

# FlexPower Werkpakket 3: Simulatie

Auke Hoekstra – [a.e.hoekstra@tue.nl](mailto:a.e.hoekstra@tue.nl) – 06-51614294

**TU EINDHOVEN, THE NEW  
MOTION, LIANDER,  
GREENFLUX, DELTA,  
EVNETNL, ELAADNL**



## Eindrapport

## Inhoudsopgave

|   |    |
|---|----|
| Inleiding .....   | 3  |
| Onderzoeksvraag .....   | 4  |
| Uitgevoerde werkzaamheden .....                                       | 5  |
| Keuze voor simulatie en agent-based modeling .....                    | 5  |
| Keuze programmeerframework en proof of concept .....                  | 6  |
| Enquête .....   | 8  |
| Inhuren en begeleiden programmeur voor implementatie reisgedrag ..... | 8  |
| Implementatie representatieve wijken .....                            | 9  |
| Implementatie koopgedrag .....  | 10 |
| Implementatie laadgedrag .....  | 11 |
| Implementatie elektriciteitsproductie en elektriciteitsmarkt .....    | 12 |
| Implementatie smart charging .....                                    | 12 |
| Resultaten: de potentie en waarde van smart charging .....            | 13 |
| Impact op netbelasting .....  | 13 |
| Kostenverlaging .....   | 15 |
| Conclusie en vooruitblik .....  | 17 |
| Bibliografie .....  | 18 |

## Inleiding

Dit is het eindrapport van werkpakket drie (simulatie) van het FlexPower project. Het is voorafgegaan door werkpakket één (capaciteit) en twee (energy). De essentie van deze voorgaande pakketten was om in de praktijk te testen en bewijzen dat slim laden op een opschaalbare manier mogelijk was. Voor meer details over werkpakket één en twee verwijzen wij naar de desbetreffende eindrapportages.

Dit rapport gaat over het laatst overblijvende werkpakket 3 dat zich richt op de business case voor slim laden in een toekomstige situatie met een hogere penetratiegraad van elektrische auto's en fluctuerende duurzame energie. Daartoe heeft de TU Eindhoven een geavanceerd simulatiemodel ontwikkeld waarmee smart charging kan worden doorgerekend.

In dit rapport lichten wij toe welke werkzaamheden zijn uitgevoerd (met speciale aandacht voor de werkzaamheden die zijn bekostigd middels Ideego, zie "Inhuren en begeleiden programmeur voor implementatie reisgedrag"), welke resultaten er zijn bereikt en hoe deze resultaten naar buiten zijn gebracht.

## Onderzoeksvraag

De onderzoeksvraag vanuit FlexPower aan de TU/e was:

“Wat zal de waarde zijn van smart charging in een toekomstige situatie met een aanzienlijke penetratiegraad van elektrische auto’s en fluctuerende energie uit zon en wind?”

Daarbij was de scope in eerste instantie het inkopen van energie op de day-ahead markt.

Die vraag is nog niet zo makkelijk te beantwoorden zoals we zullen zien wanneer we in het volgende hoofdstuk in chronologische volgorde de activiteiten doornemen die zijn uitgevoerd. De essentie is dat er sprake is van een complexe interactie binnen en tussen verschillende deelsystemen:

- De hoeveelheid elektrische auto’s wordt bepaald door het aankoopgedrag wat weer afhankelijk is van onder meer de prijs van batterijen en wat eisen stelt aan de beschikbare laadinfrastructuur.
- De hoeveelheid laadinfrastructuur wordt bepaald door hoeveelheid en gebruik van elektrische auto’s.
- Het reisgedrag van mensen heeft grote invloed op het aankoopgedrag (zo worden elektrische auto’s aantrekkelijker bij hogere kilometrage maar onaantrekkelijker bij bijzonder lange ritten, vooral in de eerste jaren als de range nog beperkt is) en op het laadgedrag (want het bepaalt het moment van aan- en afkoppelen van een laadpunt).
- Het energiesysteem heeft grote invloed op de behoefte aan smart charging. Bijvoorbeeld: midden op de dag laden past goed bij zonne-energie en midden in de nacht laden past goed bij windenergie. Ook de manier waarop stroom wordt verhandeld is zeer belangrijk voor de waarde van smart charging.
- In smart charging komt dit allemaal samen: het rijgedrag bepaalt wanneer welke auto waar is; het aantal auto’s en de grootte van hun batterij bepaalt hoeveel capaciteit er beschikbaar is; laadinfra en laadgedrag bepalen wanneer, waar en hoe snel die capaciteit beschikbaar is; en het energiesysteem bepaalt waar behoefte aan is.

Het modelleren hiervan is geen eenvoudige zaak. Het maakt modellen nodig die met grote complexiteit om kunnen gaan: die rijke verhalen kunnen vertellen maar dan wel met cijfertjes erbij. Dat noem ik graag Quantified Narrative™. Dit komt erop neer dat je een integraal model construeert, met mensen en machines die realistisch gedrag vertonen en die bottom-up het systeem vormgeven. Een dergelijke aanpak maakt het ook makkelijker om met domeinexperts te communiceren.

Een uitgebreide onderbouwing van deze aanpak wordt binnenkort als open access review artikel gepubliceerd in Energy and Complexity[1].

## Uitgevoerde werkzaamheden

Dit hoofdstuk beschrijft kort de uitgevoerde werkzaamheden. Deze zijn niet allemaal exclusief voor FlexPower uitgevoerd maar wel onlosmakelijk verbonden met de activiteiten die vanuit FlexPower zijn gefinancierd en met de resultaten die zijn geboekt. Voor beweringen aangaande de methode die niet worden toegelicht wordt verwezen naar het al genoemde artikel[1].

### Keuze voor simulatie en agent-based modeling

Het was natuurlijk mooi geweest als de onderzoeksvraag al te beantwoorden was geweest vanuit de FlexPower pilot. Helaas is de waarde van slim laden sterk afhankelijk van een veelheid van factoren die binnen de pilot niet tot uitdrukking konden komen (zie bij onderzoeksvraag). Daarom is ervoor gekozen een theoretische exercitie uit te voeren waarin er met die factoren kan worden geëxperimenteerd zonder dat de kosten en consequenties onacceptabel zijn: zie figuur 1.



Figure 1 Experimenten in een model hebben minder kosten en risico's dan experimenten in de werkelijkheid.

Verder is de complexiteit van het model dat voor deze vraag nodig is dusdanig dat een statisch model ongeschikt is. Daarmee kan je namelijk onmogelijk rekening houden met de veelheid aan non-lineaire feedback loops die inherent zijn aan het systeem zoals beschreven in de inleiding.

Daarom was een zogenaamd simulatiemodel noodzakelijk. Simpel gezegd voorspelt een simulatiemodel de toekomst stapje voor stapje, zonder daarbij gebruik te maken van formules die het verloop door de tijd helemaal voorspellen. Met een simulatie hak je het probleem als het ware in stukjes en kijk je voor elk stukje (bijvoorbeeld elk kwartier of elke maand) wat er gebeurt. De uitkomst van dat stukje is dan weer de input voor het volgende stukje.

Vervolgens is gekozen voor een agent-based benadering. Dit was een minder voor de hand liggende stap. Agent-based modeling is namelijk een relatief jonge tak van sport die binnen de academische gemeenschap nog slechts weinig gebruikt wordt en daarbuiten nog minder. Zij is echter snel in opkomst omdat met agent-based modeling complexe structuren bottom-up kunnen ontstaan waarbij meer realisme, heterogeniteit en complexiteit toegelaten kan worden. Zie ook figuur 2 en voor details de al genoemde publicatie [1].

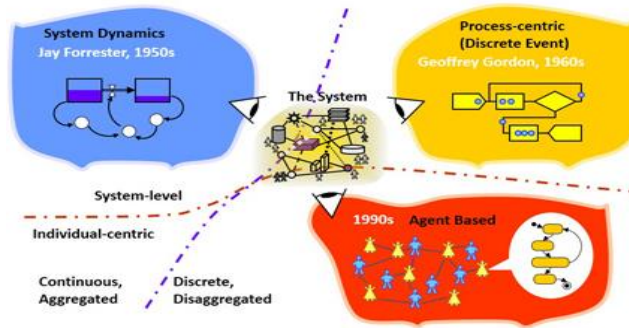


Figure 2 The three different simulation approaches for socio-technical systems

Deze exercitie heeft geleid tot een uitgebreide theoretische onderbouwing [1] waarbij vooral de keuze voor een agent-based, GIS gebaseerd en multi-level model belangrijk waren. Agent-based wil zeggen dat in de computer iedere entiteit die zelfstandig op de wereld reageert apart wordt gemodelleerd. Agents zijn bijvoorbeeld personen die in een wijk wonen en elektrische auto's kopen, rijden en laden. Maar bijvoorbeeld ook de elektrische auto's zelf of de transformatoren die die door kunnen branden. Elke stap van het programma (bijvoorbeeld elke 15 minuten) evalueren zij hun omgeving en beslissen zij over gedrag. Daarbij is relatief uniek dat er gebruik gemaakt wordt van echte kaarten die vandaag de dag immers overvloedig voorradig zijn op een manier die in computers kan worden ingeladen (geografische informatie systematiek of GIS).

### Keuze programmeerframework en proof of concept

Vervolgens was er tijd nodig om te kiezen voor de wijze waarop daadwerkelijk zou worden gemodelleerd. Bij het maken van een document of spreadsheet is de keuze niet moeilijk. Wie Windows gebruikt kiest bijvoorbeeld waarschijnlijk voor Microsoft Word of Excel. Maar agent-based modeling is dermate jong dat er geen echte volwassen tools beschikbaar zijn. Er moet gekozen worden tussen programmeeromgevingen die in meerdere of mindere mate complete functionaliteit en documentatie hebben en waarvan de functionaliteit in meerdere of mindere mate tegemoetkomt aan het specifieke probleem dat men voor ogen heeft.

Uiteindelijk is gekozen voor het GAMA-platform omdat dit een krachtige domain-specific language (DSL) biedt die vergeleken met een generic programming language (GPL) als Java of Python veel productiever is en minder programmeerervaring vraagt. Vergeleken met de grote concurrent op dit vlak (Netlogo) is GAMA beter schaalbaar en kan het veel beter omgaan met realistische kaarten.

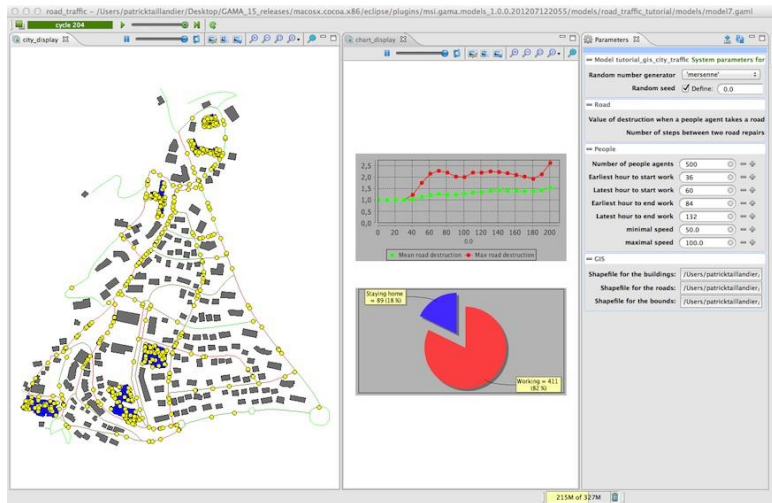


Figure 3 Een voorbeeld van een model in GAMA. Dit is niet de programmeeromgeving.

De output van het model kan vervolgens worden verwerkt in statistische applicaties zoals R. Figuur 4 en 5 laten zien hoe zulke output er uit ziet. Deze output is gegenereerd met een simpele proof of concept die is gebouwd om na te gaan of de onderzoeksvraag van FlexPower met behulp van GAMA opgelost zou kunnen worden.

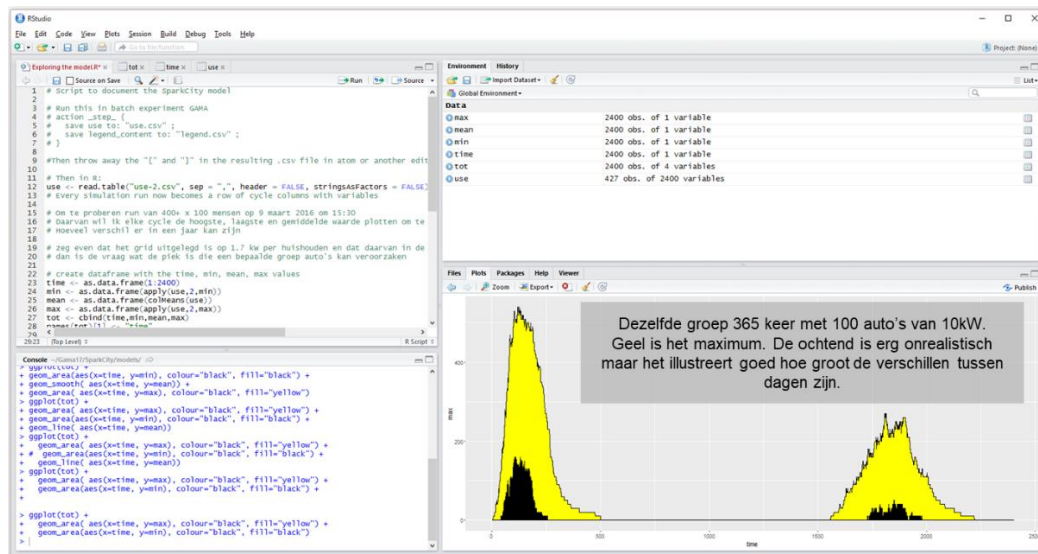


Figure 4 Voorbeeld van een omgeving waarin wordt gewerkt. Hier R.

Figuur 4 laat zien dat de belasting op het netwerk sterk verschilt van dag tot dag, als de gebruikers naar hun werk gaan en weer terug op een manier die enigszins van het toeval afhangt.

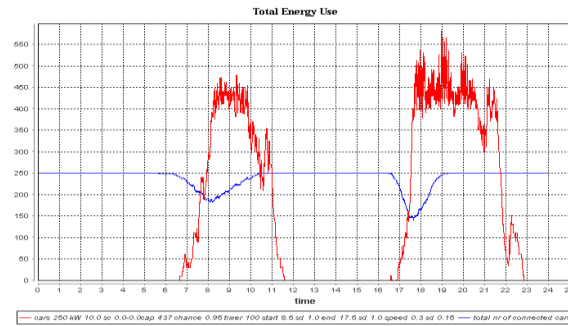
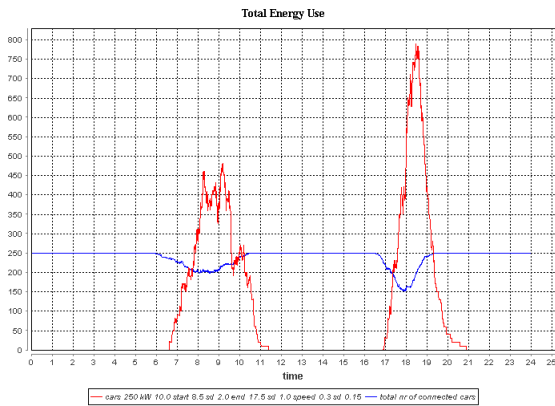


Figure 5 Met smart charging kan de laadpiek beperkt worden.

Figuur 5 laat zien dat een simpel smart charging algoritme de piek op een doorsnee dag kan verlagen van bijna 800 tot iets meer dan 550 kwh voor een aantal van 250 EV's die met maximaal 10 kWh kunnen laden. Daarmee was het werkingsprincipe aangetoond maar deze cijfers zijn fictief en zullen verderop in dit rapport vervangen door realistische cijfers.

De uiteindelijke implementatie was nog niet zo eenvoudig omdat het hele team wat in de loop van de afgelopen tijd aan het SparkCity model heeft gewerkt opgeleid moest worden. Zo is er uiteindelijk een cursusweek georganiseerd (waarvoor studenten ook studiepunten konden krijgen) met GAMA experts die vanuit Frankrijk werden ingevlogen. Op dit moment wordt gewerkt aan een opleiding vanuit de TU Eindhoven waarvan we verwachten dat deze grote meerwaarde zal hebben voor zowel nieuwe SparkCity modellers als de GAMA gemeenschap in bredere zin.

## Enquête

Om de personen in het model zo goed mogelijk te parametreren zijn twee surveys uitgevoerd. De resultaten van de eerste zijn gepresenteerd op de ARCHI conferentie door Nazir Refa[2] ook en gepubliceerd en gepresenteerd op de EVS30 in Stuttgart [3]. ([Zie hier voor de publicatie.](#)) Hoewel beperkt (slechts 240 personen vulden de gehele enquête in) is het wellicht de grootste steekproef en meest uitgebreide enquête onder ervaren EV-rijders in Nederland. (Inmiddels is er een tweede enquête afgerond over fast-charging maar dit valt buiten de scope van FlexPower.)

## Inhuren en begeleiden programmeur voor implementatie reisgedrag

Deze activiteit is de enige van werkpakket 3 die uit Ideego is bekostigd. De overige activiteiten zijn voor het overgrote deel bekostigd door Stichting ElaadNL en de TU/e maar voor het programmeren van het reisgedrag is gebruik gemaakt van de subsidie die middels Ideego is verstrekt door het RVO. Hoewel alle activiteiten nauw met elkaar samenhangen is mede voor deze benadering (bekostigen van één activiteit) gekozen om de verantwoording eenduidig en onomstreden te kunnen laten plaatsvinden. Deze subsidie was van groot belang omdat er vanuit het kernteam vooral expertise is over energie (vanuit onder meer de vakgroep van prof Geert Verbong), elektriciteitsnetwerken en laadinfra (vanuit onder meer ElaadNL en NKL) en elektrische voertuigen (vanuit onder meer de vakgroep van prof Maarten Steinbuch) maar minder met reisgedrag dat een belangrijk fundament is onder het hele model.

Dit traject heeft een aantal malen vertraging opgelopen. In eerste instantie lukte het binnen het budget niet om een programmeur te vinden met de vereiste voorkennis. Toen er na lang zoeken een goede match leek te zijn gevonden (een ICT-expert die tevens vluchteling met bedrijfsvergunning was uit Raqqa



in Syrië) durfde deze de uitdaging op het laatste moment toch niet aan. Uiteindelijk is met het Ideego budget Srirama Bhamidipati bijna een jaar lang ingehuurd door de TU/e. Hij heeft zijn uren aan de TU/e uitsluitend besteed aan dit project. Verder zijn er enige kosten gemaakt doordat hij is begeleid door prof. Harry Timmermans. In de financiële verantwoording zijn de details qua uren en kosten van deze twee personen terug te vinden.

Inhoudelijk heeft Srirama getracht de bestaande en toonaangevende applicatie ALBATROSS van prof. Timmermans zijn groep te vertalen naar de agent-based omgeving van GAMA. Dit is helaas slechts gedeeltelijk gelukt en uiteindelijk waren we verplicht te kiezen voor een methodiek die beter aansluit bij een agent-based omgeving. Niettemin hebben de agents in het model nu een redelijk realistisch reisgedrag die gebaseerd is op de kennis die vanuit het ALBATROSS-model is opgedaan en op de data die in Nederland beschikbaar is via het zogenaamde OViN onderzoek. Daarbij wordt onder meer rekening gehouden met het feit dat niet alle reizen per auto worden uitgevoerd, met een realistische afstand tot het werk, met trips naar het werk en overige trips door de week en met trips in het weekend.

Aan deze module is weinig te zien. Je kunt er geen plaatjes van maken en er zijn geen spectaculaire uitkomsten waarover je separaat kunt publiceren. (Over de basis in ALBATROSS wel maar dit is in het verleden als tientallen malen gebeurt.) Ondanks die beperkte zichtbaarheid is het belang van deze module echter groot. Reisgedrag is namelijk het fundament wat zowel bepalend is voor het koopgedrag als voor het laadgedrag en die zijn op hun beurt weer bepalend voor smart charging. Srirama zijn ervaring met GAMA en met mobiliteitsgedrag en prof. Timmermans kennis van reisgedrag hebben er dankzij de subsidie vanuit Ideego voor gezorgd dat de simulatie een stevige basis heeft. Immers: voor koopgedrag, laadgedrag en slim laden is het allemaal belangrijk om te weten hoe vaak, veel en ver mensen reizen. Daar wordt de aantrekkelijkheid en het gebruik van de elektrische auto ook op gebaseerd.

### Implementatie representatieve wijken

Dit deel van het project is uitgevoerd met ondersteuning vanuit het Nationaal Kenniscentrum laadinfrastructuur (NKL). Dit omdat er vanuit het NKL, behoefte was aan een vertaalslag van het model naar verschillende specifieke wijken en aan betrokkenheid van stakeholders van het NKL, iets wat buiten de scope van het FlexPower project viel maar het model wel zou verrijken. Het overgrote deel van dit budget is gaan zitten in de inhuur van een modelleur van de firma EV Consult die in overleg met de firma Over Morgen, gemeenten, netbeheerders, CPO's en andere stakeholders de wijken in het model heeft geprogrammeerd<sup>1</sup>. Inmiddels is e.e.a. op een speciaal hiervoor georganiseerd symposium gepresenteerd door Peter Hogeveen en Auke Hoekstra.

---

<sup>1</sup> Ook is een klein deel van de uren van Auke Hoekstra vergoed maar er is geen enkele overlap met de personen en uren die vanuit het FlexPower project zijn vergoed.



Figure 6 Enkele wijken die in het model zijn geïmplementeerd.

Figuur 6 geeft een voorbeeld van enkele in het model dynamisch gemaakte wijken.

### Implementatie koopgedrag

Nu de aanpak duidelijk was, mensen realistisch reisgedrag vertoonden en een veelheid aan wijken beschikbaar was stond niets het simuleren van realistisch reisgedrag nog in de weg. Daarbij is voortgebouwd op de inzichten die al waren verkregen in de studie voor Economische Zaken [4]. Op basis van een nauwkeurige modellering van zowel ontwikkelingen in batterij-technologie als ontwikkelingen in aandrijftechnologie is een total cost of ownership (TCO) model ontwikkeld voor elektrische auto's. Met dit model kan in individuele gevallen (rekening houdend met een veelheid aan factoren, zie figuur)

|                 |                    |               |                    |
|-----------------|--------------------|---------------|--------------------|
| Fuel costs      | Maintenance costs  | Vehicle class | Residual value     |
| Fuel efficiency | Purchase subsidies | Luxury level  | Battery capacity   |
| Yearly mileage  | Tax rebates        | Vehicle power | Battery pack costs |
| Income          | Lease or private   | Discount rate | Ownership period   |

### Total Cost of Ownership (TCO)

Figure 7 Variabelen die in de TCO berekening zijn meegenomen.

Intussen heeft dit naast een afstudeerscriptie geleid tot een conference paper dat is gepresenteerd op de EVS30 [5] en tot een nieuwe verkoopprognose die uitgebreid in het nieuws is geweest [6]. Belangrijke bijdragen zijn geleverd door Peter Hogeveen, Auke Hoekstra, Maarten Steinbuch, Dai Chaoxing, Vedant Linesh Sundrani en Anand Vijayashankar.

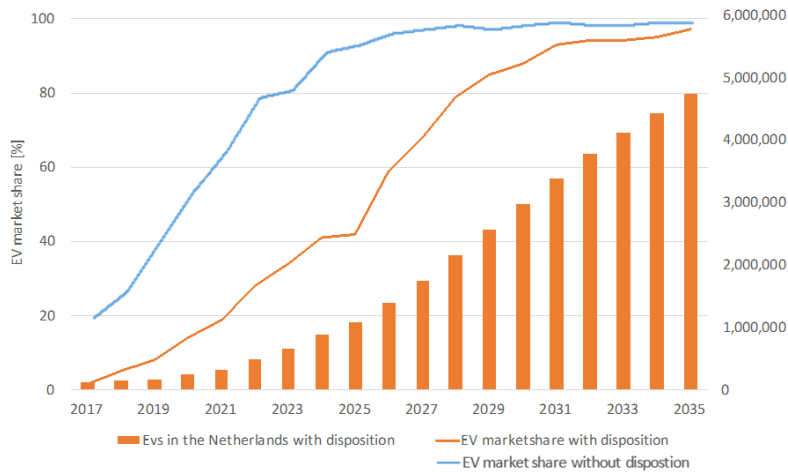
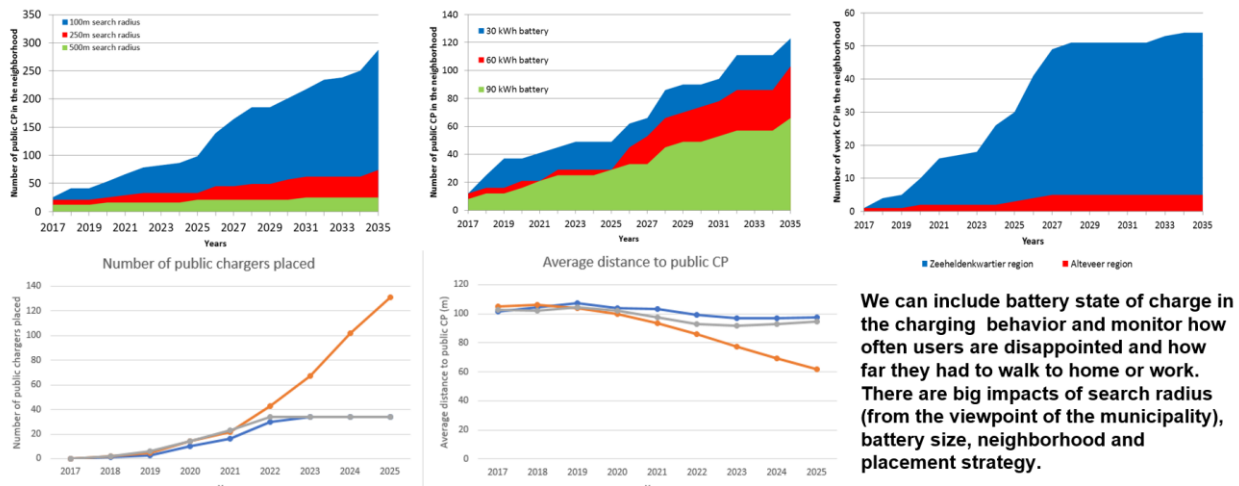


Figure 8 Prognose van nieuwverkoop en totale aantal EV's in Nederland

### Implementatie laadgedrag

Laadgedrag kan geïmplementeerd worden als duidelijk is wie er allemaal een EV heeft, hoe zijn of haar persoonlijke omstandigheden zijn (bijvoorbeeld qua inkomen, werk en mogelijkheden tot thuis en op het werk laden) en hoe er van de oplaadinfrastructuur gebruik gemaakt wordt. Hier is nog geen publicatie uit gevolgd maar al wel een afstudeerscriptie en de resultaten zijn ook gepresenteerd door Anand Vijayashankar en Gijs van der Poel op het onlangs gehouden [SparkCity symposium](#). Deze presentaties konden zich in grote belangstelling verheugen en dit deel van het model zal waarschijnlijk nader worden ontwikkeld.

Wat hierbij onder meer vernieuwend is, is dat mensen op basis van hun reisbehoefte, accu-omvang en state-of-charge beslissen dat ze wel of niet bereid zijn een bepaalde afstand af te leggen om een laadpunt te benutten. Dit zorgt ervoor dat mensen met een grote batterij minder vaak een publiek laadpunt claimen (zie figuur 9).



We can include battery state of charge in the charging behavior and monitor how often users are disappointed and how far they had to walk to home or work. There are big impacts of search radius (from the viewpoint of the municipality), battery size, neighborhood and placement strategy.

Figure 9 Enige resultaten van de module die laadgedrag voorspelt.

## Implementatie elektriciteitsproductie en elektriciteitsmarkt.

Op basis van de profielen van zon en wind is het relatief eenvoudig om te voorspellen hoeveel er geproduceerd zal worden als er een bepaalde hoeveelheid zon of wind aanwezig is. Zo is er op elke dag en op elk moment van de dag een aanbod van zon, wind en fossiele elektriciteit die op de markt kan worden aangeboden. (Overigens zal deze input nog verder worden verbeterd en zal ook een feedbackloop worden aangebracht waarbij er meer zon en wind wordt aangelegd als de afzetprijs hoger wordt.)

Vervolgens is een marktmechanisme geïntroduceerd dat werkt op basis van merit-order matching (zie figuur 10), in essentie gebaseerd op de wetten van vraag en aanbod, waarbij zon en wind het eerste worden aangeboden omdat hun marginale kosten vrijwel nul zijn. Een punt wat daarbij nog enige tijd gekost heeft is het creëren van een realistische dynamische prijs op de spot-market.

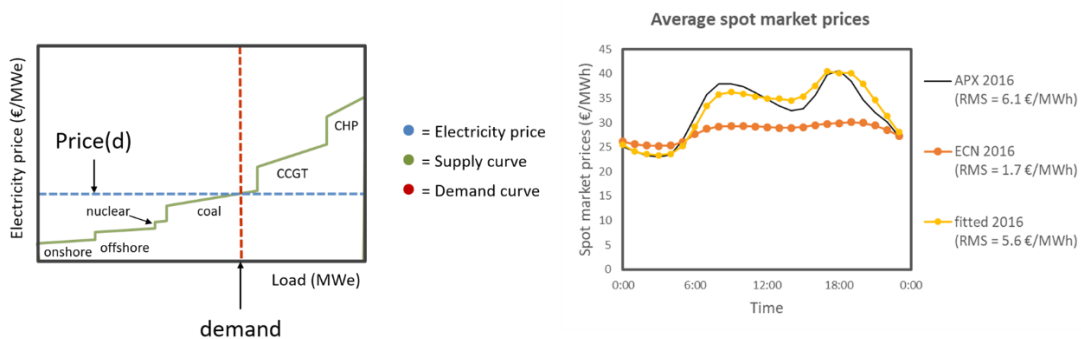


Figure 10 Merit-order matching en bepaling van prijzen op de spot-market

In dit model is in eerste instantie alleen de day-ahead markt geïmplementeerd zoals in scope voor FlexPower. (Er is inmiddels ook funding voor een vervolgtraject waarin ook andere aanbods-markten alsmede de onbalansmarkt en lokale power-quality kunnen worden geïmplementeerd.) Het smart charging deel heeft het project vooral te danken aan de noeste arbeid van Michiel van Lelyveld die al bekend was met de materie vanuit zijn stage bij Tennet en er inmiddels op is afgestudeerd.

## Implementatie smart charging

Nu alle voorgaande zaken zijn geïmplementeerd is het eindelijk mogelijk om smart charging te gaan doorrekenen. Figuur 11 geeft een sterk versimpeld overzicht van de agents en interacties die hiervoor zijn gecreëerd. De figuur laat zien dat het hier gaat om een integraal model met vele facetten.

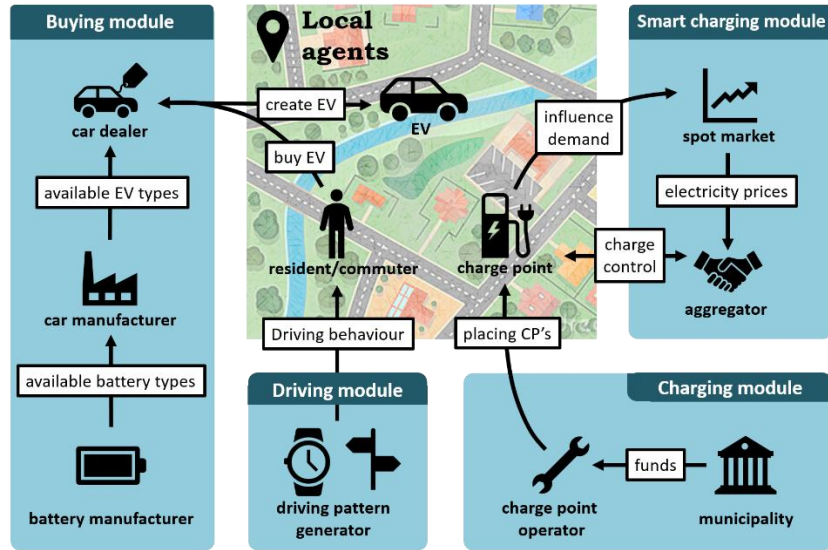


Figure 11 De belangrijkste agent en interacties van het SparkCity model

De essentie van smart charging is te zien in figuur 12. De figuur geeft een mogelijke toekomst aan met veel zonnepanelen en EV's en is illustratief bedoeld. Fossiele energie en overige vraag zijn wel aanwezig maar worden om het voorbeeld te verduidelijken niet getoond. We zien links hoe er initieel een grote mismatch kan zijn tussen aanbod en vraag. In het midden is te zien dat dit gepaard gaat met grote prijsfluctuaties. Rechts is te zien dat het verschuiven van de vraag van EV's naar het moment dat er aanbod is ervoor zorgt dat de prijzen minder fluctueren en lager worden.

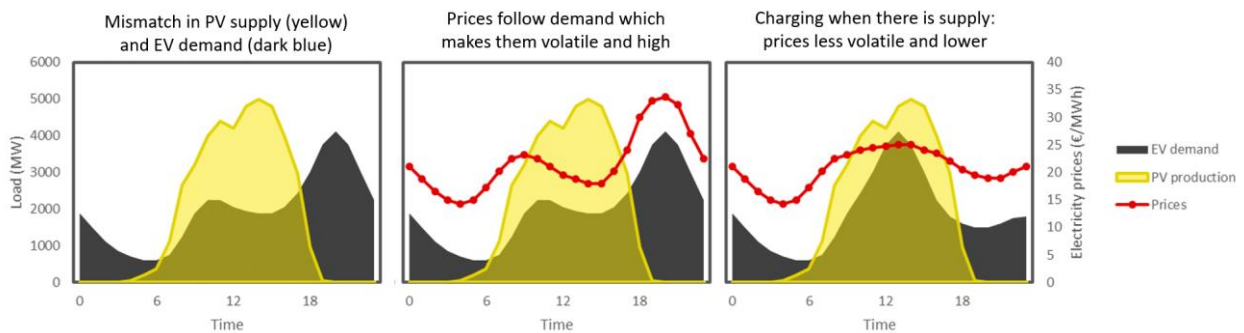


Figure 12 Opladen als er aanbod is zorgt voor lagere pieken en lagere prijzen

Het zoeken van het optimale moment van smart charging gebeurt met een lineair algoritme voor valley-filling. Het algoritme houdt rekening met het moment van vertrek en gaat ervan uit dat de auto op dat moment volledig opgeladen moet zijn. Binnen de ruimte die dit schept wordt in een iteratief proces de laadsessie steeds naar het goedkoopste moment van de dag of nacht geschoven.

## Resultaten: de potentie en waarde van smart charging

### Impact op netbelasting

Gezien de grote betrokkenheid van ElaadNL bij dit project is het misschien goed om te beginnen met de impact op de netbelasting. Zoals figuur 13 laat zien leiden EV's al snel tot grotere pieken op het

elektriciteitsnet. Als we bedenken dat onze huidige prognose is dat 20% EV's bereikt gaat worden in 2027 en dat er in 2035 circa 40% EV's worden verwacht is het duidelijk dat in veel gebieden de huidige netcapaciteit behoefte zal hebben aan slim laden om verdere netinvesteringen (en verstoring van de openbare orde met graafacties) te voorkomen. Simpel gezegd: de grafieken laten bijvoorbeeld zien dat bij 20% elektrische auto's de piek op de transformator in de afgebeelde wijk stijgt van circa 155 kW naar circa 210 kW. Dat is een zeer significante verhoging die wellicht verzwaring van het net vraagt. Maar met smart charging kan de piek volledig worden weggenomen.

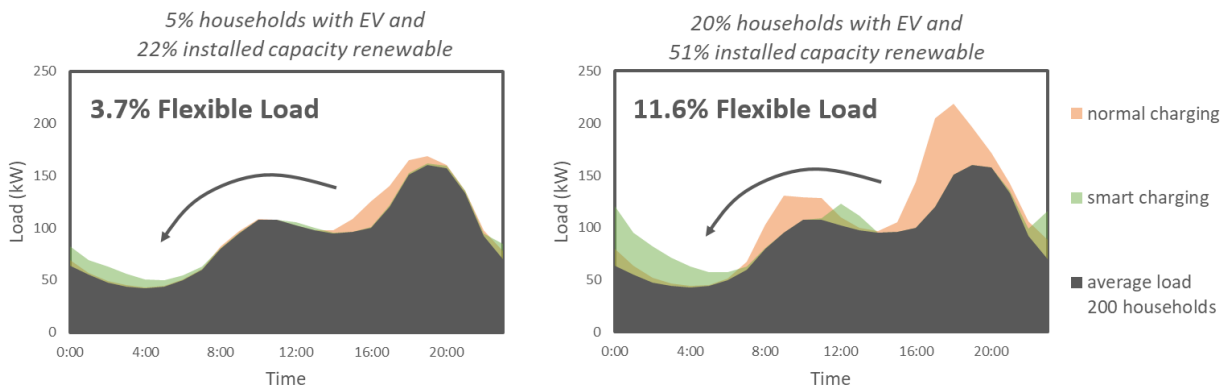


Figure 13 EV's verhogen pieken in het lokale elektriciteitsnet significant maar smart charging kan dat tegengaan

Op nationaal niveau is het effect minder uitgesproken maar ook daar is het effect uiteindelijk significant zoals te zien is in figuur 13.

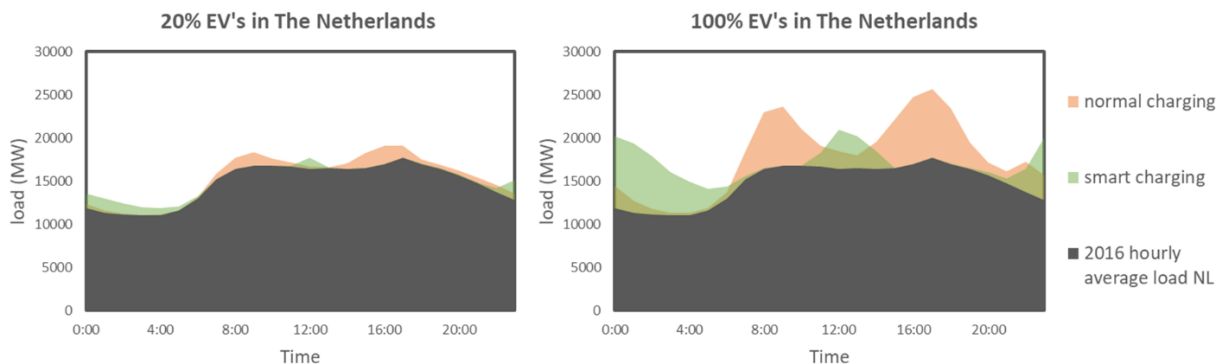


Figure 14 EV's verhogen ook de pieken op het nationale net en ook daar kan smart charging helpen

Wat hier nog niet uit naar voren komt (en ook niet in scope was van het FlexPower project) is welke kosten hier voor de netbeheerder aan vast zitten. Signalen vanuit de netbeheerder hierover zijn zeer divers. Bovendien blijkt power quality (het bewaken van de frequentie en de voltage op het net) waarschijnlijk een nog belangrijker factor dan netbelasting. Het plan is dan ook dat dit aspect in toekomstige versies van het model zal worden meegenomen. Eventueel kan zelfs gesimuleerd worden hoe het net in een wijk wordt uitgebreid en welke kosten dat met zich meebrengt en wat de meerwaarde is van een laadpaal die zelf de voltage op zijn eigen netelement bewaakt.

## Kostenverlaging

In figuur 15 zijn een aantal uitkomsten van het model te zien. Daar moet direct bij aangetekend worden dat de uitkomst in de zomer niet correct is. Dit komt door een verkeerd geconfigureerd gedrag van woon-werkverkeer wat de wijk bezoekt. Hierdoor worden zonnecellen midden op de dag volstrekt onvoldoende benut. Onze inschatting is dat na correctie hiervan de besparingen in de zomer vergelijkbaar worden met die in de winter.

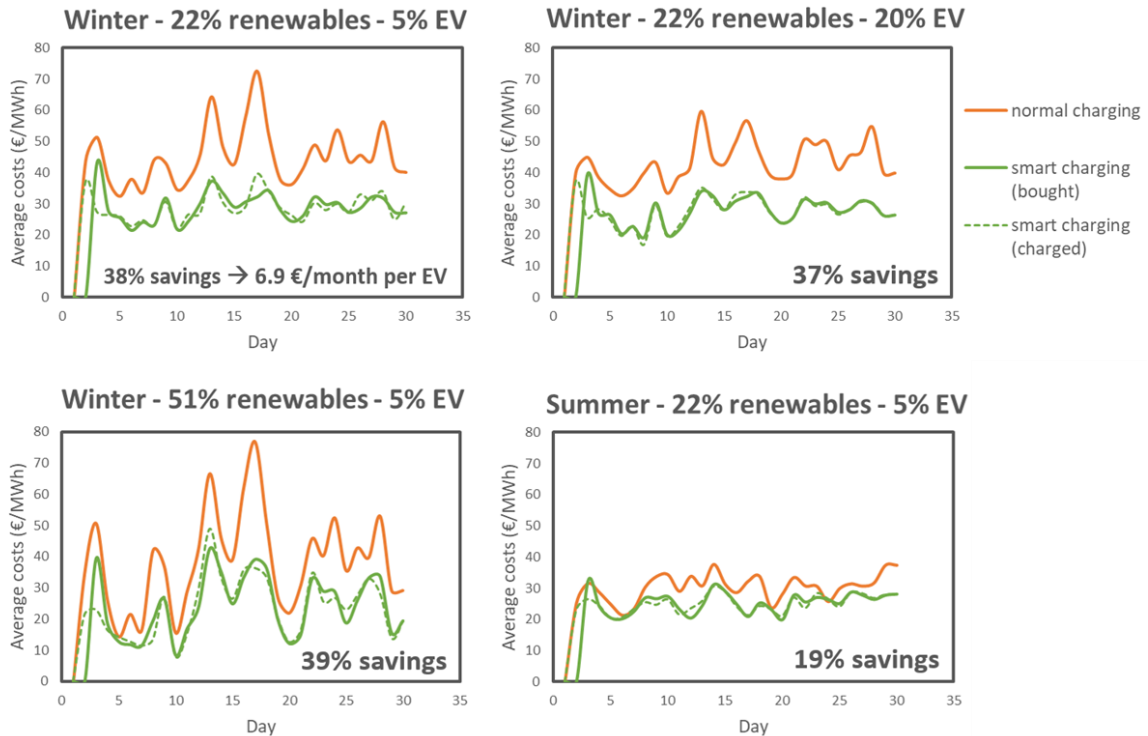


Figure 15 Kostenbesparing met smart charging

Dit geeft antwoord op een belangrijke vraag vanuit het FlexPower project, maar door deze vraag te bestuderen zijn we er achter gekomen dat de vraag eigenlijk veel breder gesteld moet worden. Naast de hier gesimuleerde day-ahead markt zijn er immers nog andere markten die vaak bovendien lucratiever zijn. Denk bijvoorbeeld aan de onbalansmarkt. De onbalansmarkt is met bestaande modellen uitermate lastig te modelleren omdat de waarde van EV's af zal nemen naarmate er meer EV's komen die meer onbalans aanbieden. In ons model zouden we dat echter goed mee kunnen nemen.

## Benutting zon en wind

Ten slotte is het misschien ook aardig om te zien of smart charging ook tot een toename in het gebruik van duurzame energie door EV's leidt. Figuur 16 laat zien dat dit inderdaad zo is, wat op zich ook wel logisch is aangezien duurzame energie de laagste marginale kosten heeft zodat op momenten met veel duurzame energie de energie het goedkoopst is.

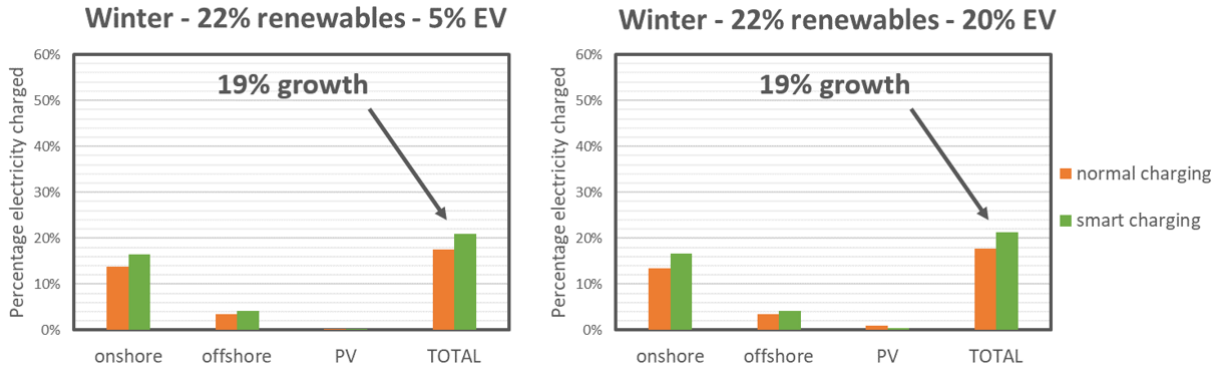


Figure 16 Toename gebruik duurzame energie door smart charging



## Conclusie en vooruitblik

Het maken van het model dat inmiddels SparkCity is gedoopt heeft veel voeten in de aarde gehad. Alleen al de keuze van de aanpak was een omvangrijke opgave wat blijkt uit de publicatie hierover. Ook het leren gebruiken van de gekozen tooling was tijdrovend (tot en met het organiseren van een cursus met Franse experts aan toe). Inhuur van een programmeur voor het door FlexPower gesponsorde deel mislukte enige malen wat tot forse uitloop leidde.

Inmiddels is er dus antwoord gegeven op de onderzoeksvraag van FlexPower. De besparing ligt in verschillende scenario's tegen de 40% van de inkoopprijs ofwel 7 euro per maand per EV. Dit neemt echter de besparingen vanuit lucratievere markten (zoals de onbalansmarkt) niet mee en geeft nog geen kwantificering van de besparingen bij de netbeheerder op basis van niet alleen netcongestie maar ook power-quality.

Daarom verheugt het ons te kunnen zeggen dat de TU/e besloten heeft volop verder te ontwikkelen aan het model en dat er inmiddels ook een tweede PhD positie is verworven (naast de bekostiging van Auke Hoekstra door ElaadNL) om dit mogelijk te maken. Wij gaan ervan uit dat dit leidt tot een reeks publicaties die steeds meer aspecten van smart charging meenemen. En nu de aanpak bruikbaar blijkt en er een stevig raamwerk staat wordt het relatief makkelijker om nieuwe "what-if scenario's" toe te voegen. Hierop zal dan ook de nadruk liggen in het vervolgtraject.

## Bibliografie

- [1] Auke Hoekstra, Maarten Steinbuch, and Geert Verbong, "Creating agent-based energy transition management models that can uncover profitable pathways to climate-change mitigation," *Energy Complex.*, Dec. 2017.
- [2] Nazir Refa, "Dutch electric vehicle user experiences," presented at the ARCHI, Amsterdam.
- [3] A. Hoekstra and Refa, Nazir, "Characteristics of Dutch EV drivers," presented at the EVS30, Stuttgart, 2017.
- [4] Maarten Cuijpers, Auke Hoekstra, and Wouter Bakker, "Toekomstverkenning Elektrisch Vervoer," 06-Dec-2016. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2016/12/06/eindrapport-toekomstverkenning-elektrisch-vervoer>. [Accessed: 17-Feb-2017].
- [5] A. Hoekstra, Anand Vijayashankar, and Vedant Linesh Sundrani, "Modelling the Total Cost of Ownership of Electric Vehicles in the Netherlands," presented at the EVS30, Stuttgart, 2017.
- [6] Auke Hoekstra, "Nieuwe inzichten over elektrisch vervoer in Nederland," Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Nov. 2017.

Daarnaast heeft het model ook geleid tot vijf afstudeeropdrachten (geschreven als papers) en negen presentaties op het SparkCity symposium die allen zijn terug te vinden op [SparkCity.org](http://SparkCity.org).