciteit laat het aantal mogelijke batterijplanningen echter exponentieel toenemen waardoor dit niet meer te berekenen valt.

Wanneer de geplande apparaten allemaal dicht bij elkaar gegroepeerd liggen, zal dit als gevolg hebben dat de batterijontlading voor een groot deel van de dag 0 kW is. Wanneer een batterijontladingscurve voor een groot deel van de dag nul is wil dit zeggen dat het aantal mogelijke oplaadcombinaties klein is. Dit heeft tot gevolg dat deze instanties dan ook makkelijker uit te rekenen zijn.

3.4.7 Basislastprofiel

Aangezien een basislastprofiel grotendeels uit lage vermogens bestaat, heeft het basisprofiel weinig effect op de rekentijd van het algoritme indien er geen batterij aanwezig is, figuur 3.14 kan dan ook op nul seconden uitgerekend worden.

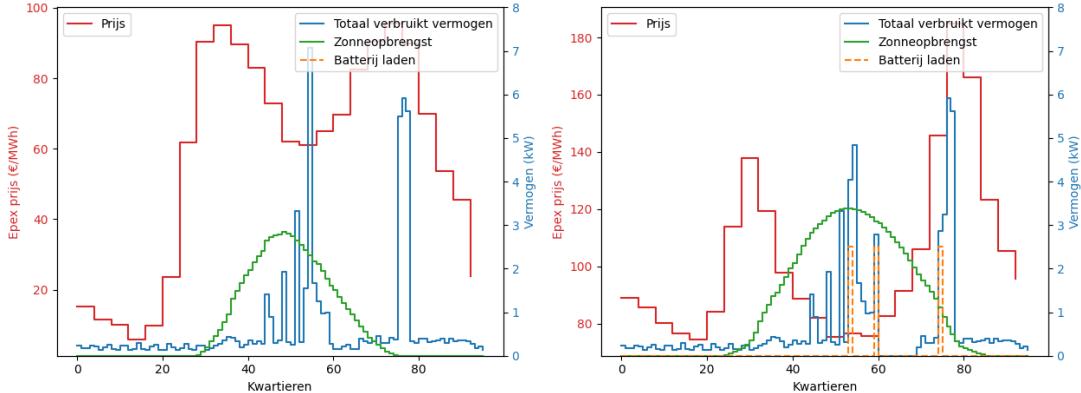
Wanneer wel een batterij aanwezig is zoals in figuur 3.15, wordt het aantal mogelijke scenario's waarop een batterij kan opgeladen worden veel groter, aangezien de batterij doorheen de volledige dag ontladen kan worden door het basislastprofiel, wat ruimte vrijmaakt om weer op te laden. Er worden dus veel minder takken afgesneden door ongeldigheid als wanneer er geen basisprofiel gebruikt wordt.

Door dit verschil in mogelijke batterijplanningen is het veel moeilijker een optimaal lastprofiel uit te rekenen indien een basisprofiel aanwezig is, wat ervoor zorgt dat scenario 2a met thuisbatterij 400 seconden duurt.

In figuur 3.15 is dan ook een batterij gebruikt van 1,25 kWh met een omvormersvermogen van 2,5kW om het aantal mogelijke combinaties enigszins te reduceren.

Daarnaast wordt er ook enkel gekeken om de batterij te laden om de twee indices bij deze instanties, aangezien de prijzen maar per vier kwartieren wijzigen wil dit zeggen dat deze nog steeds volledig kan opgeladen worden deze vier kwartieren.

Dit zal wel een iets zwakkere waarde teruggeven aangezien bijvoorbeeld de pieken van een basisprofiel niet kunnen gereduceerd worden indien ze op oneven tijdsloten vallen.



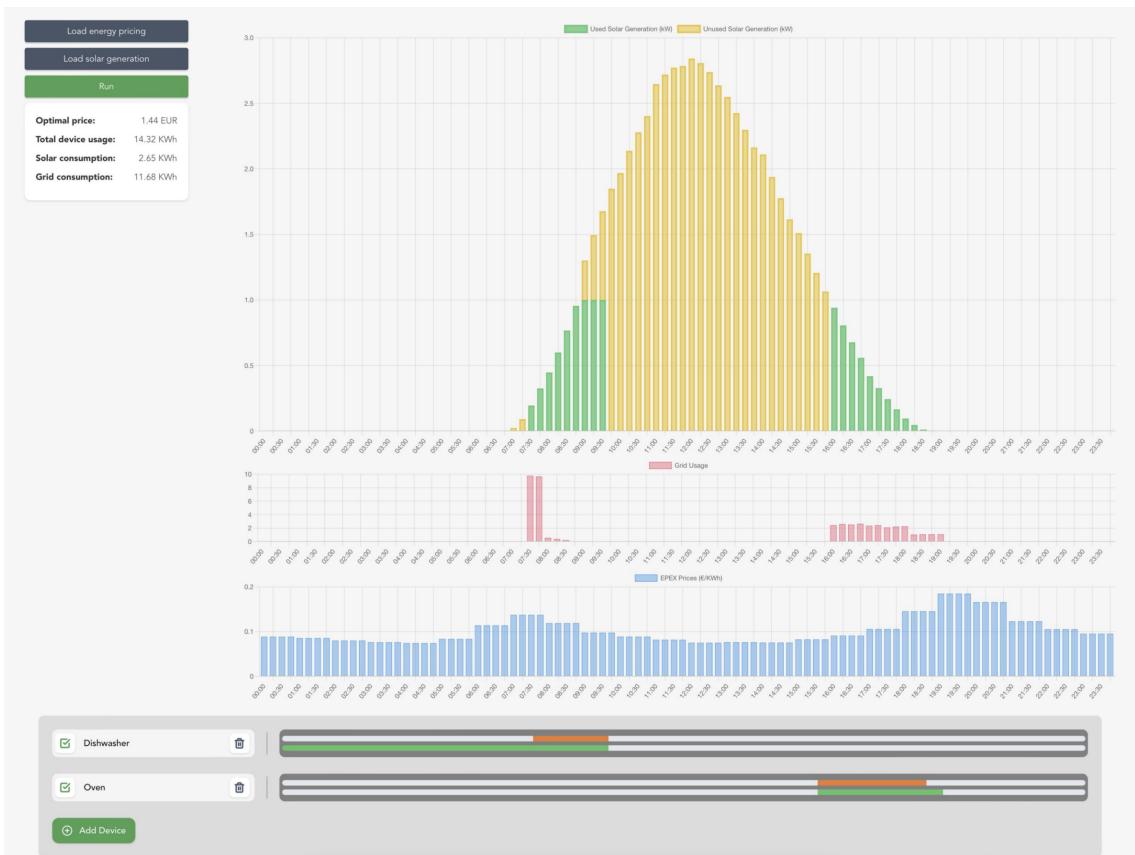
Figuur 3.14: Lastprofiel 2a geen thuisbatterij met basislast

Figuur 3.15: Lastprofiel 2a thuisbatterij met basislast

3.5 Grafische gebruikersinterface

3.5.1 Tauri

Om dit algoritme in de praktijk makkelijk bruikbaar te maken is er een grafische gebruikers-interface ontwikkeld met behulp van Tauri. Tauri is een toolkit die een Chromium frontend gebruikt, waarin het Svelte-framework wordt toegepast voor de grafische gebruikersinterface. Aan de backend-kant maakt Tauri gebruik van Rust, waarin het geïmplementeerde algoritme geschreven is, net als voor alle zaken die toegang vereisen tot de API's van het besturingssysteem, zoals het inlezen van bestanden. In de huidige implementatie van de gebruikersinterface is een vereenvoudigd algoritme geïntegreerd. Aangezien het branch-and-bound-algoritme in Java is geïmplementeerd, kan het niet zomaar in Tauri worden geïntegreerd.



Figuur 3.16: Screenshot ontwikkelde applicatie

Hoofdstuk 4

Conclusie en verder onderzoek

4.1 Conclusie

De sterke opkomst van hernieuwbare energiebronnen gecombineerd met dynamische energietarieven zorgen voor opportuniteiten om energiekosten te minimaliseren door slim apparaten te plannen.

Deze masterproef presenteert het ontwikkelde scheduling-algoritme, gebaseerd op de branch and bound methode. Wanneer we naar de geoptimaliseerde lastprofielen kijken zien we dat dit algoritme effectief is in het minimaliseren van de energiekost. Het algoritme wordt getest op verschillende diverse scenario's. De sterktes en zwaktes van het algoritme op verschillende scenario's worden ook aangetoond.

De integratie van een thuisbatterij in een systeem vergroot de rekentijd van het algoritme aanzienlijk, maar biedt tegelijkertijd extra mogelijkheden voor kostenreductie. Het algoritme bepaalt effectief wanneer energie moet worden opgeslagen in de batterij. Het opladen van de batterij kan zowel met zonne-energie als met energie van het net.

Op ethisch en maatschappelijk vlak biedt dit algoritme belangrijke voordelen. Door energieverbruik te verschuiven naar momenten met een overschot aan elektriciteit, vaak afkomstig van hernieuwbare bronnen, draagt het algoritme bij aan een efficiënter gebruik van groene energie en een indirecte reductie van de CO₂-uitstoot.

Het ontwikkelde algoritme biedt ook economische voordelen voor huishoudens door slim gebruik te maken van prijsfluctuaties. Dit kan niet alleen individuele energiekosten verlagen, maar potentieel de kans op blackouts reduceren indien de ontwikkelde optimalisatietechnologie breed genoeg toegankelijk wordt.

4.2 Verder onderzoek

- **Verbetering van de rekenefficiëntie:** De complexiteit van het schedulingprobleem neemt aanzienlijk toe wanneer een thuisbatterij wordt toegevoegd. Toekomstig onderzoek zou zich kunnen richten op methoden om de rekenefficiëntie hiervan te verbeteren.
- **Impact op het energenet:** De impact van het ontwikkelde algoritme op het energenet vergroot aanzienlijk bij grootschalige implementatie. Onderzoek naar de impact van grootschalige implementatie van geoptimaliseerde huishoudens op het energenet zou waardevolle inzichten kunnen bieden. Daarnaast zou dit onderzoek kunnen aantonen hoe door gepland energieverbruik het risico op blackouts kan verminderd worden.
- **Terugverdientijd van batterijen:** De economische haalbaarheid van thuisbatterijen hangt sterk af van de terugverdientijd. De terugverdientijd wordt beïnvloed door verschillende factoren, waaronder de kosten van de batterij, de prijs van elektriciteit, de mate van zelfconsumptie van opgewekte zonne-energie, en de beschikbaarheid van dynamische energietarieven. In gebieden met hoge elektriciteitsprijzen en grote prijsfluctuaties kan de terugverdientijd aanzienlijk korter zijn. Verdere studies zouden rekening moeten houden met deze factoren om nauwkeurigere voorspellingen te doen over de terugverdientijd. Dit zou consumenten beter kunnen informeren over de aanschaf van een thuisbatterij.

Github repository

De ontwikkelde code kan teruggevonden worden via volgende url: <https://github.com/driesvdv/Thesis-optimizing-household-load-profiles>.

Bibliografie

- [1] VREG, *Wat is het capaciteitstarief en hoe wordt het berekend?* <https://www.vreg.be/nl/wat-zijn-de-nieuwe-nettarieven-en-hoe-worden-ze-berekend>, (Geraadpleegd op 11/5/2024).
- [2] VREG, *Persbericht Distributionennetariven 2024*, <https://www.vreg.be/sites/default/files/press-release/pers-2023-05.pdf>, (Geraadpleegd op 11/5/2024), dec 2023.
- [3] VREG, *Energiekost*, <https://www.vreg.be/nl/energiekost>, (Geraadpleegd op 13/5/2024).
- [4] VREG, *Wat is een dynamisch contract? Voor wie kan het nuttig zijn?* <https://www.vreg.be/nl/blog/wat-een-dynamisch-contract-voor-wie-kan-het-nuttig-zijn>, (Geraadpleegd op 12/5/2024), mei 2023.
- [5] Eneco, *Eneco België lanceert pilootproject rond dynamische tarieven*, <https://news.eneco.be/eneco-belgie-lanceert-pilootproject-rond-dynamische-tarieven>, (Geraadpleegd op 12/5/2024), apr 2022.
- [6] smappee, *Je wagen tot 6x goedkoper laden met dynamische tarieven*, <https://www.smappee.com/nl/laadoplossingen/dynamische-tarieven>, (Geraadpleegd op 12/5/2024).
- [7] Eneco, *Eneco actuele groothandelsprijzen elektriciteit*, <https://eneco.be/actuele-prijzen>, (Geraadpleegd op 13/5/2024).
- [8] V. E. en Klimaatagentschap, *Stroomvoorspeller*, <https://apps.energiesparen.be/stroomvoorspeller>, (Geraadpleegd op 13/5/2024).
- [9] Elia, *Photovoltaic Power Production Estimation and Forecast on Belgian Grid (Near Real-Time)*, <https://opendata.elia.be/explore/dataset/ods087/information/>, (Geraadpleegd op 14/5/2024).
- [10] M. Wenninger, A. Maier en J. Schmidt, “DEDDIAG, a domestic electricity demand dataset of individual appliances in Germany,” *Scientific Data*, jrg. 8, nr. 1, jul 2021. doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00963-2>. adres: <https://rdcu.be/coGqL>.

Bijlage A

Beschrijving van deze masterproef in de vorm van een wetenschappelijk artikel

Optimizing household electrical load profiles with dynamic tariffs

Dries Van de Velde

Department of Electronics-ICT

KU Leuven, Campus Rabot

Ghent, Belgium

Abstract—The increasing adoption of renewable energy sources and introduction of dynamic energy tariffs have significantly increased the complexity of household energy management. This thesis addresses the challenge of optimizing electricity consumption in the context of fluctuating energy production and consumption patterns. We present a Home Energy Management System (HEMS) designed to minimize electricity costs for consumers by intelligently scheduling appliance usage. The system takes into account various factors including capacity tariffs, dynamic energy pricing, solar power generation, and home battery storage. Our approach aims to maximize the benefits of dynamic tariffs while considering user comfort and system constraints. We have developed an application with a graphical user interface to facilitate easy comparison of different energy consumption scenarios. This research contributes to the efficient utilization of renewable energy sources and the reduction of peak loads on the electricity grid.

Index Terms—Dynamic energy tariff, Capacity tariff, Home Energy Management System, Renewable energy, Electrical load profile.

I. INTRODUCTION

The energy landscape is undergoing a significant transformation, driven by the increasing integration of renewable energy sources and the adoption of smart grid technologies. This shift presents both challenges and opportunities in managing electricity consumption and distribution. As renewable energy sources like solar and wind power become more accessible, the energy production pattern has become increasingly volatile, leading to fluctuations in electricity supply throughout the day. At the same time, the rise of high-consumption devices such as electric vehicles has introduced new demand patterns, which can lead to significant peaks in energy consumption when multiple users use their high-consumption devices at similar times.

In response to these challenges, various measures have been implemented in Flanders, Belgium, to better align energy consumption with production patterns and grid capacity. Two key initiatives in this regard are the capacity tariff and the dynamic energy tariff. The capacity tariff, introduced on January 1, 2023, is a fixed cost based on peak energy consumption, designed to encourage consumers to spread their electricity usage more evenly [1]. The dynamic energy tariff, on the other hand, offers variable hourly rates to customers with digital electricity meters, incentivizing electricity consumption during periods of high availability and low cost [2].

While these measures encourage for more efficient energy use, they also introduce complexity for consumers. Without careful planning, a dynamic energy tariff may not result in cost savings compared to a fixed tariff. Manual planning of energy consumption becomes increasingly challenging, especially when considering factors such as solar energy production and home battery storage. This complexity highlights the need for automated Home Energy Management Systems (HEMS) that can intelligently schedule the operation of household appliances, considering comfort, cost, and the potential benefits of dynamic energy tariffs.

This thesis aims to address these challenges by developing an algorithm to optimize household load profiles using the dynamic tariff. The primary objective is to minimize electricity costs for consumers while considering various factors such as capacity tariffs, dynamic energy prices, solar energy production, and the potential integration of home batteries. The research explores the scheduling of household appliances, and home batteries.

Our approach not only considers the cost savings but also takes into account broader implications such as the efficient use of renewable energy and the potential reduction of stress on the electricity grid during peak hours. By shifting energy consumption to times of excess supply, often simultaneous with periods of high renewable energy generation, the algorithm indirectly contributes to reducing CO₂ emissions and promoting a more sustainable energy ecosystem.

To validate the effectiveness of our algorithm, we have created a scenario generator, and tested various generated scenarios, considering different combinations of dynamic pricing, solar energy availability, and the presence or absence of home batteries. These tests demonstrate the algorithm's ability to find optimal solutions across a range of conditions, showing both its strengths and limitations.

II. DATA COLLECTION AND PROCESSING

The optimization of household load profiles under dynamic tariff conditions requires data on energy prices, solar production, and appliance consumption patterns. All data was standardized to a 15-minute interval resolution to align with solar energy predictions and capacity tariff calculations.

A. Dynamic energy prices

Daily data was collected from Eneco [3], representing hourly wholesale electricity rates for day-ahead purchases. Most energy providers make use of the EPEX exchange since this is where they buy their energy from. These variable rates form the basis for our optimization.

B. Solar energy predictions

We utilized Elia's solar production forecasts, which offer 15-minute interval predictions per province. Elia's data was chosen for its higher time resolution and frequent live updates throughout the day. Analysis of Elia's 2023 6PM forecasts against actual values revealed an average error of 3.7% of total power over the year, demonstrating high accuracy for our planning purposes.

C. Appliance consumption profiles

The Domestic Electricity Demand Dataset of Individual Appliances in Germany (DEDDIAG) [4] provided detailed consumption profiles for various household appliances. This dataset offers per-second energy consumption data, which we converted into 15-minute average power consumption values using a Python script.

III. PLANNING COMPLEXITY

In its simplest form, where only the start times of appliances with known consumption profiles need to be determined, the problem quickly becomes infeasible when exhaustively checking all possible combinations using a brute force method. The inclusion of interruptible appliances adds further complexity, as it requires breaking down the appliance's operation into multiple sub-operations, each with its own scheduling requirement. The introduction of the capacity tariff exponentially increases the number of possible scheduling combinations, as this cost is determined after all appliances have been scheduled. The optimal solution for an individual appliance, which is to schedule it during the lowest-priced times, does not necessarily lead to a globally optimal solution due to potential increases in peak demand costs.

IV. ALGORITHM DEVELOPMENT

The core of our research is a branch and bound algorithm designed to optimize household load profiles under dynamic energy tariffs. This algorithm aims to minimize electricity costs while considering various factors such as capacity tariffs, dynamic energy prices, solar energy production, and the potential integration of home batteries.

The branch and bound method was chosen for its ability to efficiently explore the solution space while systematically eliminating suboptimal branches. This approach allows us to find optimal solutions without exhaustively evaluating every possible schedule.

The algorithm starts with an empty solution and continuously adds appliances to the schedule. For each appliance, it evaluates multiple possible start times, creating a tree-like structure of potential solutions as shown in Figure 1. The dots

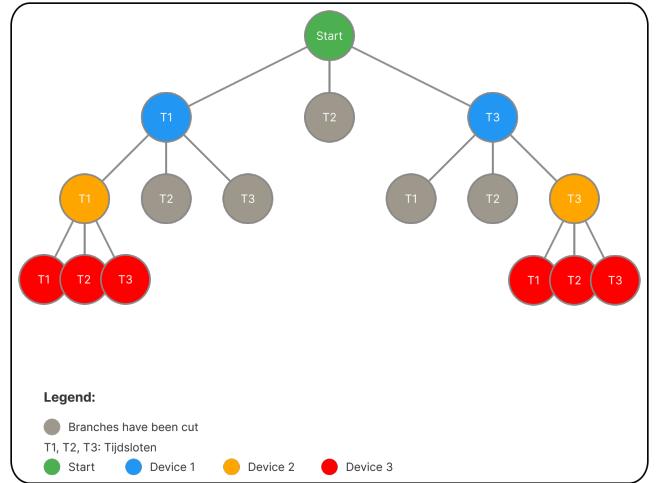


Fig. 1. Illustration of the branch and bound tree

represent the nodes or leafs of the tree and the lines in between are the branches. As soon as a terminal node is reached, we have a possible solution. If at any point in the tree the current electricity cost of the schedule overshoots the best possible value combined with the lower bounds which are explained in the next chapter, the branches may be cut.

A. Bounding techniques

We implemented several bounding techniques to improve the algorithm's efficiency. As soon

When starting to go through all possible start times, the algorithm will first isolate the device together with all the already planned devices and calculate the time for which the cost is the lowest. The lowest cost start time is then used as the first time in the branch and bound algorithm, since this rapidly leads to low upper bound price values. A strong and thus low upper bound leads to heavy pruning.

B. Initial upperbound

An initial solution is generated by distributing appliances evenly across the day and selecting the lowest energy price within each appliance's assigned interval. This provides a starting upper bound which can potentially have a lower price value than a randomly chosen schedule.

C. Lower bound calculation

The lower bound is calculated differently depending on the scenario.

- **Without solar panels or batteries** We sum the costs of running each appliance at its cheapest possible time, adding additional capacity tariff costs.
- **With solar panels** We sum the costs of running each appliance at its cheapest possible time, considering available solar energy when determining the cheapest run times. The additional capacity tariff costs cannot be added since the capacity tariff can be reduced by the solar generation.

- **With batteries** Since batteries can reduce the cost of a load profile, this invalidates the already defined lower bounds, since these will overestimate the lower bound. To have a valid lower bound, we calculate the maximum potential savings for the battery usage with the already determined power schedule and subtract this from the solar panel scenario lower bound.

D. Smart sorting

Appliances are sorted based on their total energy consumption before being added to the schedule. Starting with high-power consumption devices makes larger impacts on the upper bound early in the search process, allowing for more effective pruning.

E. Battery integration

The inclusion of home batteries adds another layer of complexity to the optimization problem. The developed algorithm considers battery charging and discharging decisions after scheduling all appliances. This approach allows for more flexibility in battery usage, as energy capacity created by discharging can be utilized for recharging later in the schedule.

F. Battery modeling

Modeling the battery involves additional challenges. For example, a home battery with a 5 kW inverter can charge or discharge at a maximum rate of 2 kW. A fine granularity in power steps would lead to an unmanageable number of states, making it computationally impossible. Therefore, the model simplifies by considering only full-power charging or no charging at all.

G. Visualization of optimized load profiles

A visualization of optimized load profiles was developed to gain a better insight and understanding of the scheduling problem, as seen in Figure 2. The blue line shows the total grid

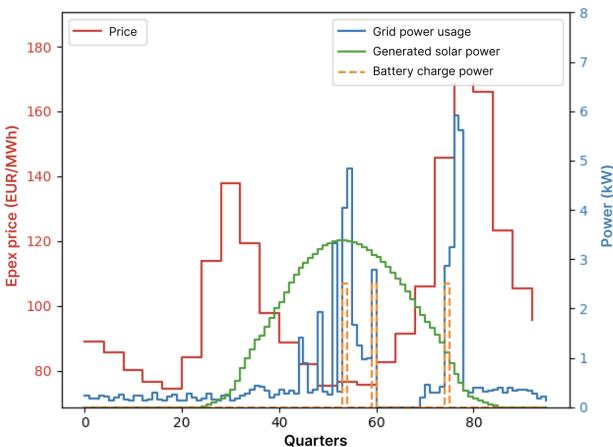


Fig. 2. Visualization of an optimized load profile

power usage, the green line shows the generated solar power,

and the orange line shows the amount of the grid power that goes into the battery.

H. Impact of solar energy

High solar energy availability consistently led to faster optimization times. This is due to the creation of a “low-cost zone” within the solar production curve, simplifying the scheduling process for appliances that fit within this zone. These fast calculation times are because the “low-cost zone” leads to a strong starting upper bound which has great pruning abilities.

I. Home battery integration

The introduction of a home battery significantly increased the problem’s complexity and computation time. For a 6-appliance scenario without a base load, a 1.25 kWh battery and 2.5 kW inverter:

- Without battery: 0.1 seconds, 877 nodes explored
- With battery: 21.0 seconds, 97,468,152 nodes explored

However, the addition of a battery often led to further cost reductions, demonstrating its potential in optimizing energy usage despite the increased computational complexity.

J. Base load profile impact

We found that including a base load profile had minimal impact on computation time in scenarios without a battery. However, with a battery present, the base load profile significantly increased the number of possible battery charging scenarios, leading to substantially longer computation times.

V. RESULTS

We evaluated the developed branch and bound algorithm across diverse scenarios to assess the performance in optimizing household load profiles. The scenarios were generated using the custom test instance generator, which created diverse combinations of appliance profiles, dynamic energy pricing patterns and solar energy availability.

A. Scenario analysis

We tested the algorithm on scenarios with 6, 8, and 10 appliances, each with different energy consumption patterns. The scenarios were further divided based on the following factors:

- Dynamic pricing: fluctuating vs. relatively constant
- Solar energy availability: high vs. low
- Presence or absence of a home battery

In the scientific article, only the instances using 10 devices are shown, the full results can be seen in the main thesis.

The algorithm’s performance was measured in terms of computation time and the number of nodes explored in the binary tree. We compared results with and without the use of our lower bounds to assess the effectiveness of our bounding techniques.

B. Fluctuating dynamic prices with lots of solar

Table I shows the algorithm's performance under fluctuating prices and high solar availability. The results demonstrate significant improvements when using partial lower bounds. For instance, in scenario 10_d, the computation time was reduced from 637.8 seconds to just 0.0 seconds, with a dramatic decrease in explored nodes from 8,818,271 to 210. This highlights the efficiency of our bounding techniques in pruning the search tree.

TABLE I

ALGORITHM PERFORMANCE FOR 10 APPLIANCES: FLUCTUATING PRICE, SUNNY DAY, NO HOME BATTERY

Scenario	Upper bound	Without Partial LB		With Partial LB	
		Time (s)	Nodes	Time (s)	Nodes
10_a	2.4491	1.3	8,496	0.1	1,226
10_b	4.9989	0.6	3,862	0.2	2,571
10_c	4.0894	10.3	78,969	0.9	13,279
10_d	-0.6754	637.8	8,818,271	0.0	210
10_e	5.1057	5.8	430,745	0.9	11,541

C. Fluctuating dynamic prices with little solar

As seen in Table II, scenarios with fluctuating prices and low solar availability generally require more computation time. This is because the lower solar availability makes for a less strong initial upper bound, which results in less pruning. The solar generation basically creates a cost-free zone, which results in a zero-cost upper bound if the devices can be powered by the available solar energy.

TABLE II

ALGORITHM PERFORMANCE FOR 10 APPLIANCES: FLUCTUATING PRICE, CHANGEABLE WEATHER, NO HOME BATTERY

Scenario	Upper bound	Without Partial LB		With Partial LB	
		Time (s)	Nodes	Time (s)	Nodes
10_a	9.6437	2421.0	24,136,706	256.3	4,520,310
10_b	16.668	2544.0	25,827,457	160.7	2,753,724
10_c	13.48	10360.0	112,293,847	499.8	8,496,478
10_d	2.1922	0.6	3,836	0.1	974
10_e	x	x	x	x	x

D. Constant dynamic prices with lots of solar

Table III illustrates the algorithm's performance under constant pricing and high solar availability. These scenarios generally show slightly faster computation times compared to fluctuating prices with lots of solar.

TABLE III
ALGORITHM PERFORMANCE FOR 10 APPLIANCES: CONSTANT PRICE, SUNNY DAY, NO HOME BATTERY

Scenario	Upper bound	Without Partial LB		With Partial LB	
		Time (s)	Nodes	Time (s)	Nodes
10_a	1.85413	1.0	4,958	0.1	1,350
10_b	3.3830	0.5	2,169	0.2	1,760
10_c	2.8600	6.1	47,976	0.7	9,768
10_d	-0.0668	0.0	18	0.0	18
10_e	3.5418	5.3	38,230	1.0	13,997

E. Constant dynamic prices with little solar

The scenarios with constant pricing and low solar availability, as shown in Table IV, present some of the most challenging conditions.

TABLE IV
ALGORITHM PERFORMANCE FOR 10 APPLIANCES: CONSTANT PRICE, CHANGEABLE WEATHER, NO HOME BATTERY

Scenario	Upper bound	Without Partial LB		With Partial LB	
		Time (s)	Nodes	Time (s)	Nodes
10_a	6.4713	1883.0	18,244,049	226.4	3,932,756
10_b	11.025	987.0	9,393,465	102.1	1,653,218
10_c	x	x	x	x	x
10_d	1.534	0.3	1,331	0.1	528
10_e	x	x	x	x	x

F. General trends

Analysis of the results clearly shows that high solar energy availability positively influences the algorithm's speed in finding an optimal schedule. The high solar availability basically creates a cost-free zone, which results in a zero-cost upper bound if the devices can be powered by the available solar energy. This zero-cost upper bound makes for a strong upper bound, which results in lots of potential pruning. The more irregular an appliance's usage is compared to the price curve, the harder it is to schedule. Since price curves change only every 4 quarters and rarely show large, frequent fluctuations compared to appliance consumption, appliances with large standard deviations in their usage patterns lead to more challenging scheduling scenarios.

VI. CONCLUSION

The growing adoption of renewable energy sources combined with dynamic energy tariffs presents opportunities to minimize energy costs through intelligent appliance scheduling. This thesis presents the developed scheduling algorithm based on the branch and bound method. Analysis of the optimized load profiles indicates that this algorithm effectively minimizes energy costs. The algorithm was tested across various scenarios, demonstrating both its strengths and limitations.

The integration of a home battery into the system significantly increases the algorithm's computation time, but also offers additional opportunities for cost reduction. The algorithm effectively determines when to store energy in the

battery, allowing it to be charged with either solar energy or grid energy.

From an ethical and societal perspective, this algorithm offers significant advantages. By shifting energy consumption to periods with an electricity surplus, often generated by renewable sources, the algorithm contributes to more efficient use of green energy and indirectly reduces CO₂ emissions.

The developed algorithm also provides economic benefits for households by intelligently leveraging price fluctuations. This can reduce individual energy costs and potentially decrease the likelihood of blackouts if the optimization technology is made widely accessible.

VII. FUTURE WORK

Improving computational efficiency: The complexity of the scheduling problem increases significantly when a home battery is added. Future research could focus on methods to improve the computational efficiency of the algorithm.

Impact on the energy grid: The impact of the developed algorithm on the energy grid becomes more significant with large-scale implementation. Research on the impact of widespread implementation of optimized households on the energy grid could provide valuable insights. Additionally, this research could demonstrate how planned energy consumption could contribute to reducing the risk of blackouts.

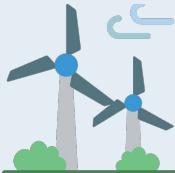
Battery payback period: The economic feasibility of home batteries is heavily dependent on the payback period, which is influenced by several factors including battery costs, electricity prices, the level of self-consumption of generated solar energy, and the availability of dynamic energy tariffs. In regions with high electricity prices and large price fluctuations, the payback period could be significantly shorter. Further studies should consider these factors to make more accurate predictions about the payback period, which could better inform consumers about the purchase of a home battery.

REFERENCES

- [1] VREG, "Wat is het capaciteitsstarief en hoe wordt het berekend?" <https://www.vreg.be/nl/wat-zijn-de-nieuwe-nettarieven-en-hoe-worden-ze-berekend>, (Geraadpleegd op 11/5/2024).
- [2] ——, "Wat is een dynamisch contract? voor wie kan het nuttig zijn?" <https://www.vreg.be/nl/blog/wat-een-dynamisch-contract-voor-wie-kan-het-nuttig-zijn>, mei 2023, (Geraadpleegd op 12/5/2024).
- [3] Eneco, "Eneco actuele groothandelsprijzen elektriciteit," <https://eneco.be/actuele-prijzen>, (Geraadpleegd op 13/5/2024).
- [4] M. Wenninger, A. Maier, and J. Schmidt, "DEDDIAG, a domestic electricity demand dataset of individual appliances in germany," *Scientific Data*, vol. 8, no. 1, Jul. 2021. [Online]. Available: <https://rdcu.be/coGqL>

Bijlage B

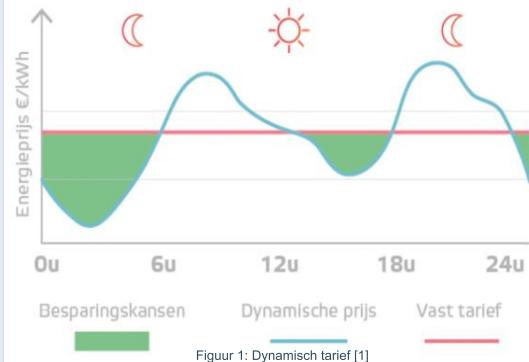
Poster



Optimaliseren van elektrische huishoudelijke lastprofielen met dynamisch tarief



Situatie: In een groener wordend energielandschap wordt het slim plannen van elektriciteitsverbruik steeds belangrijker. De nood aan slimme elektriciteitsplanning ontstaat door een groeiende onbalans tussen elektriciteitsproductie en -consumptie. Om deze onbalans aan te pakken zijn verschillende nieuwe tarieven ingevoerd die mogelijk gemaakt worden door een digitale elektriciteitsmeter. Zo is het capaciteitstarief een extra kost die men berekent op basis van de behaalde energiepieken. Ook is er het dynamisch tarief dat prijzen aanbiedt overeenkomstig met het energieaanbod.



Probleem: Om bovenstaande tarieven ten volle te benutten is het nodig om elektriciteitsverbruik slim te gaan plannen. Hiervoor kan een Home Energy Management System gebruikt worden. Indien het elektriciteitsverbruik niet slim gepland wordt kan de prijs nodeloos oplopen.

Doel: Het ontwikkelen van een applicatie die de energiekost minimaliseert door apparaten virtueel in te plannen. Hiermee kan de kostprijs van verschillende scenario's vergeleken worden.



Figuur 2: Ontwikkelde grafische gebruikersinterface

[1] "Eneco Belgium Launches Pilot Project on Dynamic Tariffs." Eneco, 15 May 2023. [Online]. Available: <https://news.eneco.be/eneco-belgie-lanceert-pilotproject-rond-dynamische-tarieven>. [Accessed: 1 May 2024].

KU LEUVEN - GENT
Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
Campus Rabot, Gebroeders De Smetstraat 1
9000 Gent, België
tel: + 32 9 265 86 10
iiw.gent@kuleuven.be
www.iiw.kuleuven.be

