

Eindrapportage - BlueBattery en waterstofauto als duurzame en lokale elektriciteitsopslag in microgrids



Projectnummer: TEUE518021

Hoofdaanvrager: AquaBattery

Co-aanvragers: TU Delft, Alliander en Dot Robot

Projectduur: 01-03-2019 tot en met 30-11-2020

Contactpersoon: Emil Goosen (AquaBattery)



Samenvatting

Op The Green Village in Delft, Nederland, heeft een consortium van AquaBattery, de TU Delft, Alliander en Dot Robot samengewerkt en het samenspel van verschillende technologieën binnen een microgrid getest. De technologieën waar de focus op ligt zijn de BlueBattery (BB), een batterij die puur werkt op water en tafelzout op basis van RED-technologie, en de car-as-a-power-plant technologie (CaPP). De BlueBattery kan opgeslagen energie opslaan en leveren, maar heeft lange opstarttijden voor de spanning. De CaPP kan op korte termijn energie leveren voor pieken in de vraag binnen het Green Village microgrid, maar moet worden bijgetankt met waterstof, wat dus zo veel mogelijk moet worden vermeden.

Binnen het Green Village microgrid zijn verschillende PV-paneelinstallaties aanwezig, de BB en de CaPP, alsmede studentenwoningen (in dit rapport pret-a-loger genoemd), die fungeren als belasting voor het testen van het samenspel tussen energieopwekking en -opslag. Een netwerkcontroller regelt de lokale energiestromen en neemt beslissingen over extra energie-inkoop, opslag of piekbesparing (WP1).

Om de resultaten uit te breiden tot buiten de technische mogelijkheden van The Green Village microgrid, zullen de verzamelde gegevens worden gebruikt om een modulaire theoretisch model van het Green Village microgrid te bouwen (WP2). Modulariteit houdt in dat alle elementen van het netwerk kunnen worden toegevoegd, vermenigvuldigd of verwijderd om verschillende microgrid scenario's te testen met longitudinale data simulaties. De validiteit van de simulatie zal worden verzekerd door de resultaten te vergelijken met de werkelijke prestaties binnen het Green Village microgrid (WP3).

Een speciale rol binnen het microgrid wordt toegekend aan de netcontroller, die de werkmodus van het microgrid bepaalt (manuele werking, peak-shaving, zelfconsumptie) en controle-algoritmes gebruikt om de beslissingen voor energiedistributie te baseren op de beschikbaarheid van energie en de laadtoestand van de batterij en de CaPP. De netvoedingssystemen van de CaPP en de BB (het batterijbeheersysteem, ook wel BMS genoemd) zullen getest en geoptimaliseerd worden om voldoende en accurate beslissingsinformatie te leveren aan de netcontrole.

Het project zal het consortium helpen om het potentieel te begrijpen van duurzame energieopslag in combinatie met hernieuwbare bronnen en een lokale microgrid controller voor zelfconsumptie en peak shaving scenario's en de mogelijke implementatie ervan in de markt (WP4). Bovendien zal dit project toekomstige bedrijfsontwikkeling en mogelijke verbetering van de technologie voor benodigde gebieden mogelijk maken. Nauwe communicatie en uitwisseling van gegevens tussen alle betrokken partners zal alle partners helpen om de mogelijkheden en beperkingen, alsook de punten voor verbetering beter te begrijpen.

In het jaar 2020 zijn in het project verschillende resultaten bereikt. Ten eerste is er een succesvolle communicatie tot stand gebracht tussen de Firan netbeheer PLC en de BlueBattery. Om alle functies en functionaliteiten te kunnen testen zonder dat de informatie-infrastructuur van het micronetwerk al volledig is aangesloten, is een goede schattingscontroleparameter geïmplementeerd op de lokale netwerkcontroller, waarbij verschillende opwekkings- en vraagscenario's de beslissingsalgoritmen voeden en de respectievelijke commando's naar de BlueBattery sturen. Succesvolle tests met betrekking tot alle andere energiestromen van de PV-energieopwekking, huishoudelijke belasting en CaPP binnen het microgrid zelfconsumptie (Green powered en peak shaving scenario's zullen in dit rapport worden gepresenteerd. Dit rapport bevat alle informatie die is verzameld tijdens het project in samenwerking met alle betrokken partners (AquaBattery, Alliander, TU Delft, Dot Robot).

De belangrijkste knelpunten in het project zaten vooral op het gebied van covid-19 ten gevolge van de sluiting van het terrein, wat leidde tot substantiële vertraging in uitvoering.

In de loop van het project heeft echter ook veel ontwikkeling plaatsgevonden. Ontwikkeling en vervaardiging van membraanstacks heeft een substantiële stimulans gekregen buiten project, waarbij stack-productie op dit moment op een industriële manier wordt opgezet, en waarbij de productie-output constantere en betrouwbaardere kwaliteit gaat opleveren, met meer vermogen en minder verliezen. Ten tijde van het project is op basis daarvan een batterij-project opgeleverd in Italië, en worden er momenteel meerdere vervolgprojecten onderzocht in Nederland, om daarmee de technologie verder te schalen en om desgelijks de technische en economische prestaties te doen verbeteren. AquaBattery is samen met meerdere partners haar systeem aan het opschalen, om grootschalige flow batterijen te realiseren.

De rol van microgrids gaat ook de aankomende jaren in Nederland een steeds belangrijkere rol spelen, waar zij onder andere toegepast kunnen worden in de volgende marktsegmenten:

- Grootschalige hernieuwbare energieopwek met wind- en zonne-energie, waarbij een combinatie dient te worden gemaakt tussen zon en wind om daarmee efficiëntere energiesystemen te ontwikkelen;
- Off-grid, waarbij er geen aansluiting is op het publieke elektriciteitsnet, en waar energetische en economische optimalisatie hand in hand gaan;
- Energy-hubs tussen grootverbruikers, energieopwekkers en energieopslag. Deze categorie kan worden opgedeeld in:
 - Industry hubs: op industrieterreinen waar een grote hoeveelheid verbruik dient te worden gekoppeld aan hernieuwbare opwek, voor economische optimalisatie, vergroening, en het ontlasten van het elektriciteitsnetwerk;
 - Charging hubs: op locaties waar laadvoorzieningen worden geplaatst, en er behoefte is aan hernieuwbare energie, maar waar ook een tekort aan netcapaciteit bestaat;
 - Harbour hubs: in havens waar een elektrificatie van bedrijvigheid ontstaat en waarbij deze vraag dient te worden gevoed door fluctuerende energieopwek met energieopslag.

Deze marktsegmenten zijn vooral interessant omdat ze voldoen aan drie kenmerken:

- a) Ze zijn een belangrijk onderdeel van de energietransitie, waarbij de huidige energiemix met veel gas en steenkool, dient te worden vervangen door duurzame energie;
- b) Ze maken deel uit van een oplossing van het congestieprobleem op het landelijke en regionale elektriciteitsnet, waarbij geen aansluiting wordt gebruikt, of een bestaande aansluiting zodanig wordt geoptimaliseerd dat er meer energie-opwek en/of -verbruik mee kan worden gefaciliteerd;
- c) Het zijn deelgebieden waarbij onder de juiste voorwaarden een business case positief kan worden gemaakt en daarmee een versnelling aan de energietransitie.

Kennisverspreiding heeft plaatsgevonden via verschillende evenementen welke over de afgelopen jaren werden bijgewoond door enkele partners (voornamelijk 2019). Tabel 14 in het rapport geeft een overzicht van de evenementen waar het project werd gepresenteerd aan de wetenschappelijke gemeenschap, energie-experts, belanghebbenden, studenten en het grote publiek. Bovendien werd een congres paper publicatie (Ghotge R, Álvarez J.S, et al., 2019, A Global Analysis on Microgrids through the PESTEL Framework") geaccepteerd voor mondelinge presentatie in de 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE 2020) in Cochin, Kerala, India, in januari 2020. Daarnaast werd door de partners ook deelgenomen aan een georganiseerde workshop op The Green Village over Microgrids, waar de partners ook gepresenteerd hebben over microgrids en cable pooling. Bij deze workshop waren velerlei partijen aanwezig, waaronder ook netbeheerders, overheden en lokale buurtinitiatieven.

Meer informatie en/of inzicht in behaalde resultaten kan verkregen worden op aanvraag bij Emil Goosen (info@aquabattery.nl o.v.v. Informatie-aanvraag TKI Urban Energy BBS + H2 Auto).

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Inhoudsopgave

Hoofdstuk 1 Projectomschrijving	8
1.1 Introductie	8
1.2 Achtergrond van het project.....	8
1.3 Doelen van het TKI Urban Energy project	9
1.4 Projectlocatie.....	9
1.5 Bestuur en betrokken partners.....	10
1.6 Definities van BlueBattery, CaPP en lokale controller in een microgrid (WP1).....	11
1.6.1 Wat is een microgrid?	11
1.6.2 Waar kunnen microgrids gevonden worden in Europa?	12
1.6.3 Wat zijn de drijfveren en barrières voor microgrid integratie in het Europese energiesysteem?.....	12
1.7 Microgrid business case en efficiëntie	13
1.7.1 Typen microgrids	13
1.7.2 Microgrids doelen	14
1.7.3 Project-specifieke business case	14
1.7.4 Microgrid business case en efficiëntie	16
1.7.5 Vergelijking van energieopslagsystemen.....	17
1.7.6 Implementatie van microgrids in de gebouwde omgeving	17
1.8 Conclusies	19
Hoofdstuk 2 Prestatie-analyse van de BlueBattery en H2 Car as Power Plant (CaPP) in hun kwaliteit van nieuwe elektriciteit-buffer technologieën (WP2)	22
2.1 Introductie	22
2.2 Geselecteerde metrieken en methodes	22
2.3 Green Powered en Peak Shaving scenario's	24
2.3.1 Green Powered.....	24
2.3.2 Peak Shaving.....	25
2.4 Simulaties & beschrijving van model	25
2.5 Resultaten en discussie.....	26
2.6 Conclusies	27
Hoofdstuk 3 Integratie van alle productie-eenheden en belastingen in het elektrische netwerk van The Green Village (WP3)	28
3.1 Componenten & Microgrid lay-out.....	28
3.2 Experimentele resultaten.....	29
3.3 Green Powered.....	30
3.3.1 Ruwe vermogensprofielen + beter leesbare versie.....	30
3.3.2 Gebruik van zonne-energie	32
3.3.3 Laadverdeling.....	32

3.3.4	Laad- en restladingsprofiel.....	33
	Laadduurcurves	34
3.3.5	Energieproductie en -verbruik	35
3.3.6	Energiestromen en -besparingen.....	36
3.4	Peak Shaving.....	36
3.4.1	Ruwe vermogensprofielen + beter leesbare versie.....	37
3.4.2	Laadverdeling.....	38
3.4.3	Zonne-energie gebruik	39
3.4.4	Laad- en restladingsprofiel.....	40
3.4.5	Gridduurcurve	40
3.4.6	Energieproductie en -verbruik	41
3.4.7	Energiestromen en -besparingen.....	42
3.5	Conclusies.....	42
	Hoofdstuk 4 Validatie en uitwisseling van opgedane kennis en ervaringen (WP4)	45
4.1	Introduction.....	45
4.2	Modelvalidatie	45
4.3	Samenvatting vergelijking simulatie en experimentele tests	48
4.4	Disseminatie.....	48
	Hoofdstuk 5 Referenties	50

Figuren Index

Figuur 1	De bovenste afbeeldingen (A & B) tonen de geografische locatie van The Green Village op de campus van de TU Delft. De onderste foto toont de componenten van het microgrid bij TGV. Blauwe donkere vierkanten zijn gedefinieerd als pro/summers, groene vierkanten zijn de BlueBattery + CaPP, en rode vierkant is gedefinieerd als de lokale microgrid controllers	10
Figuur 2	Broeikasgassen voor verschillende typen auto's (BEV = EV auto, FCEC = Fuel Cell auto)	19
Figuur 5:	Schema van microgrid Green Powered operationele modus.....	24
Figuur 6:	Schema van microgrid Peak Shaving operationele modus.....	25
Figuur 8	Simulatie Green Powered, zomerdag, CaPP continue parked:.....	26
Figuur 9:	Simulatie Green Powered, winterdag, CaPP gebruikspatroon per uur.....	26
Figuur 10	Simulatie Peak Shaving, lentedag, CaPP gebruikspatroon per uur	27
Figuur 11	Schematisch overzicht van The Green Village microgrids' fysieke AC bus met de belangrijkste projectonderdelen van opwekking, opslag en tot energieverbruik.	28

Figuur 21 Rechts ruwe gegevens en links gladde profielen van 9, 15 en 16 september 2020.....	31
Figuur 22 Gebruik van zonne-energie groen-powered scenario voor september van 9, 15 & 16 september 2020	32
Figure 23 Load share profiles green-powered scenario from September 9th, 15th & 16th 2020	33
Figure 24 Load and residual profiles green-powered scenario from September 9th, 15th & 16th 2020	34
Figure 25 Load duration curves green-powered scenario from September 9th, 15th & 16th 2020	35
Figuur 26 Energieproductie- en gebruiksprofielen green-powered scenario van 9, 15 & 16 september 2020	36
Figuur 27 Energiestromen en besparingsprofielen Green Powered scenario van 9, 15 & 16 september 2020	36
Figuur 28 Rechts ruwe gegevens en links gladde profielen Piekverschuivingsscenario's van 5, 10 en 25 november 2020.....	38
Figure 29 Load share profiles Peak shaving scenarios from November 5 th , 10 th & 25 th 2020.....	39
Figure 30 Solar energy usage profiles Peak shaving scenarios from November 5 th , 10 th & 25 th 2020	39
Figuur 31 Belastings- en restbelastingsprofielen voor piekbesparingsscenario's van 5, 10 en 25 november 2020.....	40
Figuur 32 Netduur curveprofielen voor piekbeveiligingsscenario's van 5, 10 & 25 november 2020..	41
Figuur 33 Energieproductie- en -gebruiksprofielen voor piekspaarscenario's van 5, 10 & 25 november 2020	42
Figuur 34 Energiestromen en energiebesparingsprofielen voor piekbesparingsscenario's van 5, 10 & 25 november 2020.....	42
Figuur 35 Energie van <->naar componenten en microgrid.....	43
Figuur 36 Vergelijking tussen Green Powered- en Peak Shaving cenario's op het TGV-microgrid	43
Figuur 37 De linker kolom toont de gesimuleerde profielen en de rechter kolom de experimentele profielen voor het Green-Powered scenario.....	46

Tabel Index

Tabel 1 Overzicht partner en rollen voor de BlueBattery en waterstofauto als duurzame en lokale elektriciteitsopslag in microgrids TKI Urban project	10
Tabel 2 Microgrid barrières geanalyseerd met behulp van het PESTEL framework	12
Tabel 3 Vergelijking van de Blue Battery en CaPP.....	17
Tabel 4 Sterktes, Zwaktes, Kansen en Bedreigingen voor de Blue Battery en CaPP als duurzame en lokale elektriciteitsopslag in microgrids.....	21
Tabel 9 Geschiktheid van waterstof FCEV en Blue Battery voor verschillende opslagtoepassingen (beschrijvingen zijn in het Engels gebleven, gezien Nederlandse terminologie niet/te weinig wordt gebruikt in het veld)	23
Tabel 13 Informatie-uitwisseling tussen MGCC en afzonderlijke eenheden	45
Tabel 14 Samenvatting van disseminatie evenementen 2019-2020	49

Hoofdstuk 1 Projectomschrijving

1.1 Introductie

Het aantal zonnepanelen in de bebouwde omgeving neemt toe. Het aanbod van zonne-energie is echter niet constant. In de toekomst zullen nieuwe elektrische technologieën (bijvoorbeeld elektrische voertuigen, inductiekachels en warmtepompen) veel meer vragen van het laagspanningsnet. De combinatie van deze twee verschijnselen zal de tijdige levering van elektriciteit tot een uitdaging maken. Lokale opslag van elektriciteit zou een oplossing voor dit probleem kunnen zijn.

De afgelopen twee jaar is het aantal gebruikers en producenten van elektriciteit in The Green Village toegenomen tot prototypes voor verschillende nieuwe technologieën (Hyperloop, Waterstraat, etc.), vier studentenwoningen, een kantoor, een array van zonnepanelen, windturbines en een waterstofauto, naast de BlueBattery. In een systeem met zo'n verscheidenheid aan belastingen en bronnen is het cruciaal om goed na te denken over wat consumenten en producenten in- of uitschakelen, en wanneer. Met de groei van het aantal en type elektrische belastingen in The Green Village is de locatie de perfecte plek om moderne belastings- en leveringspatronen te analyseren en de elektriciteitsbalanceringsmogelijkheden van energieopslag in de praktijk te testen.

Op basis hiervan zullen de voordelen van microgrids (lagere investeringen in dikke kabels, eenvoudig en slim energiebeheer) worden vergeleken met de extra kosten voor energiebalancing wanneer technologieën als de BlueBattery (Salinity Concentration Gradient Flow Battery / CGFB) of de waterstofauto H₂ Car as Power Plant (CaPP) worden gebruikt. Het uiteindelijke doel van dit project is het efficiënt integreren, implementeren en valideren van verschillende lokale energiebronnen, belastingen, en opslagmethoden.

1.2 Achtergrond van het project

Het consortium heeft onlangs een testopstelling gebouwd in The Green Village in Delft. De BlueBattery van AquaBattery slaat duurzaam geproduceerde elektriciteit op in zout en zoet water en de TU Delft heeft een waterstofauto geïnstalleerd die de huizen van elektriciteit kan voorzien met behulp van de brandstofcellen van de auto. Deze energiebuffers hebben zich in eerdere projecten bewezen. Inmiddels is de batterij- en waterstofauto aangesloten op het (interne) elektriciteitsnetwerk van The Green Village; deze combinatie maakt de interactie van energieopslagsystemen mogelijk. Beide technologieën hebben het potentieel om vraag en aanbod van elektriciteit samen uit te balanceren, bv. wanneer er een grote vraag naar elektriciteit is en weinig stroomopwekking, kunnen de BlueBattery en de CaPP samenwerken om de nodige stroom te leveren in plaats van deze te importeren uit het primaire elektriciteitsnet.

Het Green Village is nu onderling verbonden op zijn nieuwe microgrid, dat zowel de BlueBattery als de CaPP kan gebruiken als mogelijke energieopslag om elektriciteit te leveren wanneer dat nodig is, d.w.z. wanneer de lokaal geïnstalleerde zonnepanelen niet aan de vraag kunnen voldoen. Dit project heeft aangetoond dat beide technologieën elkaar kunnen aanvullen en dat er een potentieel is om de zwakke punten die elk van de technologieën heeft zonder de andere, effectief te compenseren. Hierop zal later in dit verslag worden ingegaan.

Het is de bedoeling dat de BlueBattery in een dergelijk microgrid scenario gebruikt kan worden om alle overtollige energie op te slaan die door de zonnepanelen wordt geleverd, en als de kosten van elektriciteit laag genoeg zouden zijn zelfs energie op te slaan van het elektriciteitsnet zelf. De centrale zou dan energie kunnen vrijgeven aan de huishoudens en andere verbruikers in het micronetwerk wanneer de vraag groter is dan het aanbod, bv. 's avonds, wanneer het energieverbruik van de

gebruiker toeneemt. De CaPP zou dit systeem aanvullen door extra energie te leveren tijdens piekbelastingen. De BlueBattery kan niet genoeg stroom leveren of niet snel genoeg reageren (bijv. bij het doen van de was of koken).

Dit rapport zal de huidige inspanningen van het project rond het microgrid in The Green Village met de CaPP en de BlueBattery in combinatie en de inspanningen om de overdraagbaarheid naar andere microgrids vast te stellen, toelichten. Een business case op hoog niveau van een microgrid kan worden vereenvoudigd als een financiële kosten-batenanalyse. Het financiële voordeel van microgrids kan worden afgezet tegen de extra kosten van reguliere energiebalancerings.

1.3 Doelen van het TKI Urban Energy project

De toenemende bezorgdheid om het milieu en de uitputting van de traditionele voorraden fossiele brandstoffen hebben geleid tot een verschuiving naar duurzamere technologieën die gebruik maken van hernieuwbare energiebronnen, zoals wind- en zonnestraling. Door de intermitterende en oncontroleerbare aard van hernieuwbare energiebronnen is hun integratie in energiesystemen momenteel echter een grote uitdaging.

Het hoofddoel is om een microgrid omgeving te ontwikkelen met verschillende hernieuwbare/duurzame technologieën, van distributie, opwekking, en energieopslag tot het verbruik van de belasting. De implementatie van het BlueBattery System (BBS) in combinatie met CaPP als een aanvullende energieopslagoplossing voor de levering van elektriciteit in tijden van laag aanbod van zonne- en/of windenergie zal worden getest om de technische haalbaarheid ervan te begrijpen en de mogelijkheid om een kader voor nieuwe microgrids te scheppen.

Om dit te bereiken is het project onderverdeeld in vier werkpakketten:

- WP1 focust op het analyseren van huidige en toekomstige microgrids, inclusief het bestuderen van patronen in elektriciteitsproductie en –verbruik binnen microgrids.
- WP2 focust op de BlueBattery en H₂ Car as Power Plant (CaPP) prestatie-analyse in hun kwaliteit als nieuwe elektriciteitsbufferstechnologieën.
- WP3 focust op de validatie en integratie van alle opwekkings- en lasteenheden binnen het elektriciteitsnetwerk van The Green Village.
- WP4 omvat het delen van kennis en leerpunten welke zijn opgedaan over de verschillende werkpakketten.



1.4 Projectlocatie

Het project bevindt zich in The Green Village, op de campus van de Technische Universiteit Delft (TU Delft). Binnen in The Green Village, zoals te zien in figuur 1, zijn alle microgrid componenten geïnstalleerd en klaar om getest te worden op verschillende microgrid scenario's.



A
B

Figuur 1 De bovenste afbeeldingen (A & B) tonen de geografische locatie van The Green Village op de campus van de TU Delft. De onderste foto toont de componenten van het microgrid bij TGV Blauwe donkere vierkanten zijn gedefinieerd als pro/summers, groene vierkanten zijn de BlueBattery + CaPP, en rode vierkant is gedefinieerd als de lokale microgrid controllers

1.5 Bestuur en betrokken partners

Het project wordt beheerd door AquaBattery B.V. AquaBattery heeft een rol in elk werkpakket en heeft als doel het product op de markt te brengen na een succesvolle pilot. Binnen AquaBattery zetten Juan Sebastián Álvarez, Emil Goosen, Jiajun Cen, en David Vermaas zich in voor de uitvoering van het project. Juan Sebastián Álvarez doet vooral de dagelijkse operatie, hij is de project manager bij AquaBattery voor dit project, Rishabh Gothe onderzoeker aan de TU Delft, Haike van de Vegte en Ricardo de Wijs business manager en lokale microgrid ontwikkelaar bij Firan, Willem Zwetsloot en Marco van der Arend manager directeur en IT programmeur bij Dot Robot. Juan Sebastián Álvarez en Emil Goosen houden nauw contact met alle projectpartners om ervoor te zorgen dat het werk op tijd wordt uitgevoerd. Tabel 1 toont de bij het project betrokken partners en hun rol.

In januari 2020 zijn de activiteiten van ZOWN gestopt en zijn de werkzaamheden van ZOWN in dit project overgedragen aan een nieuwe afdeling van Firan, beide dochterondernemingen van Alliander. Firan is een bedrijf met expertise op het gebied van installatie en beheer van energie-infrastructuur. Zo zal het lokale energiesystemen kunnen ontwerpen en deze implementeren en monitoren. Alle wijzigingen zijn aan RVO meegedeeld.

Tabel 1 Overzicht partner en rollen voor de BlueBattery en waterstofauto als duurzame en lokale elektriciteitsopslag in microgrids TKI Urban project

Participants	Role in the project
AquaBattery	Projectleider en verantwoordelijk voor de BlueBattery in energiebalancerende systemen binnen de omgeving van het microgrid.
Dot Robot	ICT ontwikkelaar van het BMS en communicatieprotocol naar de Local controller
Firan	Inzet en ontwikkeling van een energiemanagementsysteem voor microgrids in het Nederlandse elektriciteitsnet
TU Delft	Analyse van de CaPP in energiebalancerende systemen.
The Green Village	Faciliteitsbeheer en distributie

1.6 Definities van BlueBattery, CaPP en lokale controller in een microgrid (WP1)

De wereld van vandaag is snel aan het veranderen en probeert zijn CO₂-voetafdruk te verkleinen met de "groene revolutie". De huidige energietrend is erop gericht af te stappen van fossiele brandstoffen en over te schakelen op groene hernieuwbare energiebronnen, zoals zonne- en windenergie. Deze hernieuwbare energiebronnen hebben het grote voordeel dat ze energie produceren zonder koolstof in onze atmosfeer te brengen. Zonne-energie kan echter alleen worden geproduceerd tijdens zonnige dagen en windenergie alleen tijdens winderige dagen. Deze energiebronnen zijn vaak niet afgestemd op de energievraag, waardoor een intermitterend effect optreedt. Een oplossing voor deze wanverhouding tussen vraag en aanbod is energieopslag, waarbij grote hoeveelheden energie goedkoop kunnen worden opgeslagen wanneer het energieaanbod groot is en de energie kan worden ontladen wanneer de vraag groot is. Op die manier kunnen hernieuwbare energiebronnen op een veilige manier in het energienet worden geïntegreerd, waardoor de huidige problemen worden opgelost en de kosten van elektriciteit op lange termijn mogelijk zelfs dalen.

Anderzijds kunnen hernieuwbare energiebronnen (vooral zonne-energie) gemakkelijker rechtstreeks bij de consument worden ontkoppeld, waardoor de energiedistributie wordt omgevormd tot een tweerichtingsnetwerk. Dit vergt verbeterde technologieën voor energieopslag en een vernieuwde netwerkarchitectuur. De evolutie van het typische elektriciteitsnet is het slimme net dat op een kostenefficiënte manier alle gedragingen en acties van de aangesloten gebruikers kan integreren - producenten, consumenten en zij die beide doen [1]. Een betere controle en beheer van de lokale energiedistributie is echter haalbaar via een microgrid, een nieuwer en veelbelovender concept van het elektriciteitsnet dat gedistribueerde energiebronnen, opslagapparatuur en flexibele belastingen omvat en zich gedraagt als één geaggregeerde belasting of bron [2]. Een essentieel kenmerk van een microgrid is de controle, die elke component beheert en de elektriciteit zo efficiënt en handig mogelijk verdeelt.

Fotovoltaïsche panelen, een waterstofauto, BlueBattery (CGFB) en een echt huis zijn met elkaar verbonden in The Green Village in Delft, NL in een van de meest duurzame bestaande microgrids.

In dit eerste hoofdstuk kijken we naar de Europese achtergrond van microgrids, en analyseren we de kenmerken, sterktes en uitdagingen van onze projecten.

1.6.1 Wat is een microgrid?

Alvorens de kenmerken van ons systeem te definiëren aan de hand van de studie van andere microgrids in de Europese ruimte, moest het team het eens worden over de definitie van microgrid en vond het die van Cigré het meest accuraat:

"Microgrids zijn systemen voor elektriciteitsdistributie die ladingen en gedistribueerde energiebronnen (zoals gedistribueerde generatoren, opslagapparaten of regelbare ladingen) bevatten die op een gecontroleerde, gecoördineerde manier kunnen worden geëxploiteerd, hetzij terwijl ze zijn aangesloten op het hoofdstroomnet, hetzij terwijl ze geïsoleerd zijn." [3]

Dit suggereert dat zonder controle over de energiestromen, of dit nu gebeurt bij de bron, bij de belasting of via opslag, het systeem niet kan worden omschreven als een microgrid. Microgrids zijn in die zin verschillend van het primaire net.

Omdat de kenmerken van de opslagvoorziening (Blue Battery) en de waterstofauto hen het meest geschikt maken voor laagspanningstoepassingen, heeft het team besloten zijn onderzoek te beperken tot microgrids in het laagspanningsbereik, met 10 kV als bovengrens. De spanning wordt gemeten op

het Point of Common Coupling, of PCC, dat wordt gedefinieerd als het punt in het elektrische systeem waar het eigendom overgaat van het elektriciteitsbedrijf naar de klant [4] Dit project staat gelijk aan de verbinding van het micronet met het primaire net, waarbij de eigenaar van het micronet en het hoofdnets verschillende partijen zijn.

1.6.2 Waar kunnen microgrids gevonden worden in Europa?

Het team heeft bestaande online artikelen over microgrids bekeken en de bevindingen aan de volgende criteria getoetst:

- Het voltageniveau is onder de 10 kV
- Het systeem is geen uitbreiding van het netwerk van de DSO (Distribution System Operator)
- Het systeem is gekoppeld aan het hoofdnets via maximaal één PCC (Point of Common Coupling, Punt van Gemene Koppeling)
- De energiestromen worden beheerd in het systeem op zo'n manier dat het de grootte van het PCC minimaliseert (op het net aangesloten systemen), of anderzijds autonome werking mogelijk maakt (geïsoleerde systemen)

Tot op heden zijn er zeer weinig microgrids in het Europese elektriciteitsnet. Een van de redenen voor dit kleine aantal is dat het Europese net toegankelijk en zeer betrouwbaar is, waardoor er minder behoefte is aan stand-alone systemen, behalve in enkele bijzondere gevallen. Onderzoek en het verlangen naar zelfvoorziening zijn drijvende krachten die microgrids kunnen stimuleren. Tot dusver blijft de aantrekkingskracht van een aansluiting op en afhankelijkheid van het hoofdnets voor de stroomvoorziening echter groter dan deze drijfveren.

In het volgende deel zullen we dieper ingaan op de drijfveren voor en belemmeringen van de invoering van microgrids in het Europese energiesysteem.

1.6.3 Wat zijn de drijfveren en barrières voor microgrid integratie in het Europese energiesysteem?

De drijvende krachten en belemmeringen voor microgrids in Europa zijn geanalyseerd aan de hand van het PESTEL-kader, dat politieke, economische, sociale, technische, milieu- en wetgevingsinvloeden omvat en vaak wordt gebruikt om de stand van de ontwikkeling van opkomende technologieën te evalueren. Onderstaande tabel geeft een samenvatting van de bevindingen van deze analyse:

Tabel 2 Microgrid barrières geanalyseerd met behulp van het PESTEL framework

Drijfveren		Barrières
Politiek	Vermindering van de invoer van fossiele brandstoffen Betrouwbare en veerkrachtige microgrids voor militaire toepassingen De vraag naar autonome of bijna autonome energiegemeenschappen Bredere stimulansen voor een grotere penetratie van hernieuwbare energiebronnen en energie-efficiëntie	Oppositie van energiebedrijven Beperkte beleids- en planningssteun op regeeringsniveau
Economie	Uitstellen of vermijden van conventionele netwerkinvesteringen Lagere elektriciteitskosten door hoog eigen verbruik en verhandeling van netwerkdiensten. Hoge of stijgende kosten van elektriciteit, inclusief belastingen	Hoge kosten van opslag Hoge kosten voor beheer- en integratiesoftware

Maatschappelijk	Vraag naar groene energie Vraag naar hogere stroomkwaliteit	Gebrek aan kennis van de beschikbare oplossingen Moeilijkheden bij de samenwerking tussen verschillende belanghebbenden
Technisch	Vooruitgang in vermogensomzetterelektronica met hogere efficiëntie en lagere kosten Ontwikkeling van 5G- en IoT-apparaten voor geaggregeerde besturing Nieuwere opslagtechnologieën tegen lagere kosten	Beschikbaarheid van apparatuur voor de bescherming van micronetwerken Beschikbaarheid van apparatuur voor platformoverschrijdende communicatie
Milieu	Een grotere penetratie van hernieuwbare energie mogelijk maken Verbetering van de efficiëntie bij het eindgebruik van primaire energieopwekking	Dieselgebruik in microgrids Toxiciteit en moeilijkheid van recycling van voor energieopslag gebruikte materialen
Wetgeving	Recente (medio 2019) EU-wetgeving met betrekking tot kwesties als de definitie en erkenning van opslagactiva, afschaffing van dubbele belasting, eigendom van micronetwerkactiva door DSO's, enz.	Diverse wettelijke belemmeringen voor opslag, eilandvorming, handel in energie en diensten, enz.

Uit de analyse blijkt dat voor specifieke toepassingen - zoals militaire inzet, afgelegen locaties, locaties waar netverzwarende het enige alternatief blijft of locaties die worden ontworpen voor een onzekere toekomstige belasting - microgrids nu al een concurrerende ontwerpkeuze zijn voor elektriciteitsdistributie.

Voor toepassingen zoals gemeenschapsinitiatieven op het gebied van energie, energieneutrale wijken en duurzame campussen zijn er echter wellicht meer robuuste business cases nodig om microgrids te ontwikkelen.

1.7 Microgrid business case en efficiëntie

Een business case op hoog niveau van een microgrid kan worden vereenvoudigd als een financiële kosten-batenanalyse. Het financiële voordeel van microgrids kan worden afgezet tegen de extra kosten van reguliere energiebalancerende.

1.7.1 Typen microgrids

Om de business case te beschrijven en kwalitatief te analyseren, is het van essentieel belang om eerst het doel en het type te identificeren. Er kunnen vier verschillende typen microgrids worden onderscheiden:

- Netgekoppelde stedelijke omgeving - Het microgrid bevindt zich in een ontwikkelde en dichtbevolkte omgeving en heeft een netaansluiting om energie-uitwisseling met het hoofdstroomnet mogelijk te maken.
- Netgekoppelde landelijke omgeving - Dit type microgrid heeft doorgaans een relatief zwakke verbinding en/of een lange kabel die verbonden is met het gecentraliseerde net. De verbruikers en producenten zijn meer verspreid.
- Off-grid hernieuwbare energie - Er is geen netaansluiting, en het microgrid is geoptimaliseerd voor een grote hoeveelheid hernieuwbare energie en eventueel energieopslag om vraag en aanbod op elkaar af te stemmen.

- Off-grid fossiel - Dit type microgrid heeft geen netaansluiting, en de kern van dit energiesysteem is een op fossiele brandstoffen gebaseerde energieopwekkingseenheid, zoals een dieselgenerator.

Het microgrid in dit specifieke project past in de categorie "Netgekoppelde stedelijke omgeving"; het bevindt zich dicht bij het hoofdstroomnet dat gemakkelijk toegankelijk is, en heeft geen nood-/reservestroomvoorziening nodig. In The Green Village microgrid zijn de volgende componenten aanwezig:

- Fotovoltaïsche panelen op het dak van de Power Parking Carport, het DC-kantoor, en de Prêt-à-loger gebouwen
- Twee energieopslagsystemen, één is de BlueBattery, de andere is de Car-as-a-Power-Plant
- Verschillende belastingen, zoals de EV-laadpalen, het AC-kantoor en het duurzame huis Prêt-à-loger.

1.7.2 Microgrids doelen

De doelstellingen kunnen voor elk van deze categorieën verschillend zijn. Voor een microgrid in de categorie netgekoppelde stedelijke omgeving kan het doel bijvoorbeeld zijn "kritieke infrastructuur" te beschermen, zoals een ziekenhuis of een datacentrum. Het hoofddoel is in dit geval het risico van uitvaltijd tot een minimum te beperken of te annuleren. Anderzijds, in het geval van een landelijk, eiland of ander off-grid microgrids, is de vergelijking met een (zeer) lange kabel vaak relevant om de business case te begrijpen. In deze situaties zijn de kosten van diesel en het transport ervan naar de afgelegen locatie van vitaal belang voor de optimalisatie van het micronet met eventueel zonne- en windenergieopwekking en energieopslagsystemen.

Bijlage A bevat een generieke beschrijving van een business case, die de lezer helpt om de algemene beweegredenen voor microgrids en de bijbehorende activa te begrijpen.

1.7.3 Project-specifieke business case

Het microgrid in dit project past in de categorie "Netgekoppelde stedelijke omgeving". Onze specifieke situatie bevindt zich dicht bij een deel van het hoofdstroomnet dat gemakkelijk toegankelijk is en geen nood-/back-up stroomvoorziening vereist. Het doel van het AquaBattery microgrid is om:

- Het eigen verbruik te optimaliseren van lokaal opgewekte elektriciteit om de kosten van de invoer van energie te verminderen (Green powered & Peak shaving scenario's)
- De autonomie te vergroten van de gebruikers van het energiesysteem
- De capaciteit te verminderen van de aansluiting op het hoofdstroomnet om de maandelijkse kosten te verminderen, het gebruik van het net te maximaliseren en dure of tijdrovende netinvesteringen te voorkomen

In ons systeem wordt de netbeheerder vertegenwoordigd door The Green Village. Prosumenten worden in de volgende paragrafen meer in detail beschreven. Er is geen energiecoöperatie vanwege het demonstratieve en experimentele doel van het project. De betrokken componenten zullen ook in de volgende paragrafen worden beschreven.

De resultaten van het TKI-microgridproject kunnen positief zijn als de elektriciteitsverkoop en de netwerkvergoedingen hoger zijn dan de potentiële kosten voor netwerkinvesteringen, en als er ondersteunende diensten kunnen worden geleverd. Dit hangt echter af van verschillende factoren, zoals de potentiële vermindering van een capaciteitsverhoging van het net, de aanwezigheid van elektriciteitsstarieven voor saldering, de mogelijkheid om back-upstroom te leveren, enz.

De besparingen zijn niet zo hoog als in de off-grid of rurale microgrids, waar de kosten voor een stabiele verbinding zeer hoog of zelfs onbetaalbaar zijn. Twee van de belangrijkste doelstellingen van

het project zijn echter het minimaliseren van de elektriciteitsinvoer uit het net en het verminderen van het gebruik van fossiele brandstoffen; daarom wordt veel moeite gedaan om die besparingen te vergroten.

Om de beste match in termen van efficiëntie voor ons project te definiëren, kijken we naar de belangrijkste functionaliteiten, zoals eerder beschreven:

- Optimalisering van het eigen verbruik van plaatselijk opgewekte elektriciteit om de kosten van de invoer van energie te verminderen.

Voor deze functionaliteit, in de categorie "Economisch", zijn hoge kosten voor elektriciteit een eerste vereiste. Over het algemeen zijn deze te vinden in de op het net aangesloten stedelijke omgeving, met name in oostelijke en hoge welvaartsgebieden zoals Nederland.

- Vergroting van de autonomie van de gebruikers van het energiesysteem.

Deze functionaliteit kan worden gecategoriseerd als "sociaal". Locaties waar de autonomie van de gebruiker als essentieel wordt beschouwd, zijn meestal aan het net gekoppeld en bevinden zich in stedelijke omgevingen. Hier is de drang om duurzamer en meer zelfvoorzienend te worden doorgaans groter dan in andere regio's. Bovendien beschouwen grote ondernemingen die de huidige energiesystemen domineren, energie als een waardevol goed waarmee maximale winst kan worden gemaakt. Er ontstaan nieuwe vormen van publiek eigendom om het algemeen belang te dienen, en er ontstaat ook samenwerking tussen gemeentelijke energiebedrijven en coöperaties. Vermaatschappelijking en democratisering van de productie zijn waardevol en stellen mensen overal in staat de vruchten te plukken van een nieuw, groen energiesysteem.

- De capaciteit van de aansluiting op het hoofdstroomnet verlagen om de maandelijkse kosten te verlagen, het gebruik van het net te maximaliseren en dure of tijdrovende netinvesteringen te voorkomen

Deze functionaliteit is met name een "economische", en typisch landelijke omgevingen (kunnen) hogere tarieven en dure netinvesteringen hebben.

Al deze elementen zijn verbonden met een elektriciteitsnetwerk in particulier bezit met toegang tot het hoofdstroomnet. De doelstellingen van het consortium voor het toepassen van Blue Battery elektrische energieopslag op dit microgrid zijn:

- Optimalisering van het eigen verbruik van lokaal opgewekte elektriciteit om de kosten van de invoer van energie uit het primaire net te drukken, ook wel "Groen aangedreven scenario" genoemd.

Voor deze economische functionaliteit zijn hoge kosten voor elektriciteit een eerste vereiste. Over het algemeen zijn deze te vinden in de netgekoppelde stedelijke omgeving. Met name in westerse, welvarende regio's van energie.

- Vergroting van de autonomie van de gebruikers van het energiesysteem.

Deze functionaliteit kan worden gecategoriseerd als sociaal. Locaties waar autonomie van de gebruikers van het energiesysteem als noodzakelijk wordt beschouwd, zijn doorgaans aan het net gekoppelde en stedelijke omgevingen. Hier is de drang om duurzamer en meer zelfvoorzienend te worden meestal groter dan in andere regio's.

- De capaciteit van de aansluiting op het hoofdstroomnet verlagen om de maandelijkse kosten te verlagen, de benutting van het net te maximaliseren en dure of tijdrovende netinvesteringen te voorkomen.

Deze functionaliteit is vooral een economische, en typisch landelijke omgevingen (kunnen) hogere tarieven en dure netinvesteringen hebben.

1.7.4 Microgrid business case en efficiëntie

Dit hoofdstuk gaat in op de verschillende energieopslagunits die in dit project worden gebruikt en bespreekt hun voor- en nadelen en hoe ze elkaar aanvullen in een microgrid.

1.7.4.1 Blue Battery (CGFB)

De Blue Battery is een bepaald type stroombatterij die water gecombineerd met natriumchloride als energiedrager gebruikt. Daarmee is het een van de enige echt milieuvriendelijke batterijen op de markt.

De markt voor energieopslag maakt hoofdzakelijk gebruik van lithium-ion batterijen, die gevaarlijk zijn voor het milieu, moeilijk te recyclen en gemaakt van materialen die slechts beperkt beschikbaar zijn. De stoffen die in de Blue Battery worden gebruikt zijn daarentegen niet brandbaar, vrij van chemicaliën en de twee hoofdcomponenten (water en natriumchloride) zijn twee van de meest overvloedige materialen ter wereld, waardoor de batterij een duurzame en schaalbare oplossing is voor de huidige energieopslagmarkt.

Naast deze milieuvriendelijke eigenschappen is een ander voordeel van de Blue Battery dat, omdat het een flowbatterij is, de stroomopwekking en de energiec capaciteit onafhankelijk van elkaar kunnen worden geschaald, een eigenschap die traditionele batterijen niet hebben. Dit maakt hem zeer flexibel voor vele toepassingen en verlaagt de prijs per kWh dankzij de overvloedige energiedrager (natriumchloride en water).

Het belangrijkste nadeel van de technologie is dat het rendement van de batterij lager is dan dat van andere batterijen. Dit is hoofdzakelijk te wijten aan het feit dat de membranen niet geoptimaliseerd zijn voor dit soort toepassingen en dat het stapelontwerp de efficiëntie vermindert. Laboratoriumresultaten met soortgelijke opstellingen laten rendementen zien van 20%-35% [5]. Een tweede probleem is dat membranen van hoge kwaliteit vrij duur zijn en nog speciaal moeten worden vervaardigd, waardoor de kosten van het produkt aanzienlijk stijgen. Bovendien heeft het systeem enige tijd nodig voordat het energie kan leveren of opslaan, als gevolg van het opstarten van de pompen en de matige spannings- en stroomopname. Dit betekent dat deze batterij meer geschikt is voor lange en gelijkmatige ontladings- of oplaadcycli dan voor korte energie-uitbarstingen..

1.7.4.2 H₂ Car as a power plant (CaPP)

De CaPP, ook bekend als de "Car as a Power Plant" is een concept waarbij een auto kan worden gebruikt als stroomgenerator om een microgrid gedurende langere tijd van energie te voorzien. In The Green Village is deze rol weggelegd voor een aangepaste Hyundai ix35, een waterstofauto met een stopcontact waarmee de auto indien nodig energie kan leveren aan het microgrid. De auto heeft een waterstoftank van 5 kg, die grote hoeveelheden energie kan opslaan en zeer snel stroom kan leveren aan het microgrid.

De belangrijkste voordelen van de CaPP zijn dat het systeem zeer betrouwbaar is, aangezien het een breed vermogensbereik kan produceren en een hogere capaciteit heeft in vergelijking met de Blue Battery. Als de auto volledig is uitgeschakeld, heeft hij geen interne ontlading. Een tweede voordeel is dat de autoaccu vrijwel direct energie kan gaan leveren aan het net als daarom wordt gevraagd, met een minimale opstarttijd. Dit maakt de CaPP zeer geschikt voor hoog energieverbruik, zoals vaatwassers en verwarmingssystemen. Bovendien heeft de CaPP een vehicle-to-grid efficiency van 43% [6]

De belangrijkste nadelen zijn dat de CaPP geen energie kan opslaan zoals de Blue Battery: daarvoor zou een electrolyser moeten worden geïnstalleerd om waterstofbrandstof uit het water te produceren, wat op dit moment niet mogelijk is. Daarom moet de tank bij elke ontlading worden bijgevuld in

gespecialiseerde waterstoftankstations, die in het grootste deel van Europa nog niet standaard zijn. Tijdens de duur van het project bevond het dichtstbijzijnde station zich op ongeveer 30 minuten rijden van het micronet.

Een gedetailleerd overzicht van dezelfde parameters die voor de Blue Battery zijn geanalyseerd, is opgenomen in bijlage B.

1.7.5 Vergelijking van energieopslagsystemen

Het huidige microgrid in The Green Village in Delft, dat zowel de Blue Battery als de CaPP als energieopslagunits gebruikt, heeft aangetoond dat beide technologieën elkaar kunnen aanvullen door hun zwakke punten effectief te overwinnen. De Blue Battery wordt gebruikt om de overtollige energie die door de zonnepanelen wordt geleverd op te slaan (en als de elektriciteitskosten laag genoeg zouden zijn zelfs energie van het elektriciteitsnet zelf op te slaan) en 's avonds, als het energieverbruik van de gebruikers toeneemt en de zonne-energie tekortschiet, energie aan de huishoudens af te geven. De CaPP zou dit systeem aanvullen door energie te leveren aan de huishoudens tijdens piekbelastingen (wanneer de huishoudens bijvoorbeeld de was doen of koken), wat een typische beperking is van de Blue Battery. Deze kan de huishoudens op deze momenten niet van voldoende stroom voorzien.

De huidige Blue Battery heeft een lage vermogensdichtheid en efficiëntie, maar is goedkoop, altijd beschikbaar, vrij schaalbaar en gaat lang mee. De CaPP heeft een hoge energiedichtheid en reageert snel, maar aangezien de behoeften van het voertuig altijd opgesplitst zijn tussen mobiliteit en energielevering, is hij niet altijd beschikbaar. De volgende tabel bevat aanvullende vergelijkingsparameters tussen de technologieën:

Tabel 3 Vergelijking van de Blue Battery en CaPP

	Frequency control	Hourly time shift	Daily time shift	Seasonal time shift	T&D Congestion relief	Black start	Microgrid / Off-grid applications	Uninterrupted Power Supply	Energy arbitrage	Peak reduction	Capacity firming	Reactive power/ Voltage support	Transport
Blue Battery	—	—	✓	—	✓	—	✓	✓	—	—	✓	—	✗
CaPP	—	✗	✗	—	—	✓	✓	✓	✗	✓	✓	—	✓

Legend: ✓ = Well suited — = Moderately suited ✗ = Poorly suited

1.7.6 Implementatie van microgrids in de gebouwde omgeving

In het volgende deel worden de eisen en hindernissen beschreven waarmee rekening moet worden gehouden bij de implementatie van de Blue Battery en de waterstofauto als energieopslageenheden in een microgridomgeving. Dit deel is grotendeels gebaseerd op een rapport van DNV GL over veiligheid, werking en prestaties van netgekoppelde energieopslagsystemen [7].

1.7.6.1 Blue Battery en CaPP overwegingen

Door haar aard heeft de Blauwe Batterij lage intrinsieke veiligheidsrisico's, vooral wanneer zij wordt vergeleken met andere soorten energieopslagsystemen met een vergelijkbare of hogere energiedichtheid. Desondanks moeten veiligheid en betrouwbaarheid gewaarborgd zijn bij het gebruik ervan, vooral in woonwijken zoals The Green Village.

1.7.6.1.1 Operatie en beheer

De werking van de Blue Battery wordt op elk moment bewaakt door een adequaat aantal sensoren: geleidbaarheidssensoren die de zoutconcentratie en dus het potentieel voor elektriciteitsopwekking in de tanks meten, waterniveaumeters op de tanks, druksensoren stromingssensoren op leidingen, algemene elektrische meetapparatuur.

De gebruikshandleiding, beschikbaar op de Blue Battery-locatie, bevat algemene informatie over voorschriften en verantwoordelijke personen, beschrijvingen van systeemcomponenten, gebruiksprocedures en veiligheidsaspecten. De onderhouds- en reparatiehandleiding bevat alle randvoorwaarden voor onderhoud, de onderhoudscyclus en veiligheidsaspecten.

Net als bij andere brandstofsysteemen is de werking van het CaPP (fuel cell electric vehicle) afhankelijk van het regelmatig bijvullen van waterstof in de tank van het voertuig. In het algemeen is dit ook nodig voor mobiliteit, hoewel de extra vraag voor V2G-toepassing de vraag naar brandstof doet toenemen.

De beschikbaarheid van waterstof onder de vereiste druk is momenteel een uitdaging aangezien waterstof niet op grote schaal wordt gebruikt voor mobiliteit. Er zijn momenteel slechts vijf operationele openbare waterstoftankstations (Den Haag, Rotterdam, Helmond, Hoofddorp en Arnhem) in Nederland, en er zijn plannen voor meerdere nieuwe stations om te worden gebouwd. De typische operationele kenmerken zijn een stille werking en relatief weinig onderhoud buiten het reguliere onderhoud van het voertuig.

1.7.6.1.2 Veiligheid

Vergeleken met andere EES-systemen levert het onverwachte verlies van energie uit de blauwe batterij geen directe veiligheidsrisico's op voor mens of natuur; er moeten echter wel veiligheidsmaatregelen worden genomen om oncontroleerbaar vrijkomen en energieverlies te voorkomen. Daarom zijn de gebruikelijke veiligheidsmaatregelen vastgesteld voor algemene gevaarlijke gebeurtenissen zoals botsingen, verbrijzeling, penetratie, hitte, water of elektrische risico's.

Specifieke veiligheidsproblemen in verband met de CaPP-technologie zijn:

- Waterstoflekkage: Commercieel geproduceerde voertuigen moeten strenge veiligheidstests ondergaan alvorens te worden vrijgegeven voor gebruik op de weg. De werking van het voertuig in V2G-modus veroorzaakt geen bijkomend risico van waterstoflekkage buiten dat veroorzaakt door rijcycli.
- Hoge gelijkspanning: De ontlading van de brandstofcel ligt in het bereik van 300 tot 400 V gelijkspanning, ver buiten het veiligheidsbereik van gelijkspanningen. Fouten en reststromen kunnen een gevaar vormen voor verkeerd geconfigureerde apparatuur.

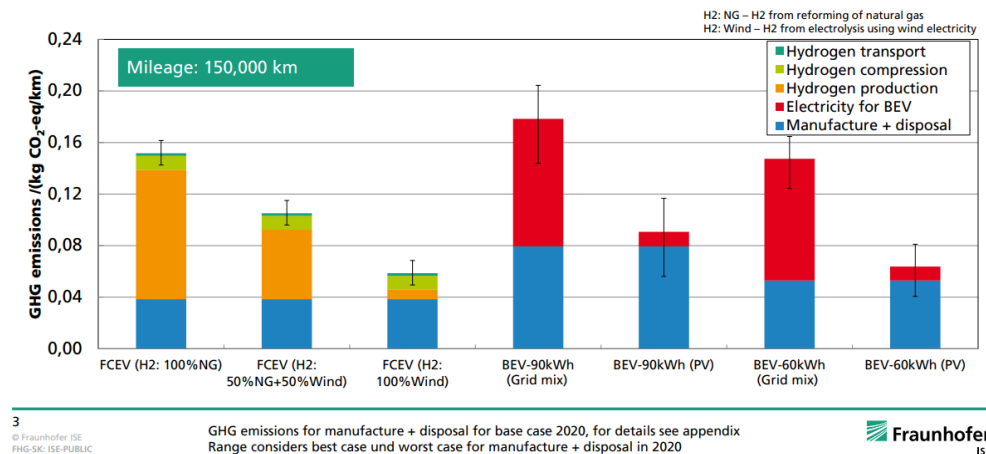
1.7.6.1.3 Milieueffecten

Zoals elk ander type EES, zullen de fabricage, de werking en de verwijdering van de Blauwe Batterij milieueffecten hebben en beïnvloed worden door zijn omgeving.

Zoals eerder vermeld, zijn alle chemicaliën in de Blauwe Batterij niet echt schadelijk voor het milieu. Niettemin moet ervoor worden gezorgd dat er geen buitensporige hoeveelheden zout water of elektrolyt in het milieu terechtkomen.

Zoals te zien is in figuur 2, is de uitstoot van broeikasgassen bij brandstofcel-elektrische voertuigen (FCEV's) vooral een functie van de waterstofmethode. De op een na grootste beïnvloedende factor is

de fabricage en verwijdering van voertuigmaterialen. De emissies ten gevolge van materiaalgebruik zijn vergelijkbaar met die van een 60kWh batterij elektrisch voertuig. De emissies per gereden kilometer voor volledig hernieuwbaar gewonnen waterstof liggen op een vergelijkbaar niveau met die van een BEV die wordt gevoed door hernieuwbaar opgewekte elektriciteit.



Figuur 2 Broeikasgassen voor verschillende typen auto's (BEV = EV auto, FCEC = Fuel Cell auto)

1.8 Conclusies

De gedetailleerde analyse in de vorige subhoofdstukken leidt het team tot de volgende conclusies.

De business case voor een microgrid hangt sterk af van het type (er zijn vier verschillende typen microgrids onderscheiden, namelijk op het net aangesloten stedelijke omgeving, op het net aangesloten landelijke omgeving, off-grid hernieuwbaar en off-grid fossiel) en het doel van het microgrid, evenals van de betrokken actoren, bijvoorbeeld de netbeheerder, de prosumenten en de energiecoöperatie. De kosten en besparingen in verband met een microgrid kunnen worden gecategoriseerd als elektriciteitsverkoop, opslag, beheer van de vraagzijde, netkosten, back-upstroom voor kritieke infrastructuur, uitgestelde investeringen in netaansluiting, verminderde elektriciteitsinvoer uit het elektriciteitsnet en verminderd verbruik van fossiele brandstoffen.

We hebben vastgesteld dat het microgridproject meestal lijkt op het type "op het net aangesloten stedelijke omgeving". Daarom zijn de besparingen in dit soort microgrids niet zo hoog als die in de off-grid of landelijke microgrids, maar de inkomsten kunnen nog steeds positief zijn, waar ondersteunende diensten, zoals Frequency Containment Reserve, mogelijk kunnen worden geleverd, en de verkoop van elektriciteit en netvergoedingen hoger kunnen zijn dan de potentiële kosten voor netinvesteringen.

Voor elk van de microgrids hangt het van de specifieke omstandigheden van het type af of een microgrid een efficiënt alternatief is voor een reguliere netaansluiting. De criteria om te beoordelen of een microgrid een goed alternatief is, kunnen worden ingedeeld in technische, economische, sociologische, juridische en organisatorische criteria.

Om de beste match voor ons project te bepalen, kijken we naar de drie belangrijkste doelstellingen:

- Optimaliseren van het eigen verbruik van lokaal opgewekte elektriciteit om de kosten van de invoer van energie te verminderen. Dit valt in de categorie "economisch" en aangezien de kosten van elektriciteit in Oost-Europa hoog zijn, past dit goed bij ons type microgrid.
- Vergroting van de autonomie van de gebruikers van het energiesysteem. Dit kan worden gecategoriseerd als 'Sociaal': de drang om duurzamer en meer zelfvoorzienend te worden is

meestal groot in netgekoppelde en stedelijke omgevingen. Dit maakt ons project zeer sociaal waardevol.

- De capaciteit van de aansluiting op het hoofdstroomnet verlagen om de maandelijkse kosten te verlagen, de benutting van het net te maximaliseren en dure of tijdrovende netinvesteringen te voorkomen. Deze functionaliteit is vooral een 'Economische', en typisch landelijke omgevingen (kunnen) hogere tarieven en dure netinvesteringen hebben.

Ons microgrid project bestaat uit 3 hoofdgroepen: energie opwekking, energie opslag en energie verbruik. De specifieke details voor elke groep zijn energiegebruikers (studenten in duurzame woningen en het kantoor in het groene dorp), energieleveranciers (zonnecellen en het elektriciteitsnet) en energieopslagsystemen (de Blue Battery en een auto op waterstof, die energie teruglevert aan het microgrid).

De netcontrole vormt het logische hart van het micronetwerk en maakt gebruik van algoritmen en beslisregels over wanneer extra stroom moet worden ingekocht via de PCC. Dergelijke mechanismen kunnen op veel verschillende manieren worden geprogrammeerd, en door de besturing aan te passen kan een stabielere werking worden bereikt. Dit heeft vooral betrekking op het samenspel tussen Blue Battery en CaPP, om optimaal gebruik te maken en te vermijden dat een tekort in het aanbod resulteert in de aankoop van extra energie.

Het huidige Blue Battery-ontwerp is beter geschikt voor grote energieopslagbehoeften dan voor toepassingen op het gebied van de stroomkwaliteit. Het wordt gekenmerkt door lage materiaalkosten, schaalbaarheid en lage zelfontlading, waardoor grote energieopslag mogelijk is op schalen en voor looptijden die doorgaans te duur zijn om te worden overwogen met andere vormen van opslag in micronetprojecten. De tekortkomingen zijn onder meer de lage rondloopefficiëntie, de korte vermogensoutput en de trage ramp-up: de Blue Battery vereist relatief overvloedige of goedkope energie op bepaalde tijdstippen voor zijn economisch gebruik en moet doorgaans worden gecombineerd met een andere vorm van opslag/opwekking die voor stroomkwaliteit kan zorgen.

Het waterstof-brandstofcelvoertuig (FCEV) is geschikt voor toepassingen op het gebied van stroomkwaliteit of stroomopwekking gedurende korte tijd. Gekenmerkt door zijn snelle reactietijd en nauwkeurige regeling kan het de op brandstof gebaseerde opwekking vervangen of de variabele hernieuwbare energieopwekking aanvullen. Het is echter duur tegen de huidige gecompriëerde waterstofkosten, waardoor het gebruik beperkt blijft tot systeemkritische toepassingen van kortere duur.

De Blue Battery wordt niet als gevaarlijk beschouwd uit de risicoanalyse, aangezien de oplossingen die in het proces worden gebruikt niet toxisch of gevaarlijk zijn. Zij werkt binnen veilige temperatuur-, stroom- en vermogensbereiken. De FCEV daarentegen werkt op hogere drukken en voltages, die meer controle en onderhoud vergen. De milieu-impact van beide technologieën is minimaal en heeft alleen betrekking op productie- en verwijderingsactiviteiten, terwijl hun werking volledig koolstofvrij is.

Tot slot kan uit deze overwegingen een SWOT-analyse worden afgeleid:

Tabel 4 Sterktes, Zwaktes, Kansen en Bedreigingen voor de Blue Battery en CaPP als duurzame en lokale elektriciteitsopslag in microgrids

Sterktes	Zwaktes
• Grotere integratie van lokale variabele hernieuwbare bronnen • Potentieel lagere elektriciteitskosten voor de consument • Bijna-energieneutrale wijken • Grotere veerkracht van het netwerk bij storingen en defecten • Grotere systeemflexibiliteit (door toevoeging of verwijdering van componenten), controle, efficiëntie en modulariteit	• Intermitterende en onzekere elektriciteitsproductie met als gevolg een slechte kwaliteit en instabiliteit van de stroomvoorziening. • Technische uitdaging in verband met de controle van een groot aantal gedistribueerde energiebronnen • Organisatorische uitdaging (groot aantal actoren met wederzijdse afhankelijkheid) • Aanzienlijke initiële investeringen zijn vereist • De toenemende complexiteit van het systeem kan de betrouwbaarheid doen afnemen • De relatieve onrijpheid van nieuwe technologieën
Kansen	Bedreigingen
• Toenemende vraag naar energieneutrale, van de burger afhankelijke en bijna autonome energiesystemen • Ondersteuning door meerdere Europese richtlijnen* • Potentieel om de behoefte aan zwaar vervuilende energiecentrales sterk te verminderen • Elektrische componenten zijn gemakkelijk te vervangen, te upgraden en aan te passen aan de huidige normen • Hogere participatie van hernieuwbare energiebronnen, milieuvriendelijker dan passieve distributiesystemen.	• Weerstand van conventionele nutsbedrijven • Gebruik van alternatieve bronnen voor lokale opwekking zoals diesel of biomassa in plaats van opslag • De toename van interconnectie en grensoverschrijdende handel tussen regio's en landen vermindert de behoefte aan microgrids

Hoofdstuk 2 Prestatie-analyse van de BlueBattery en H2 Car as Power Plant (CaPP) in hun kwaliteit van nieuwe elektriciteit-buffer technologieën (WP2)

2.1 Introductie

Het tweede werkpakket van het project heeft tot doel de twee opslagsystemen te beschrijven die in dit project zijn onderzocht - de Blue Battery en het op waterstof gebaseerde brandstofcel-elektrisch voertuig (FCEV). Het is als volgt gestructureerd in het Engelstalige rapport: eerst worden de indicatoren gepresenteerd die worden gebruikt om de opslagtechnologieën te beschrijven. Deze indicatoren worden gebruikt als metriek om de prestaties van de opslagsystemen te meten. Vervolgens worden de methoden beschreven die worden gebruikt om deze waarden voor elk van de opslagsystemen te berekenen. De geschatte waarden worden gebruikt om de sterke en zwakke punten van de gebruikte opslagtechnologieën te beschrijven. Ten slotte maken we een vergelijking tussen de twee technologieën om te zien hoe ze verschillende diensten kunnen leveren in hetzelfde micronetwerk. In dit Nederlandstalige verslag is een beknopt overzicht gegeven van methodieken en resultaten, voor het Engelstalige rapport kunt u contact opnemen met AquaBattery.

2.2 Geselecteerde metrieken en methodes

Er zijn verschillende toepassingen van energieopslag binnen gedistribueerde energiesystemen. Een uitgebreide beschrijving van de verschillende opslagtoepassingen en de voordelen voor de verschillende belanghebbenden wordt gegeven in [8]. In grote lijnen zijn de macro-doelstellingen voor het gebruik van opslag binnen een microgrid als volgt:

- I. Verhoogd gebruik van lokaal opgewekte hernieuwbare energie
- II. Het verhogen van de kwaliteit van de geleverde stroom
- III. De verlaging van de kosten van de geleverde stroom

Binnen deze macro-doelstellingen worden specifieke technische kenmerken van het gebruikte opslagsysteem geïdentificeerd, die de macro-doelstellingen beïnvloeden. Tenslotte wordt een reeks indicatoren vastgesteld die worden gebruikt om het kenmerk te kwantificeren. Dit alles is gedefinieerd voor de Blue Battery en voor de Car as a Powerplant, welke beschreven staat in het Engelstalige rapport (op verzoek beschikbaar).

Representatieve waarden voor andere opslagtechnologieën, variërend van diverse elektrochemische, mechanische, elektrische en vermogen-naar-gas opslagtechnologieën, zijn te vinden in [9]. Vergeleken met andere opslagtechnologieën in termen van ontladingsduur en responstijden, overlapt de FCEV met loodzuurbatterijen, lithium-ionbatterijen en vanadium redox flowbatterijen. De FCEV-respons lijkt sterk op die van Li-ionbatterijen, die een vergelijkbare gravimetrische energiedichtheid (0,2-0,6 kWh/kg) en responstijd (milliseconden tot seconden) hebben [10]. Li-ion-accu's hebben echter meestal een hogere gravimetrische energiedichtheid (0,5-3 kWh/kg) en een hogere volumetrische energie- en energiedichtheid.

Als zodanig wordt de FCEV gekenmerkt door een snelle respons en een relatief lage totale energieopslagcapaciteit, grotendeels omdat de mobiliteitseisen haar beperken. Het is belangrijk op te merken dat deze cijfers alleen betrekking hebben op ontlading en dat de tijd voor energieopslag

losgekoppeld is van de systeemkenmerken van de FCEV. Tabel 9 geeft een overzicht van de geschiktheid van de Blue Battery en de waterstof FCEV voor verschillende opslagtoepassingen op basis van de beschreven technische kenmerken.

Tabel 5 Geschiktheid van waterstof FCEV en Blue Battery voor verschillende opslagtoepassingen (beschrijvingen zijn in het Engels gebleven, gezien Nederlandse terminologie niet/te weinig wordt gebruikt in het veld)

	Frequency control	Hourly timeshift	Daily timeshift	Seasonal timeshift	T&D Congestion relief	Black start	Microgrid/Offgrid applications	Uninterrupted Power Supply	Energy arbitrage	Peak reduction	Capacity firming	Reactive power/voltage support	Transport
Blue Battery	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Red
Waterstof FCEV	Yellow	Red	Red	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Yellow	Green

Green	Goed geschikt
Yellow	Gematig geschikt
Red	Slecht geschikt

¹ Wij verwijzen naar een reeks lithium-ijzerfosfaatbatterijen (LFP), lithium nikkel kobalt aluminiumbatterijen (NCA) en lithium nikkel mangaan kobaltbatterijen (NMC) die meestal worden gebruikt voor toepassingen in de automobielsector en in het elektriciteitsnet.

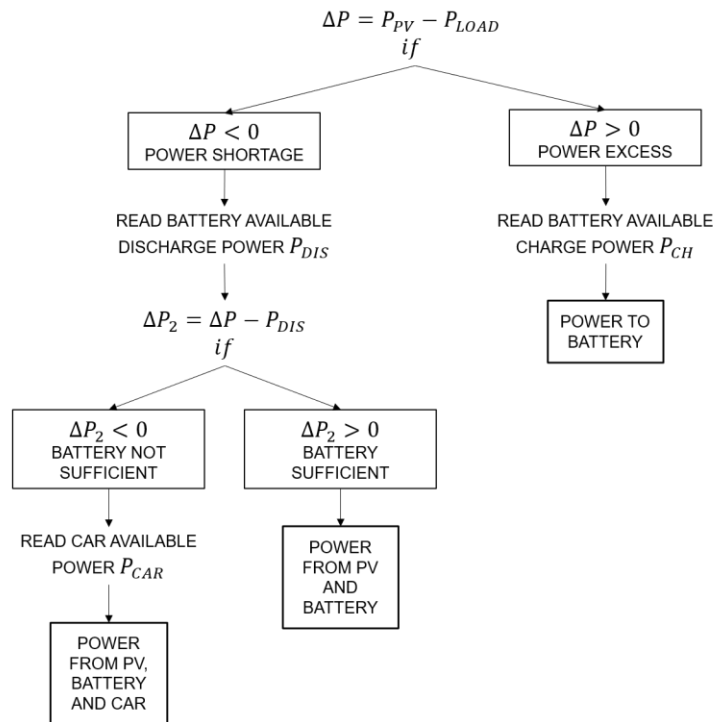
2.3 Green Powered en Peak Shaving scenario's

De Blue Battery en de waterstof FCEV ontvangen en verzenden informatie naar de centrale controller van het micronet, die een reeks berekeningen en logische beslissingen uitvoert om de energiestroom van de eenheden te beheren. De twee scenario's, verschillend in doel en logica, worden in de volgende sectie beschreven.

Beide scenario's beginnen met het evalueren van het energieverval tussen de energie die wordt gevraagd door de belasting (het huis) en de energie die beschikbaar is bij de belangrijkste hernieuwbare bron (PV-panelen). Vervolgens worden verschillende logische paden gevolgd, afhankelijk van het gekozen scenario.

2.3.1 Green Powered

In de Green Powered-modus is het de bedoeling het groene energieverbruik te maximaliseren en de inname van energie van het net te minimaliseren. De Blue Battery wordt gebruikt om het zelfverbruik van zonne-energie te optimaliseren, en de waterstof levert de rest van het vermogen.



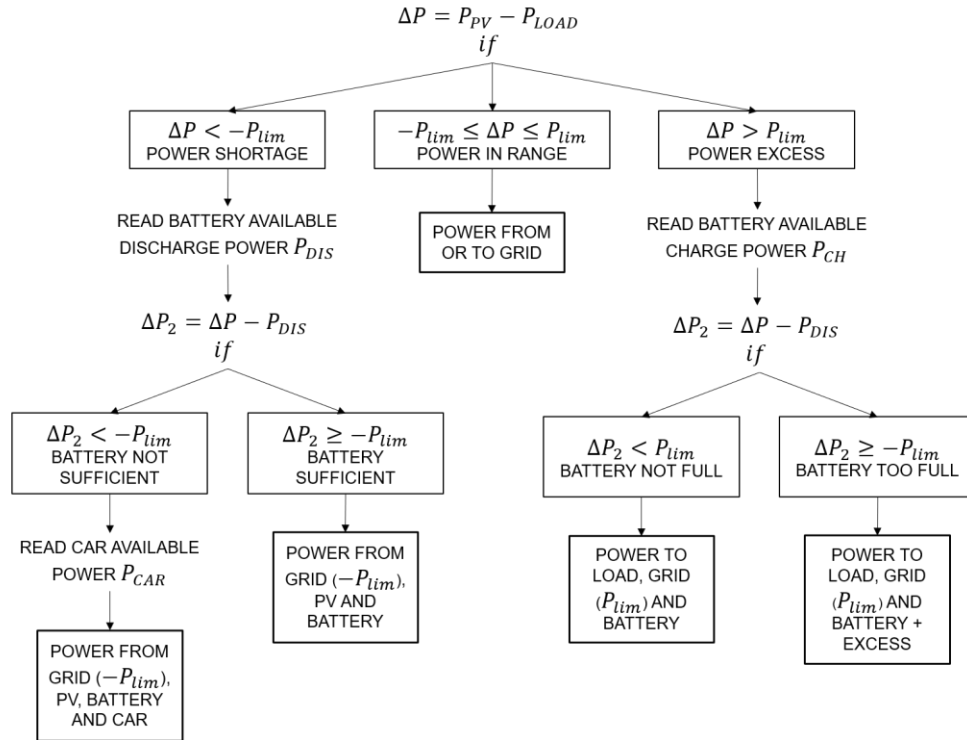
Figuur 3: Schema van microgrid Green Powered operationele modus

In geval van een energietekort (de belasting vraagt meer stroom dan beschikbaar is van de PV-panelen, ΔP is negatief), wordt de blauwe batterij ondervraagd over hoeveel stroom deze kan leveren, op basis van de huidige laadtoestand. Als de batterij dan niet voldoende is (ΔP_2 is negatief), dekt de auto het nieuwe tekort, anders (ΔP_2 is positief) wordt alle ontbrekende energie uit de batterij geleverd. Als er toch nog extra energie nodig is, wordt deze uit het primaire net gehaald.

In het geval van een energieoverschot (belasting vraagt minder vermogen dan beschikbaar is van de PV-panelen, ΔP is positief), kan het extra vermogen in de batterij worden opgeslagen, afhankelijk van de laadtoestand en tot de maximale capaciteit. Als de beschikbare energie groter is dan de accucapaciteit, wordt deze aan het hoofdnets toegevoerd.

2.3.2 Peak Shaving

In de Peak Shaving-modus is het doel het gebruik van de netaansluiting binnen bepaalde grenzen ($-P_{lim}, P_{lim}$) te houden, door de Blue Battery en de waterstofauto te gebruiken om de verbruiks- of opwekkingspieken te dekken.



Figuur 4: Schema van microgrid Peak Shaving operationele modus

Dit scenario omvat drie verschillende paden, waarvan er twee lijken op de Green Powered modus, met grenzen verschoven van nul naar de netvoedingslimieten.

In het geval van een negatieve piek, wat betekent dat de vereiste energie groter is dan de netvoedingslimiet (ΔP is kleiner dan $-P_{lim}$, negatief betekent dat energie van het primaire net naar het micronet stroomt), wordt de blauwe batterij ondervraagd over zijn laadtoestand en stroomcapaciteit. Als de batterij niet voldoende is (ΔP_2 is negatief), levert de auto het resterende vermogen.

In het geval van geen pieken, d.w.z. dat de benodigde energie in het grensvermogensbereik valt, zijn zowel de batterij als de waterstofauto's niet betrokken bij de energiebalans.

In het geval van een productiepiek, wat betekent dat de zonne-energie meer is dan wat de belasting en het net kunnen opnemen, wordt extra energie opgeslagen in de blauwe batterij tot de maximale capaciteit.

2.4 Simulaties & beschrijving van model

Het model is ontwikkeld in MATLAB Simulink (versie 2020a). Voor achtergrond en inzichten in het model verwijzen wij u graag door naar het Engelstalige rapport.

2.5 Resultaten en discussie

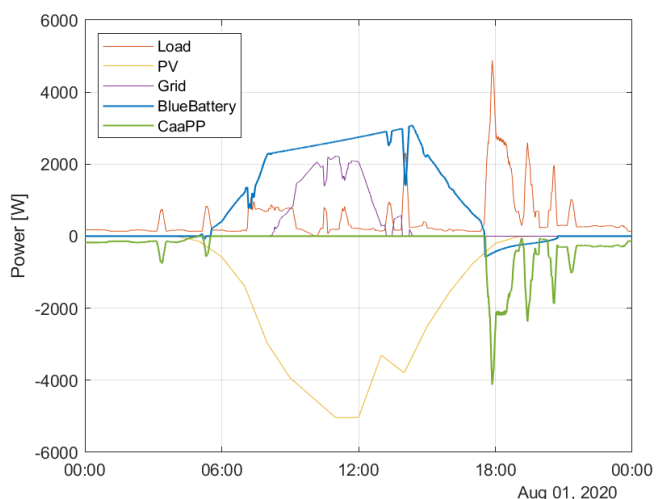
De simulatie levert vele resultaten op, gezien de opties en parameters die kunnen worden geschakeld en gewijzigd. De volgende figuren tonen enkele relevante simulaties van het model. Hier betekent negatief vermogen altijd opwekking/opname uit het net, en positief vermogen betekent verbruik/levering aan het net. Het vermogen wordt gemeten in Watt, terwijl de eenheid op de horizontale as in tijdstappen van 10 seconden is. Elke 1000 eenheden komt dus overeen met ongeveer 2,8 uur.

Bovendien, in de volgende gevallen:

- Het referentiebelastingsprofiel is het profiel dat is geregistreerd op maandag 7 september 2020. Het omvat alle typische pieken ('s morgens en 's avonds) en dalen ('s nachts en tijdens de werkuren) die op andere dagen worden waargenomen.
- Het initiële H2-niveau van de waterstofauto wordt verondersteld maximaal te zijn, d.w.z. dat de auto om middernacht volledig is opgeladen.
- Het aantal batterijstapels van de blauwe batterij wordt vastgesteld op 10, gelijk aan het aantal momenteel geïnstalleerde stapels, en de SOC wordt aanvankelijk vastgesteld op 30% omdat de batterij gewoonlijk 's avonds ontladt.

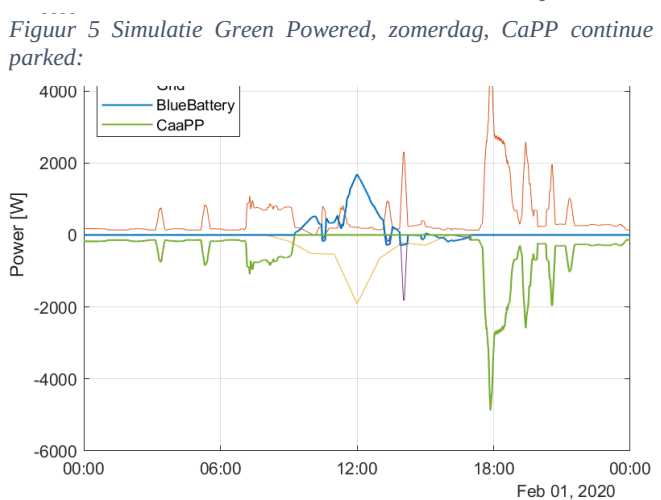
Casus 1 - Green Powered, zomerdag, CaPP continue geparkeerd:

Op een zeer zonnige dag, zoals hier gesimuleerd, kan de batterij het grootste deel van de geproduceerde zonne-energie opslaan en, samen met de waterstofauto, de belastingpiek 's avonds volledig opvangen.



Casus 2 - Green Powered, winterdag, CaPP gebruikspatroon per uur:

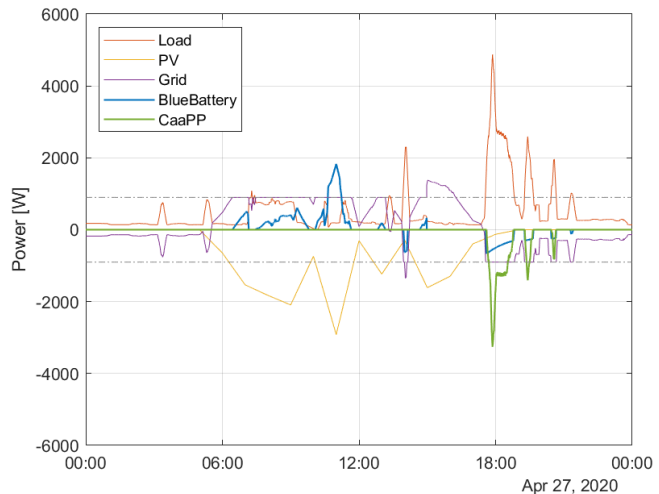
In het geval van een minder zonnige dag en in de simulatie dat de auto niet geparkeerd staat tijdens de werkuren, krijgt de batterij nog steeds voldoende lading van de zonne-energie om het grootste deel van de gevraagde belasting te dekken tijdens de zonnige uren, terwijl de auto het overneemt in de ochtend en avond. Het is geen toeval dat de pieken in de belasting samenvallen met de beschikbaarheid van de auto, aangezien deze worden veroorzaakt doordat de huishoudens thuis zijn en elektriciteit verbruiken.



Figuur 5: Simulatie Green Powered, zomerdag, CaPP continue geparkeerd:
Figuur 6: Simulatie Green Powered, winterdag, CaPP gebruikspatroon per uur

Casus 3 – Peak Shaving, lentedag, CaPP gebruikspatroon per uur:

In de volgende peak shaving simulatie kunnen we zien hoe het systeem in staat is om de netinlaat en -output tussen de grenzen te houden (hier ingesteld op ± 900 W) tijdens een matig zonnige dag. Extra zonne-energie wordt opgeslagen in de blauwe batterij, terwijl pieken in de belasting worden opgevangen door een combinatie van de batterij en de waterstofauto.



Figuur 7 Simulatie Peak Shaving, lentedag, CaPP gebruikspatroon per uur

2.6 Conclusies

In dit hoofdstuk is de structuur van het microgridmodel beschreven. Het bouwen van de simulatie vergde veel vereenvoudigingen ten opzichte van het echte systeem, vooral wat betreft de besturingslogica en het gedrag van de opslagsystemen. Het resulterende model is nog steeds zeer ideaal, vooral voor de volgende aspecten:

- De simulatie werkt in discrete timesteps van 10 seconden, terwijl het echte systeem de gegevens op een snellere manier verwerkt. De tijdstap kan theoretisch worden verkleind indien preciezere PV- en belastingsprofielen beschikbaar zijn, ten koste van een langere rekentijd.

Het Blue Battery-blok modelleert nauwkeurig het elektrochemische gedrag van de stapels, waarbij rekening wordt gehouden met de aanzienlijke elektrische verliezen. Het simuleert echter geen andere verliezen zoals co-ion-transport, waterlekage tussen de membranen, die de belangrijkste bijdrage leveren aan ongewenste verschijnselen zoals zelfontlading en elektro-osmose.

- De CaPP wordt alleen gemodelleerd aan de hand van geschatte relaties tussen geleverd vermogen en waterstofverbruik. Een meer gedetailleerd model van het interne brandstofcelmechanisme zou de nauwkeurigheid van de simulatie ongetwijfeld verbeteren.

Over het geheel genomen kan het model een redelijke schatting geven van de relatie tussen de input-PV en de belastingsprofielen en het gedrag van de accu en de auto in beide scenario's, zoals in het volgende hoofdstuk met validatie zal worden aangetoond.

Hoofdstuk 3 Integratie van alle productie-eenheden en belastingen in het elektrische netwerk van The Green Village (WP3)

3.1 Componenten & Microgrid lay-out

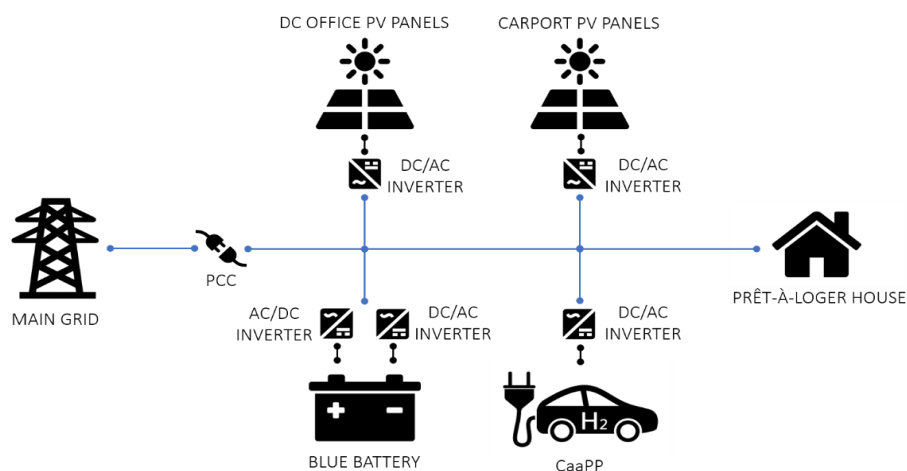
De Blue Battery, de waterstofauto (CaPP) en de lokale microgrid controller zijn de belangrijkste elementen binnen dit project. De onderzoeksdoelstelling was het vinden van mogelijke toekomstige toepassingsscenario's en reële commercialisatiemogelijkheden voor de Blue Battery in combinatie met andere energieopslagtechnologieën zoals de CaPP in verschillende microgrid lay-outs met een lokale controller. De evaluatie van de met het model geproduceerde gegevens is voortaan ook gericht op en rond de rol van de Blue Battery, CaPP en lokale controller in elk van de scenario's.

Het Microgrid van de Green Village bevat meer, en variabele, fysieke verbindingen, vooral belastingen, dan het model zal evalueren. Niettemin, door het verzamelen van individuele gegevens door het dataloggen van alle componenten op hun punt van aansluiting op het microgrid, kan een "virtueel microgrid" van gegevensprofielen in de tijd worden gecreëerd. Dit zal worden vergeleken met de theoretische resultaten die uit de simulatie naar voren komen. Het micronet kan in de simulatie worden uitgebreid of aangepast om verschillende opstellingen te testen en te evalueren.

De volgende componenten worden gebruikt in het systeem in kwestie:

- Blue Battery
- Car as a Power Plant (CaPP)
- PV apparatuur op het DC-kantoor
- PV apparatuur op de Carport
- Laadprofiel van het Prêt-à-Loger huis

Figuur 8 Schematisch overzicht van The Green Village microgrids' fysieke AC bus met de belangrijkste projectonderdelen van opwekking, opslag en tot energieverbruik.



De PV-apparatuur, CaPP en Blue Battery werken op gelijkstroom. Het beoogde micronetwerk is echter een AC-netwerk, zoals te zien is in figuur 11. De opstelling maakt dus gebruik van omvormers bij elk van de apparaten om ze individueel aan te sluiten op het wisselstroomnetwerk. Deze

omvormers zijn van verschillende merken en types, en hebben dus allemaal verschillende rendementen, waarmee rekening wordt gehouden in de simulatie. De Blue Battery gebruikt extra AC-DC omvormers (gelijkrichters) voor het opladen vanuit de wisselstroom van het micronetwerk, in plaats van gelijkstroom van de PV-panelen te gebruiken. Dit is een beperking van The Green Village microgrid en een gevolg van budgettaire beperkingen. De belasting, bestaande uit de duurzame studentenwoningen, werkt op standaard wisselstroom en ondervindt dus geen verdere verliezen.

Verder staan in het Engelstalige rapport uitgebreide beschrijvingen van de verschillende subcomponenten van het systeem, inclusief hun eigen batterijbeheersysteem (BMS) indien aanwezig. Veel informatie is ook aanwezig over beschrijving van de microgrid-controller, de GUI, de interface in Grafana, en indien U deze gegevens wilt doorlezen, schroom niet ons te contacteren. Om overzicht en duidelijkheid te bewaren wordt er nu een overstap gemaakt naar de resultaten.

3.2 Experimentele resultaten

In dit hoofdstuk presenteren en analyseren we de resultaten van het in bedrijf zijnde micronetwerk. Alle componenten van het microgrid zijn opgeslagen en gevisualiseerd in een online repository, Grafana, zoals eerder vermeld. In het bijzonder zijn de plots die in deze sectie worden gepresenteerd gebaseerd op werkelijke stroomprofielen die in het platform zijn verzameld, met hoge nauwkeurigheid en een timestep van ongeveer 2 seconden tussen elk datapunt, en later verwerkt met MATLAB.

Het is van essentieel belang te vermelden dat de Blue Battery-installatie met enkele problemen te kampen had, voornamelijk interne lekkage in zeven stacks en elektrische problemen in twee stacks. Daarom werd besloten om slechts één van de tien beschikbare membraanstacks te gebruiken voor het testen van het micronetwerk, wat optimaal bleek te werken en de beste prestaties opleverde en geëxtrapoleerd kan worden naar negen stacks. De hieronder gepresenteerde resultaten zijn een simulatie van de werking van het micronetwerk met tien stacks, gebaseerd op het werkelijke gedrag van één stack. Aangezien deze componenten vergelijkbaar zijn en elektrisch in serie geschakeld, kunnen we vertrouwen op de simulatie en deze beschouwen als een geldige weergave van hoe de Blue Battery zou werken met alle stacks tegelijkertijd in bedrijf.

De Green Powered modus werd ononderbroken getest tussen 1 september en 16 oktober, voor een totaal van 35 dagen. Niet alle dagen konden echter voor de analyse in aanmerking worden genomen, met name

- 1 - 6 september: het systeem werd afgesteld en klaargemaakt voor gebruik, in het bijzonder werd de Blue Battery software gecontroleerd op noodacties en verbinding met het microgrid.
- 21 september - 16 oktober: het team werd geconfronteerd met enkele problemen met de externe dataleverancier in de communicatie met onze datasoftware - dat wil zeggen nullast en/of het uitlezen van fotonuut vermogen door het microgrid-systeem.
- 23 september - 1 oktober: een probleem met het brandstofbeheersysteem van de waterstofauto verhinderde het verkrijgen van volledige gegevens.

Daarom werd overeengekomen alleen de twee weken van 7 tot 18 september als zinvolle metingen voor het Green Powered scenario te beschouwen.

Aan de andere kant werd de Peak Shaving modus getest tussen 22 oktober en 27 november, een kortere periode vanwege het naderende einde van het project. Als gevolg van kalibratieprocedures en technische problemen kon het team slechts fragmentarische gegevens verkrijgen: sommige dagen kunnen niet in aanmerking worden genomen, en op verschillende andere ontbreken sommige delen (bv. ochtend of avond). In het bijzonder:

- 22 oktober - 4 november: kalibratie van Blue Battery schaling om het gedrag van tien stacks rechtstreeks in het gegevensplatform Grafana te simuleren
- 11 - 12 november: opnieuw werd nullast en/of fotovoltaïsch vermogen uitgelezen door het microgrid systeem vanwege communicatieproblemen met externe instanties
- 17-24 november: de raspberry pi die in de waterstofauto werd gebruikt ging stuk, het duurde enkele dagen voor er een nieuwe was

Tot slot werden niet-continue gegevens van 4 tot 25 november verzameld en geanalyseerd.

In het volgende deel wordt de analyse van de drie meest relevante testdagen voor elke modus gepresenteerd. Deze dagen zijn gekozen als beste vertegenwoordigers van het gedrag van het micronet in beide scenario's, met een goed PV- en belastingsprofiel en een goede batterij- en auto-respons.

De resultaten worden geanalyseerd aan de hand van de volgende grafieken:

- Ruwe energieprofielen + gladde en beter leesbare versie
- Gebruik van zonne-energie
- Aandeel in de belasting
- Belastings- en restbelastingsprofiel
- Belastings- en netduurkrommen
- Energieproductie en -gebruik
- Energiestromen en energiebesparing

Energiestromen zijn berekend als

$$E [kWh] = \frac{\int_{t=0}^{t=24h} P dt}{3600000}$$

Waarbij P het vermogen in W is, t de tijd in een dag, en 3600000 een omrekeningsfactor om kWh te verkrijgen.

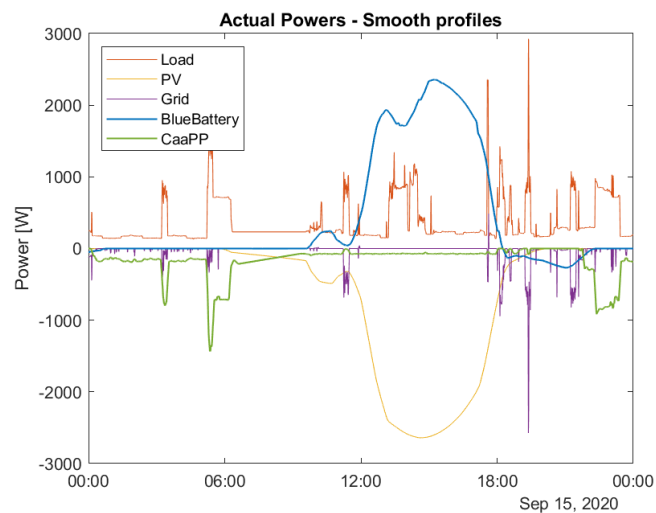
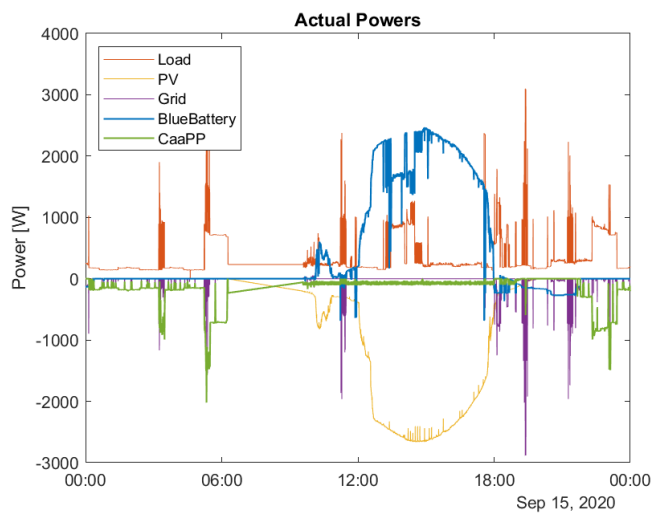
De bijdragen in de delen b) en c) zijn eenvoudig berekend als de bijdrage van de specifieke component aan de totale bron of put (bv.: CaPP-bijdrage aan belasting = $\frac{En. CaPP}{En. Load}$). In deel g), *Totaal gevoedde energie* wordt berekend als de som van alle geproduceerde energie ($En. PV + En. vanuit Grid + En. vanuit Batterij + En. CaPP$) waar *Saved energy* de som is van de energie die aan het net wordt toegevoerd door alleen de opslagunits ($En. from Battery + En. CaPP$). Het bespaarde percentage wordt berekend door = $\frac{Saved energy}{Total fed energy}$.

3.3 Green Powered

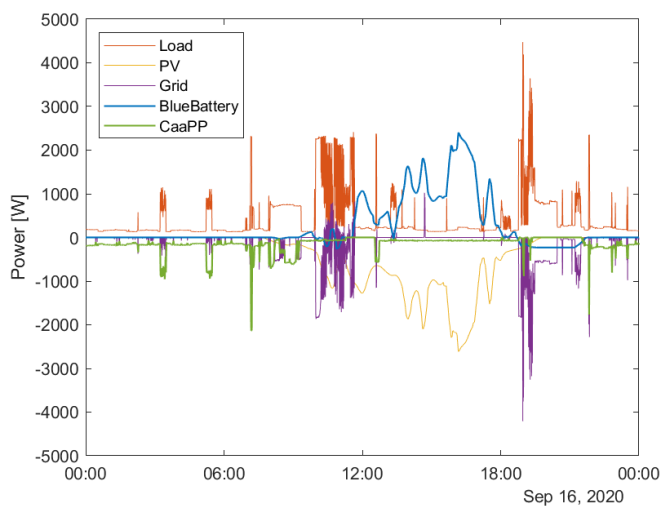
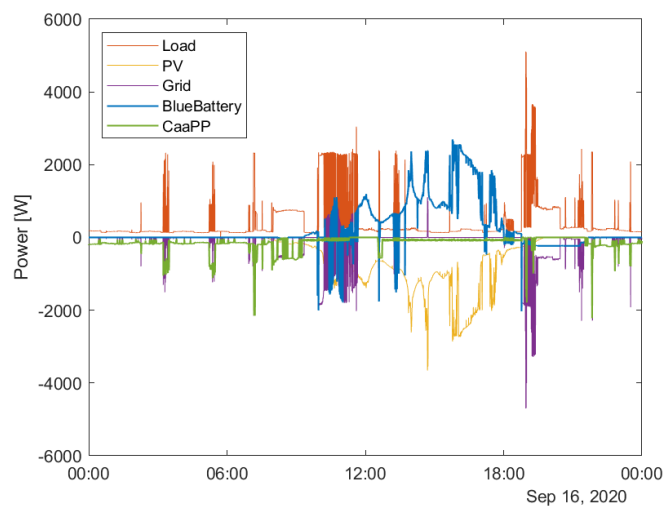
De in aanmerking genomen testdagen zijn 15, 16 en 17 september 2020. De gegevens voor de blauwe batterij hebben aanvankelijk betrekking op slechts één stapel en zijn geschaald met 10 om de prestaties te simuleren met gebruikmaking van alle beschikbare tien stacks.

3.3.1 Ruwe vermogensprofielen + beter leesbare versie

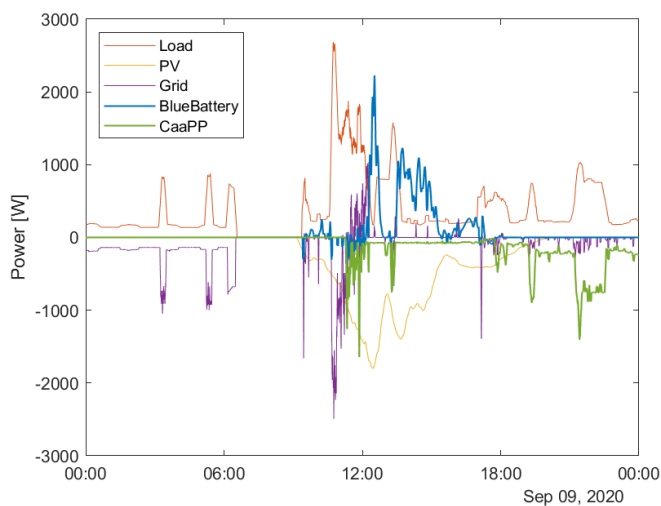
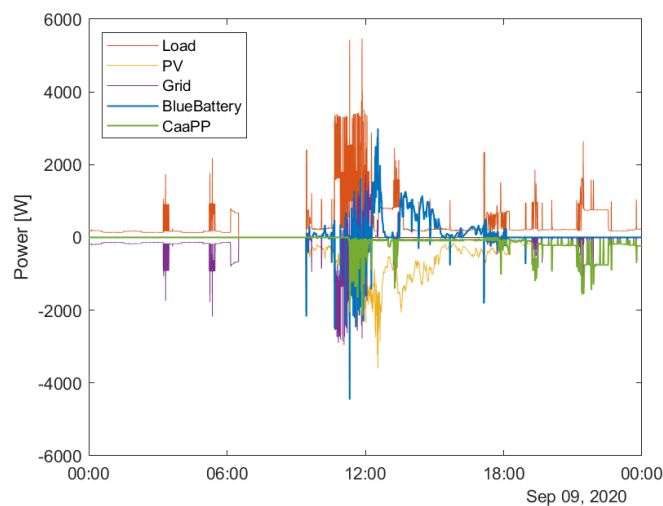
Sept
15th



Sept
16th



Sept
9th

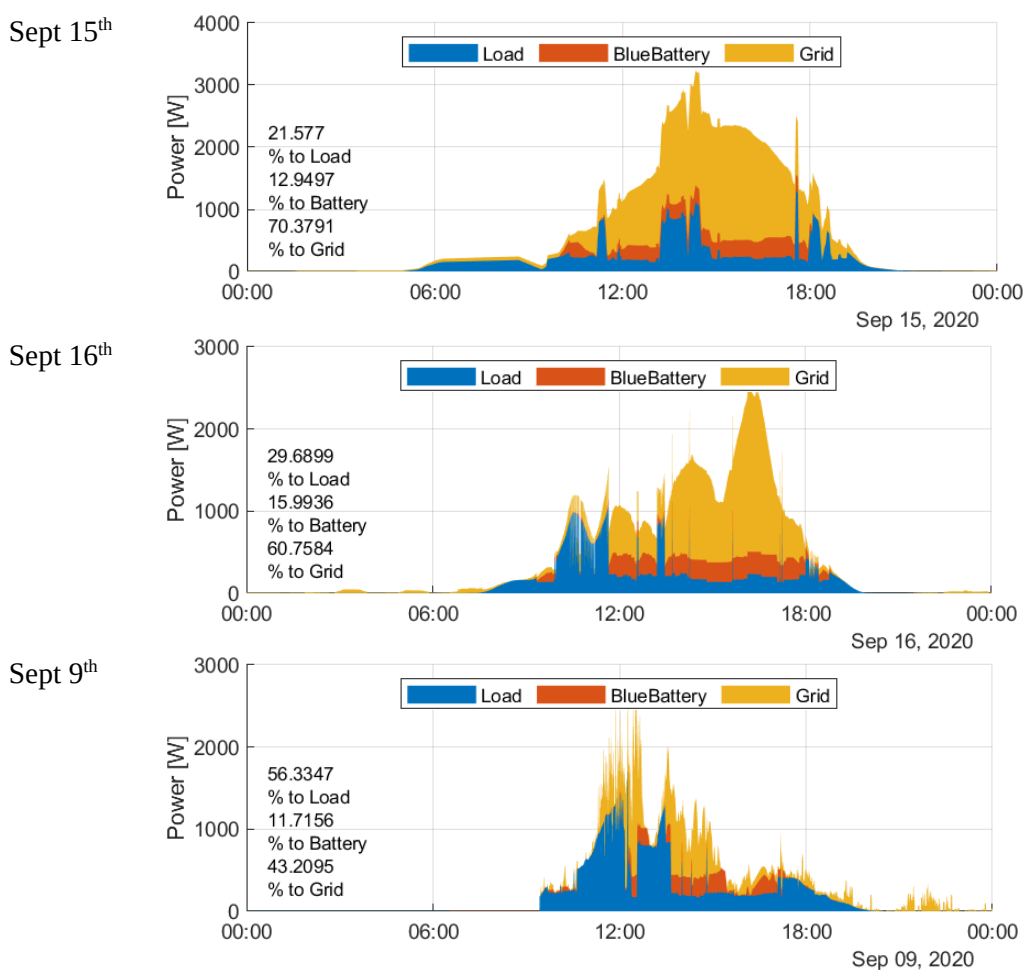


Figuur 9 Rechts ruwe gegevens en links gladde profielen van 9, 15 en 16 september 2020.

Standaardkenmerken van alle dagprofielen zijn:

- Gedurende de nacht (automatische apparaten die aangaan in het Pret a loger huis), Belastingen rond lunchtijd en vooral 's avonds, wanneer de huiseigenaren het meest elektriciteit gebruiken.
- De PV-gegevens hebben een maximaal vermogen rond 13. De referentiedagen waren overwegend zonnig, wat een maximaal vermogen van bijna 3 kW opleverde.
- De waterstofauto is bijna altijd beschikbaar (alleen op 9 september 's ochtends afgekoppeld).
- De Blue Battery laadt meestal op tijdens de zonnige uren en ontlad zich 's avonds tot de minimum lading van 30%, zodat ook 's nachts en de volgende ochtend geen stroom wordt geleverd.

3.3.2 Gebruik van zonne-energie

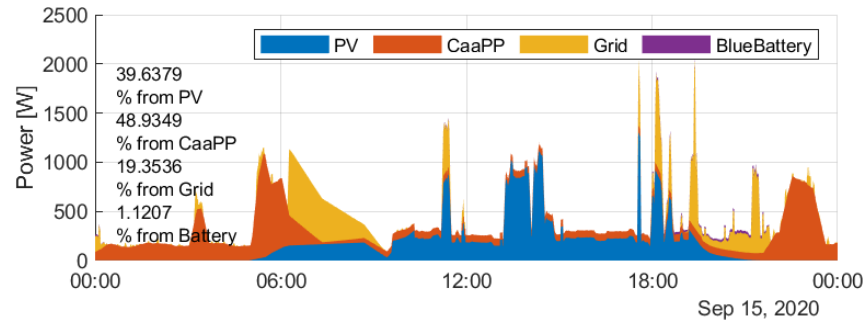


Figuur 10 Gebruik van zonne-energie groen-powered scenario voor september van 9, 15 & 16 september 2020

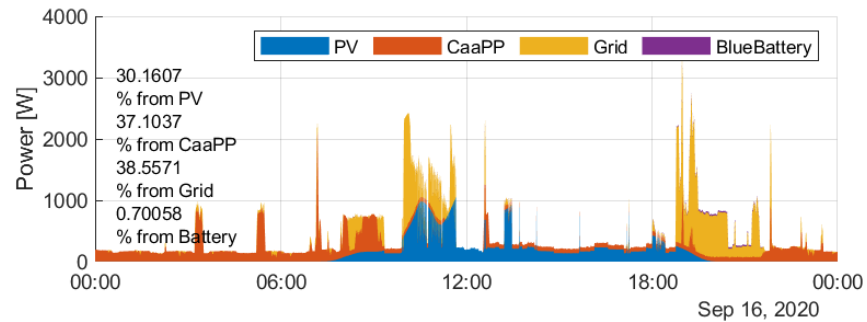
De drie grafieken tonen drie dagen met verschillende intensiteit van de zonne-energie, van een zonnige tot een bewolkte dag. Uit deze vergelijking kunnen we concluderen dat de blauwe batterij veel van de beschikbare zonne-energie kan opslaan, vooral op een zonnige dag, terwijl er niet veel energie overblijft voor de batterij in het geval van een bewolkte dag.

3.3.3 Laadverdeling

Sept 15th



Sept 16th



Sept 9th

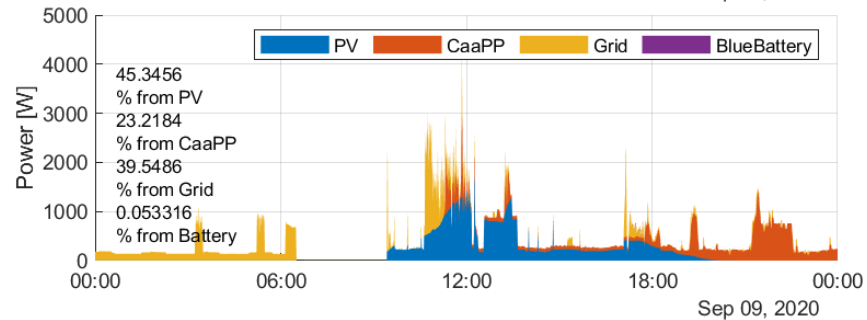
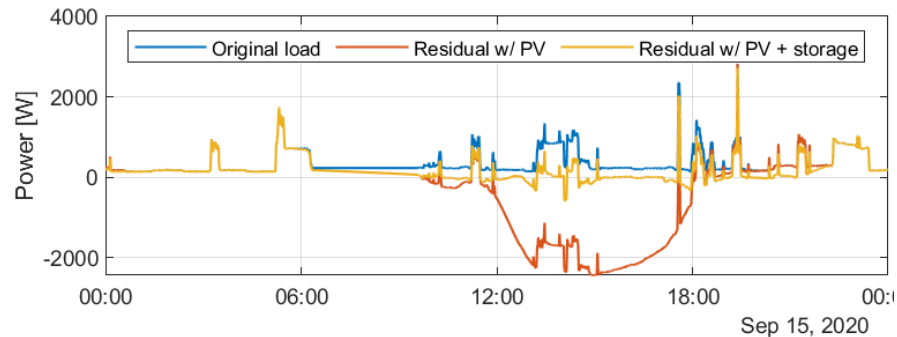


Figure 11 Load share profiles green-powered scenario from September 9th, 15th & 16th 2020

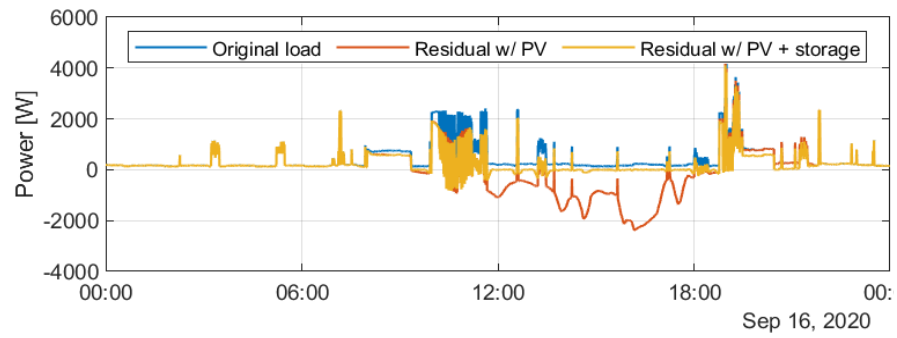
Deze grafieken laten duidelijk een verwachte trend zien: de belasting haalt overdag voornamelijk stroom uit de zon, terwijl 's avonds en 's nachts gebruik wordt gemaakt van opslagdiensten (accu en auto). Stroom van het net is alleen nodig in geval van belastingspieken of op 9 september 's nachts, wanneer de auto niet beschikbaar was en de batterij niet voldoende was opgeladen.

3.3.4 Laad- en restladingsprofiel

Sept 15th



Sept 16th



Sept 9th

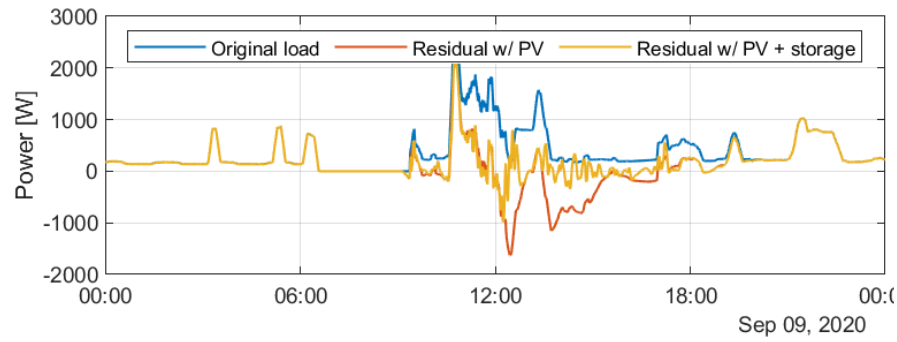
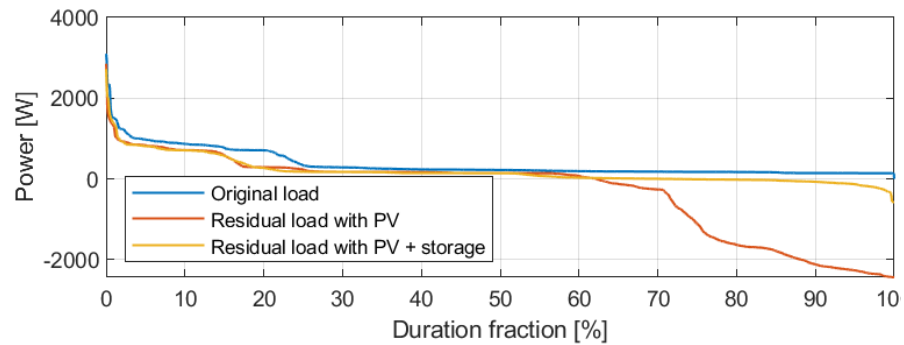


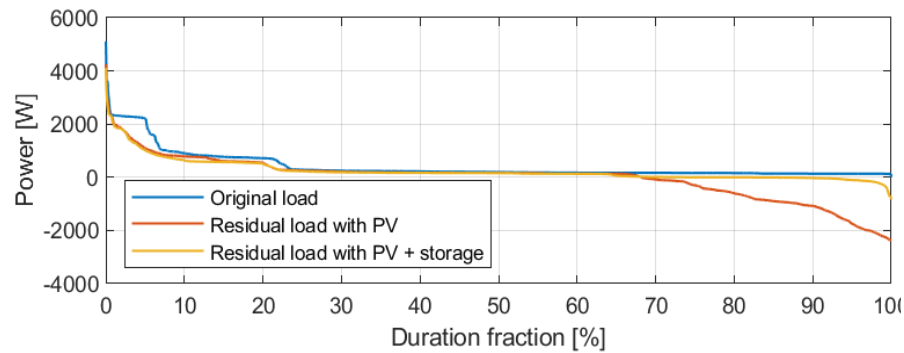
Figure 12 Load and residual profiles green-powered scenario from September 9th, 15th & 16th 2020

Laadduukurves

Sept 15th



Sept 16th



Sept 9th

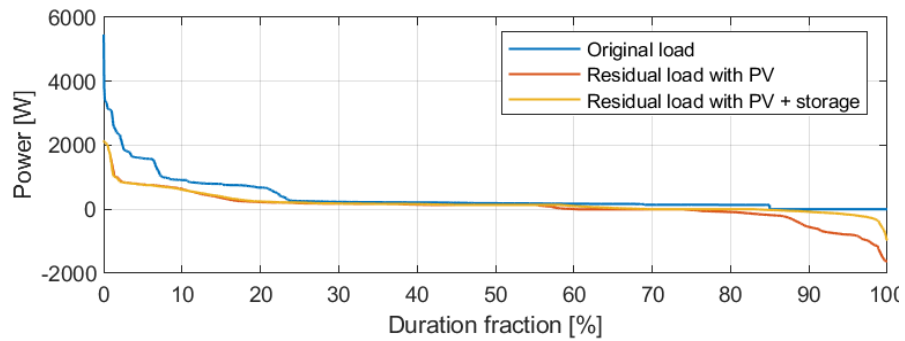
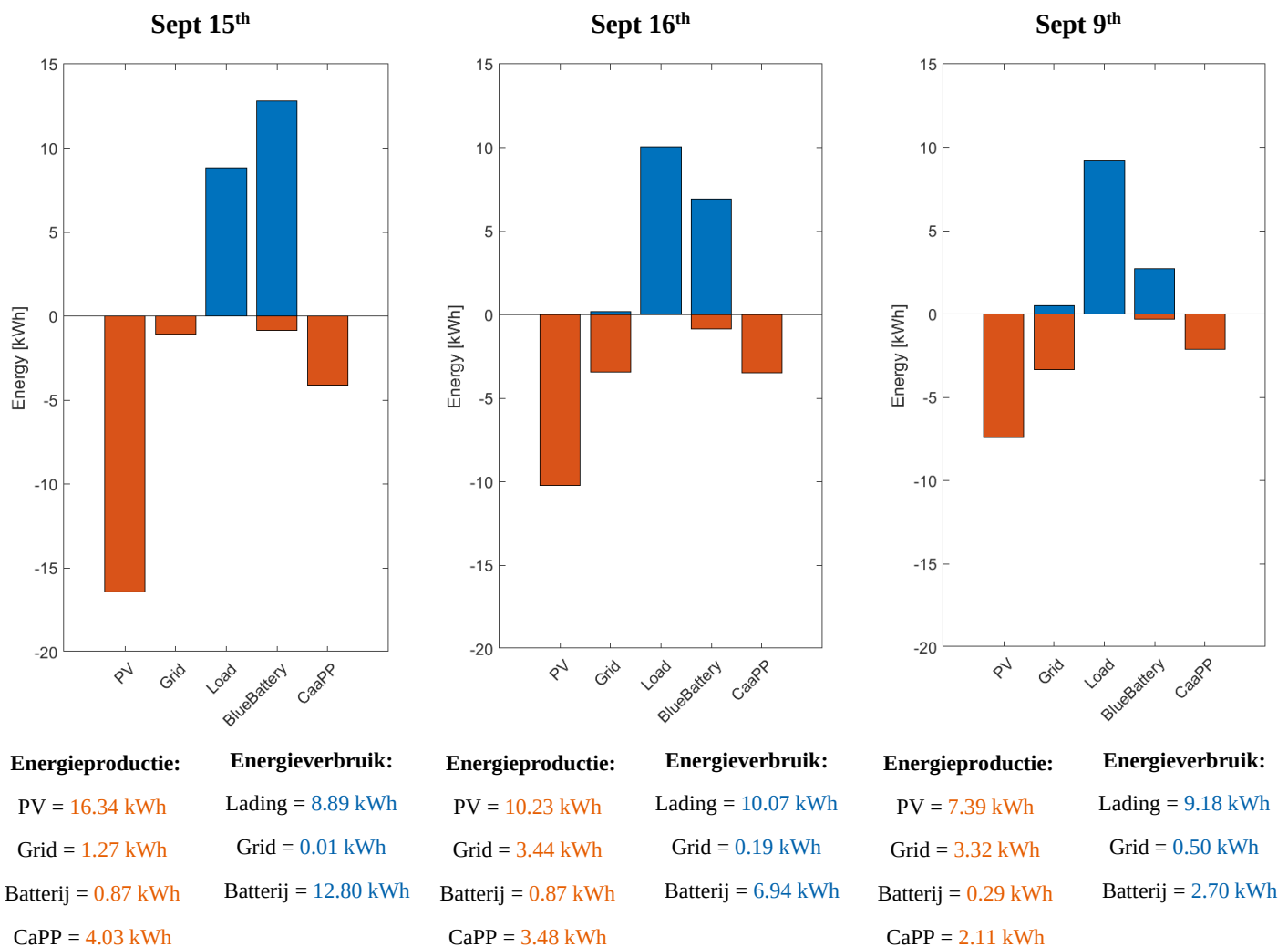


Figure 13 Load duration curves green-powered scenario from September 9th, 15th & 16th 2020

De delen d) en e) tonen de vermogensbalancerende werking van de Blue Battery. Terwijl de belasting alleen een netto energiebehoefte heeft, heeft de belasting in combinatie met alleen de PV een netto verlies, dat significant wordt in gevallen zoals de 15e september. De Blue Battery bleek met succes de netto energiebehoefte en het verlies te verminderen tot waarden dicht bij nul, waardoor het zelfverbruik in het micronetwerk werd gemaximaliseerd.

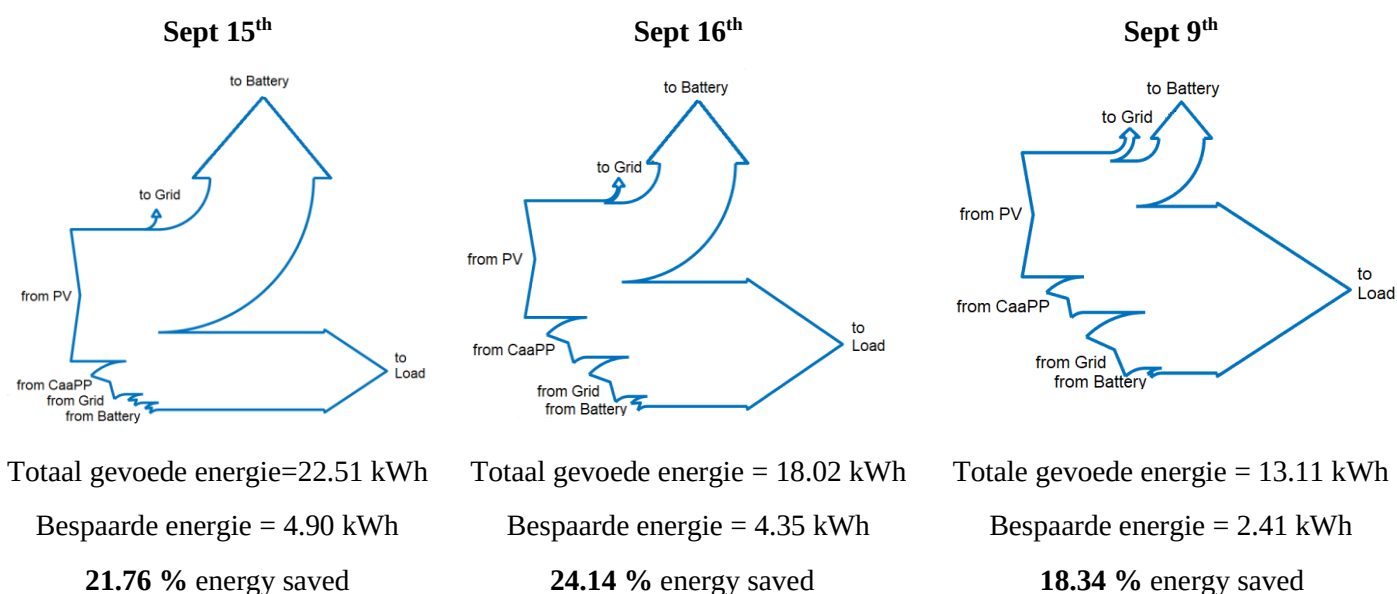
3.3.5 Energieproductie en -verbruik



Figuur 14 Energieproductie- en gebruiksprofielen green-powered scenario van 9, 15 & 16 september 2020

Hier kunnen we zien hoe energie-afhankelijke eenheden (Grid, Blue Battery en CaPP) zich verhouden tot onafhankelijke eenheden (PV en Load) - onafhankelijk omdat hun gedrag alleen gerelateerd is aan externe factoren, namelijk de weersomstandigheden en het elektriciteitsverbruik van de huishoudens. PV-energie varieert sterk van dag tot dag, en de hoeveelheid zonne-energie is evenredig met de hoeveelheid energie die in de batterij is opgeslagen. Anderzijds blijft de belasting vrijwel constant. Daarom variëren de CaPP- en de batterijbijdrage (die meestal 's avonds plaatsvindt) niet veel. De zonnigste dag heeft ook de kleinste netbijdrage.

3.3.6 Energiestromen en -besparingen



Figuur 15 Energiestromen en besparingsprofielen Green Powered scenario van 9, 15 & 16 september 2020

Tenslotte evalueren we hier hoe procentueel het systeem voldeed aan het doel van deze werkingsmodus: maximalisering van het eigen verbruik en besparing van energie van het net. Het systeem zorgt voor een behoorlijke hoeveelheid bespaarde energie in verschillende omstandigheden, waarbij zonnig weer het gunstigst is, omdat de accu dan meer energie kan opslaan en teruggeven aan het net.

Het is vermeldenswaard dat deze energiebesparing economisch voordelig is (minder energie gekocht van de elektriciteitsleverancier) en gunstig voor het milieu. Het opslagsysteem dat in dit micronetwerk wordt gebruikt, is 100% koolstofvrij en duurzaam. De energiebesparing, gevoegd bij de productie van zonne-energie, maakt dit microgridsysteem ongelooflijk groen. Dit microgrid-scenario sluit goed aan bij de in hoofdstuk 1 beschreven business case.

3.4 Peak Shaving

De testdagen die voor de tweede bedrijfsmodus in aanmerking komen, zijn 5, 10 en 25 november 2020. In dit geval zijn er enkele wijzigingen aangebracht:

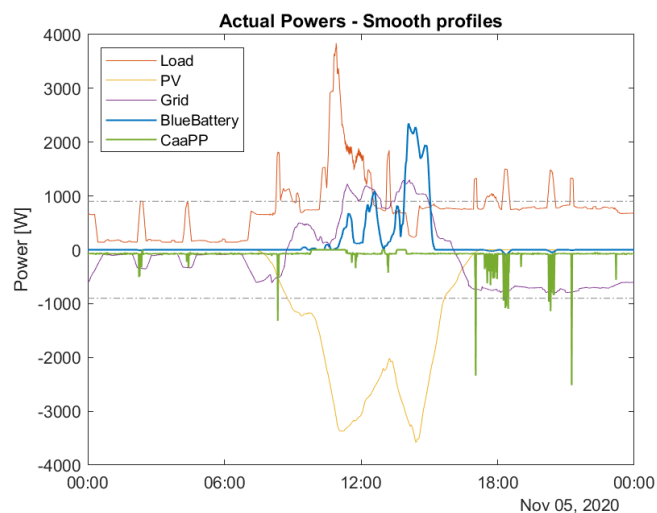
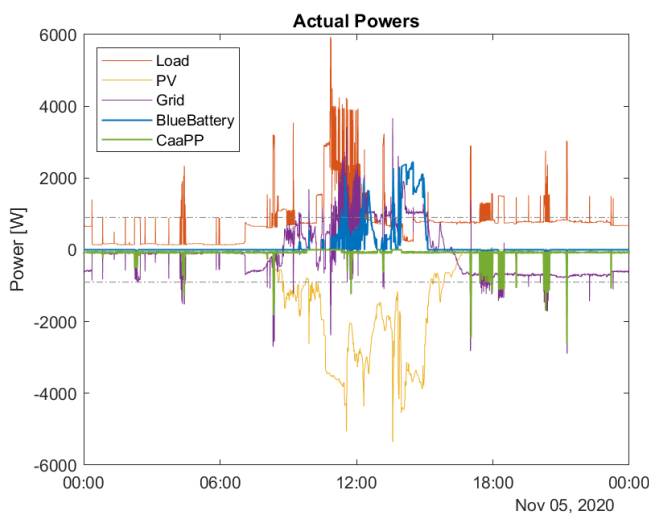
- Blue Battery gegevens worden geschaald met een factor 10 (om de deelname van alle tien beschikbare stacks te simuleren) direct in het dataplatform en niet in de daaropvolgende analyse, wat een nog nauwkeuriger resultaat oplevert.

De grenzen voor het netvermogen zijn ingesteld op ± 900 W. Dit getal is gekozen omdat het stroomverbruik van ons belastinghuis overdag meestal onder de 900 W blijft en alleen tijdens pieken boven deze waarde uitkomt. Daarom leek dit vermogensbereik ideaal om een optimale piekbesparing te verkrijgen.

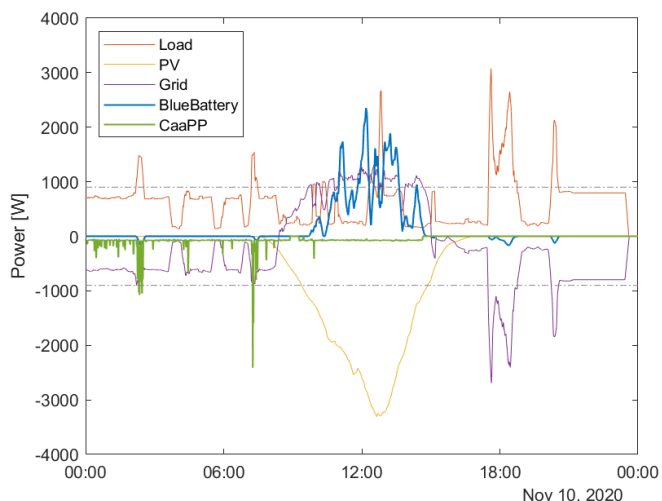
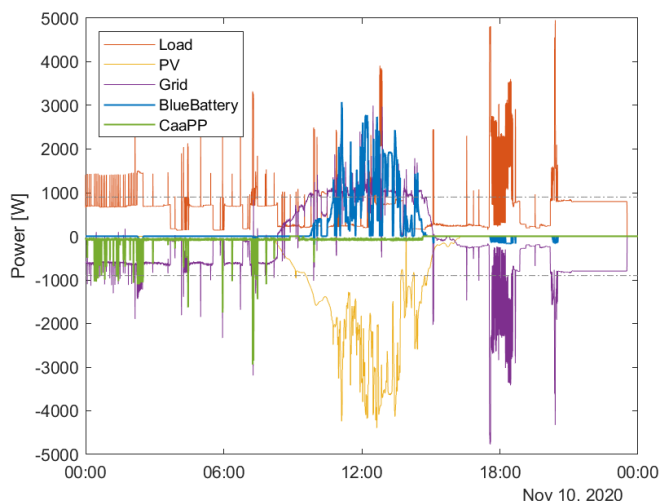
- Door een probleem in het fotovoltaïsche afleessysteem is de bron voor het zonnevermogen veranderd van het werkelijk geproduceerde vermogen in pyranometer-aflezingen, die werden gekalibreerd om dezelfde piekwaarden te hebben als in de Green Powered fase. Vanwege de geleidelijke seizoensafname van de zonne-intensiteit werd de kalibratiefactor tot 13 november ingesteld op 12 en daarna verhoogd tot 20.

3.4.1 Ruwe vermogensprofielen + beter leesbare versie

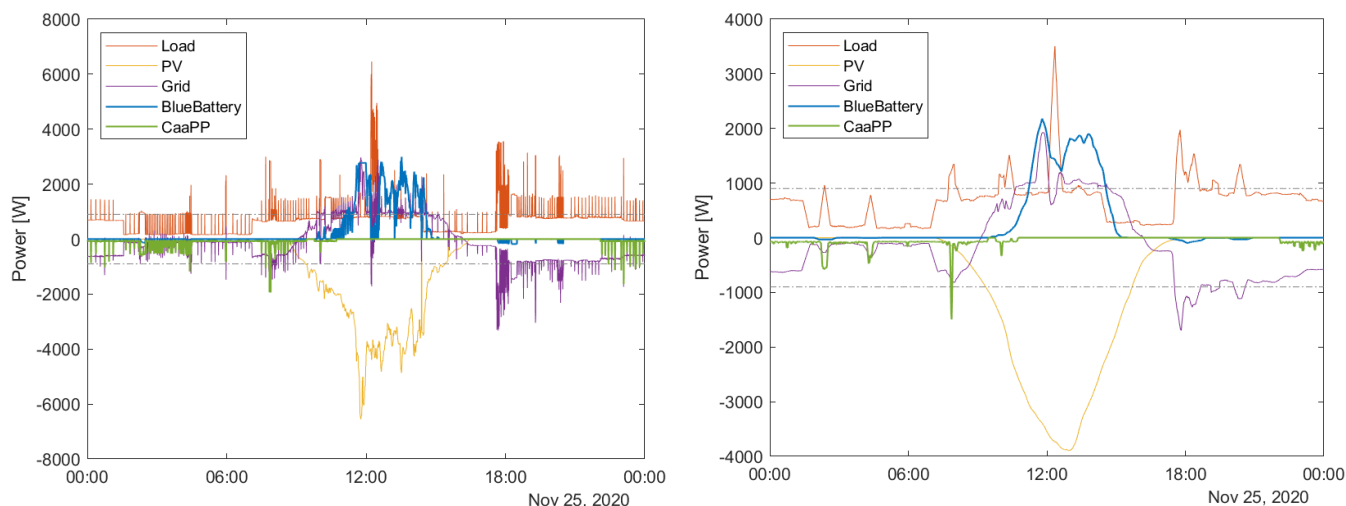
Nov
5th



Nov
10th



Nov
25th

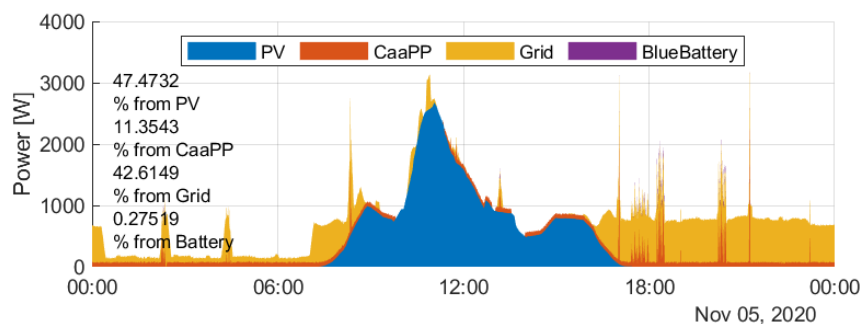


Figuur 16 Rechts ruwe gegevens en links gladde profielen Piekverschuivingscenario's van 5, 10 en 25 november 2020

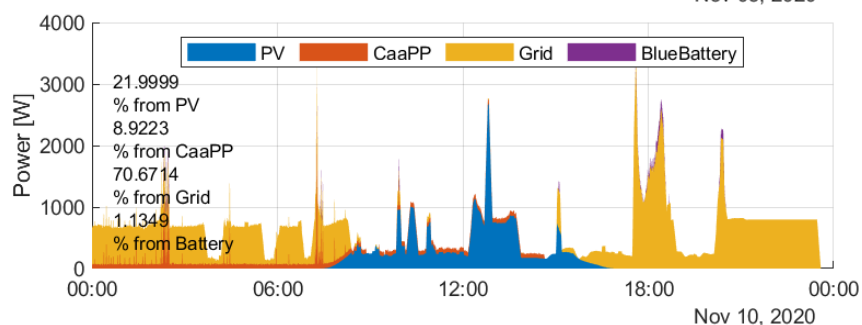
De grijze stippellijnen in deze grafieken geven het piek-besparingslimietbereik voor het netvermogen weer, dat is ingesteld op ± 900 W. Wanneer we naar de rode curve (belasting) kijken, is duidelijk te zien hoe het getal net boven de drempel tussen "normale" waarden en belastingspieken ligt. Als we ons richten op de paarse curve (net), zien we het resultaat van de piekafschakeling, waardoor de bijdrage van het net binnen de grenzen blijft.

3.4.2 Laadverdeling

Nov 5th



Nov 10th



Nov 25th

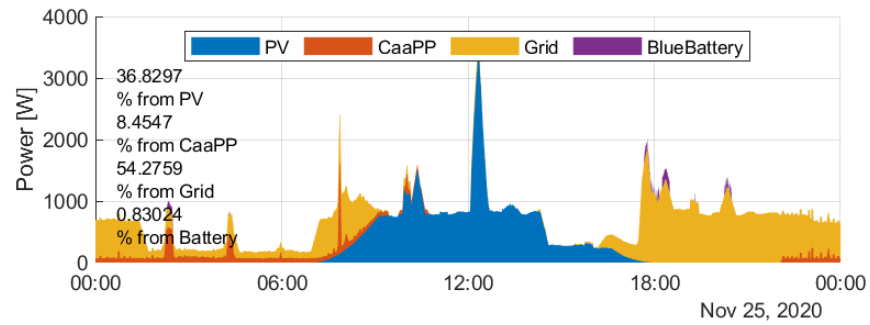
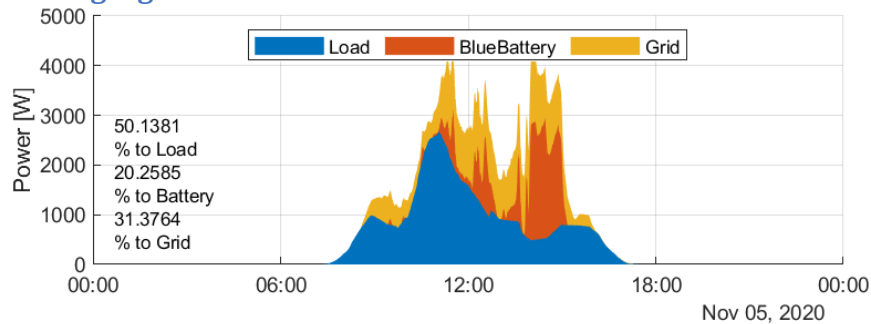


Figure 17 Load share profiles Peak shaving scenarios from November 5th, 10th & 25th 2020

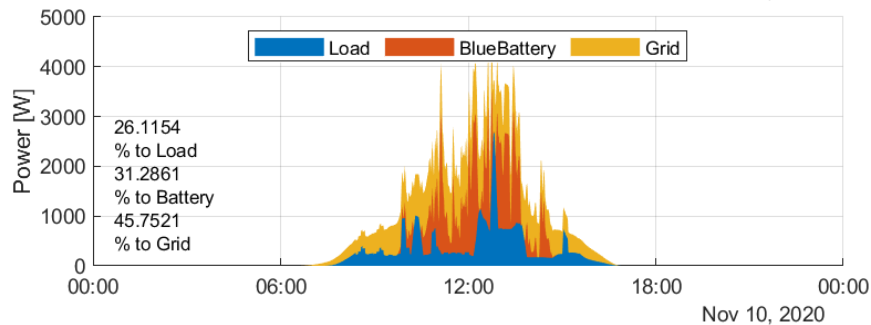
De besturingslogica van de Peak Shaving-modus zegt dat wanneer de PV-panelen niet voldoende stroom leveren, er elektriciteit van het primaire net wordt gekocht tot de grenswaarde van 900 W. In deze grafieken kunnen we zien dat dit over het algemeen wordt gerespecteerd, met enkele uitzonderingen als gevolg van beperkingen van de opslagsystemen (reactiviteit, aanlooptijden en maximaal leverbaar vermogen). Met name op 10 november worden de avondbelastingsspieken alleen gedekt door de blauwe batterij en het elektriciteitsnet omdat de auto was losgekoppeld.

3.4.3 Zonne-energie gebruik

Nov 5th



Nov 10th



Nov 25th

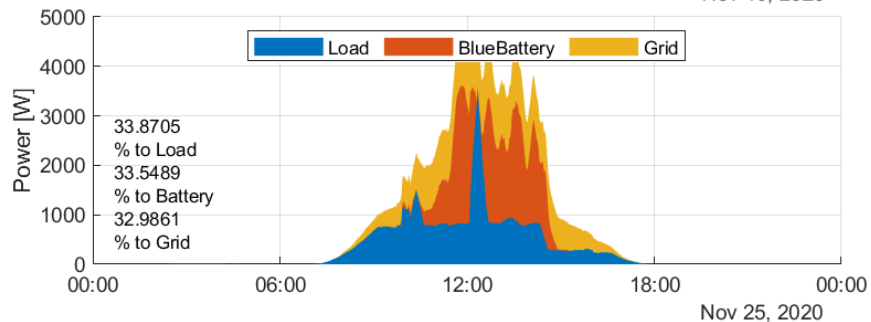
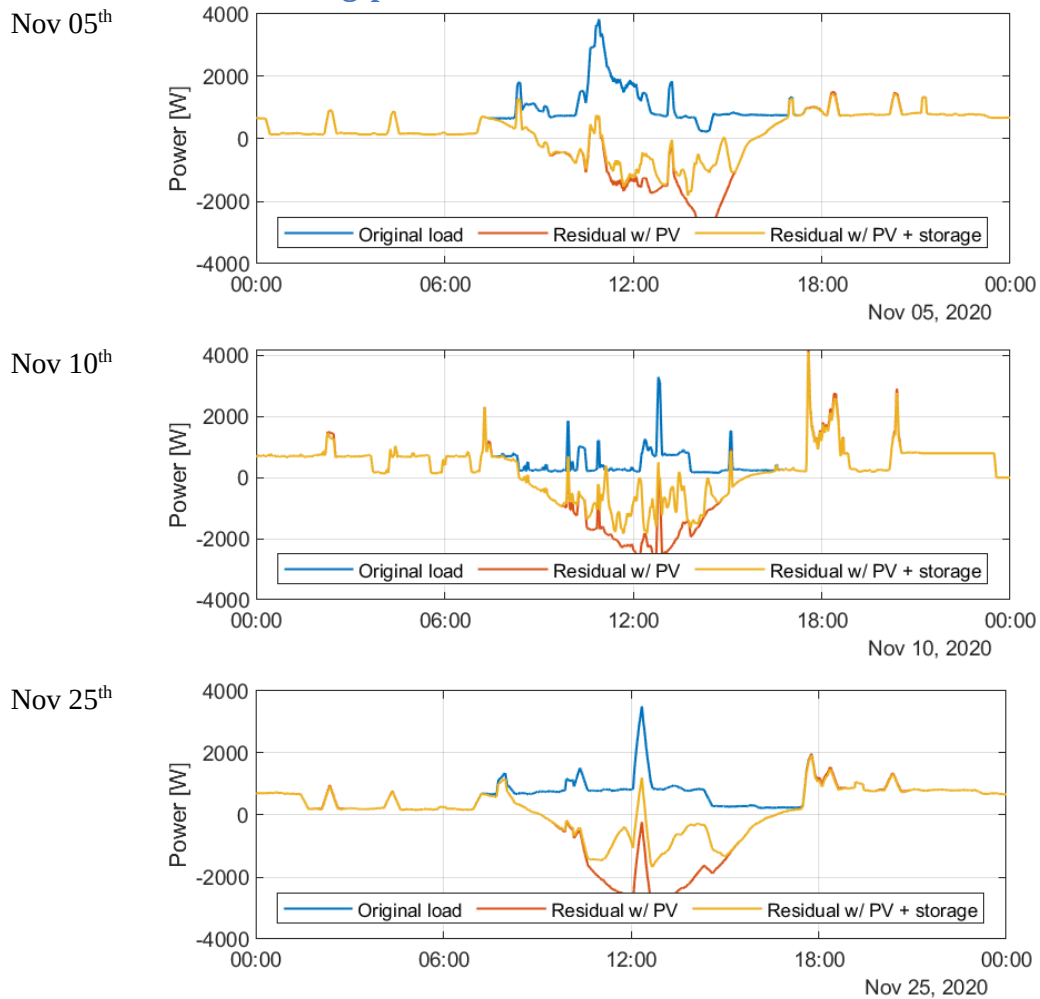


Figure 18 Solar energy usage profiles Peak shaving scenarios from November 5th, 10th & 25th 2020

De Peak Shaving-modus houdt ook in dat overtollig vermogen bij voorkeur wordt terugverkocht aan het primaire net tot de limiet van 900 W. Dit is duidelijk te zien in deze plots waar het paarse gebied,

dat het netaandeel voorstelt, de limiet op zonnepieken bereikt en de blauwe batterij het resterende vermogen opslaat.

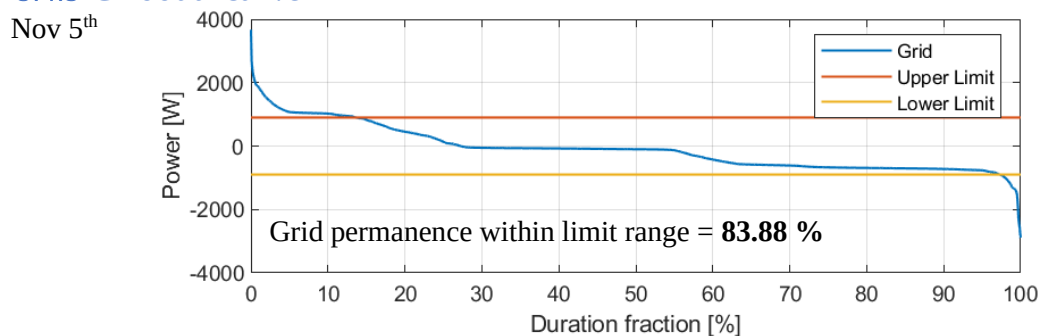
3.4.4 Laad- en restladingsprofiel

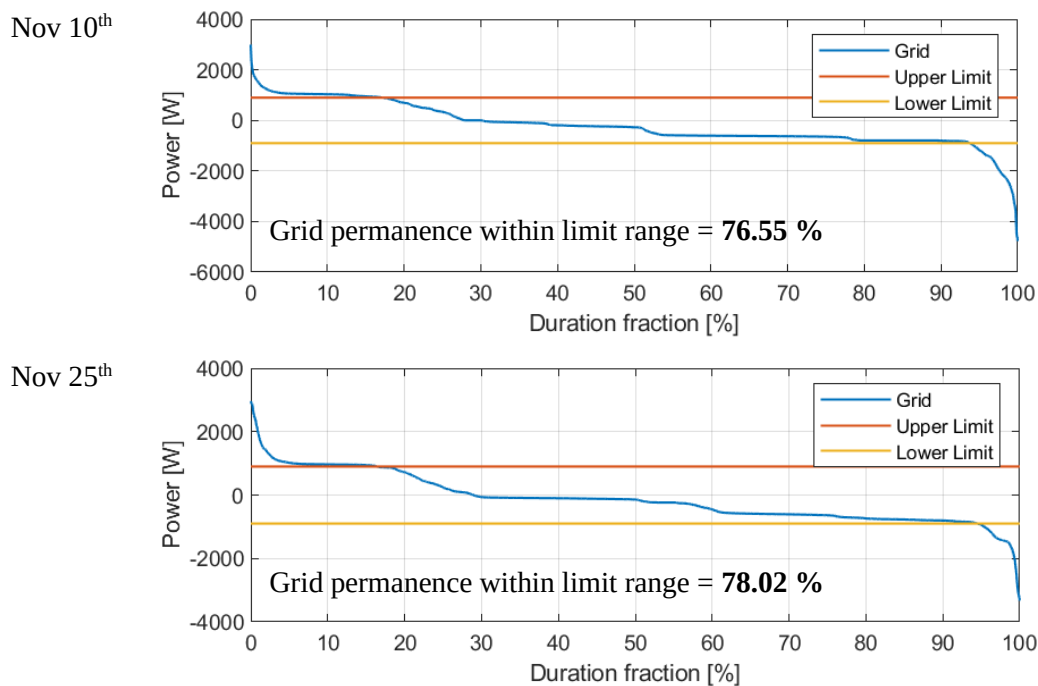


Figuur 19 Belastings- en restbelastingsprofielen voor piekbesparingsscenario's van 5, 10 en 25 november 2020

De mismatch fixing actie op deze bedrijfsmodus is minder duidelijk dan in het Green Powered geval. We kunnen echter zien hoe de gele lijn de restbelasting, dus de opname en afgifte van het net, ruwweg over het grensbereik van ± 900 W loopt.

3.4.5 Gridduurcurve

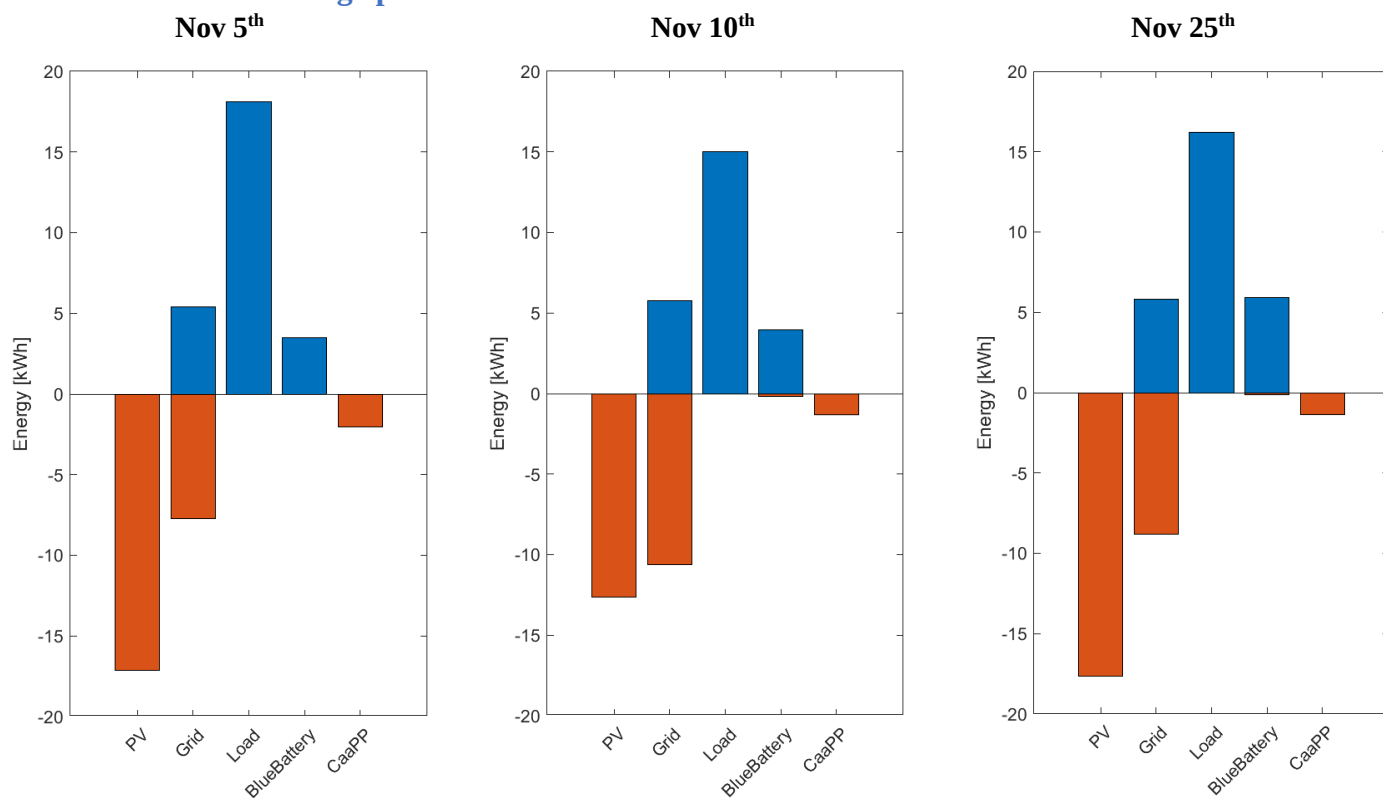




Figuur 20 Netduur curveprofielen voor piekbeveiligingsscenario's van 5, 10 & 25 november 2020

Deze grafieken tonen de efficiëntie van Peak Shaving in onze tests: de permanente stroomafname van of -levering aan het net binnen de grenzen gedurende de hele dag. Met een gemiddelde van meer dan 80% over alle testdagen kunnen we stellen dat het belangrijkste resultaat van deze bedrijfsmodus met succes werd bereikt.

3.4.6 Energieproductie en -verbruik

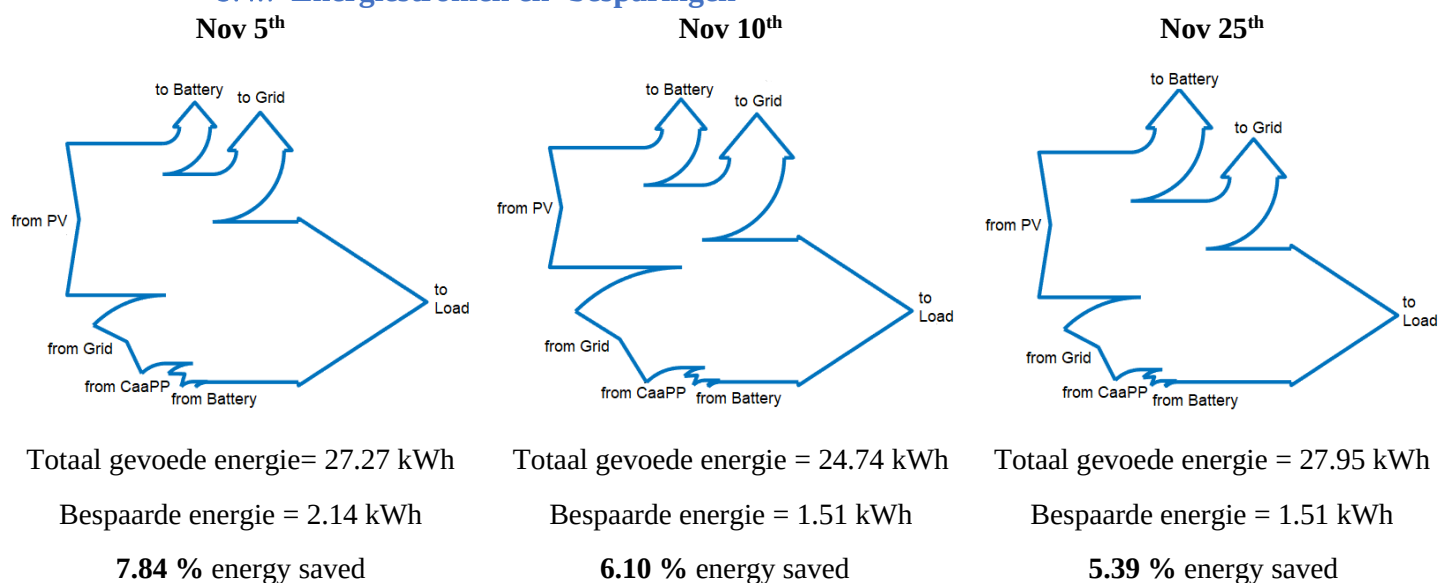


Energieproductie:	Energieverbruik:	Energieproductie:	Energieverbruik:	Energieproductie:	Energieverbruik:
PV = 17.15 kWh	Load = 18.12 kWh	PV = 12.63 kWh	Load = 15.00 kWh	PV = 17.64 kWh	Load = 16.22 kWh
Grid = 7.72 kWh	Grid = 5.38 kWh	Grid = 10.60 kWh	Grid = 5.78 kWh	Grid = 8.80 kWh	Grid = 5.82 kWh
Battery = 0.05 kWh	Battery = 3.47 kWh	Battery = 0.17 kWh	Battery = 3.95 kWh	Battery = 0.13 kWh	Battery = 5.92 kWh
CaPP = 2.06 kWh		CaPP = 1.34 kWh		CaPP = 1.37 kWh	

Figuur 21 Energieproductie- en -gebruiksprofielen voor piekspaarscenario's van 5, 10 & 25 november 2020

De beperkingen van het vermogen op het net worden weerspiegeld in een beperkte energiestroom van het net. De aan het net verkochte energie werd met succes beperkt tussen 5,5-6 kWh. De van het net gekochte energie is daarentegen hoger omdat de limieten moesten worden overschreden wanneer de auto of de batterij niet alle benodigde energie kon leveren.

3.4.7 Energiestromen en -besparingen



Figuur 22 Energiestromen en energiebesparingsprofielen voor piekbesparingsscenario's van 5, 10 & 25 november 2020

Energiebesparing is niet het primaire doel van deze tweede bedrijfsmodus: gemiddeld wordt 1,8 kWh of 12 % van de totale energie bespaard dankzij groene opslagsystemen. Een verkleining van het grensbereik van het net zou dit effect uiteraard vergroten.

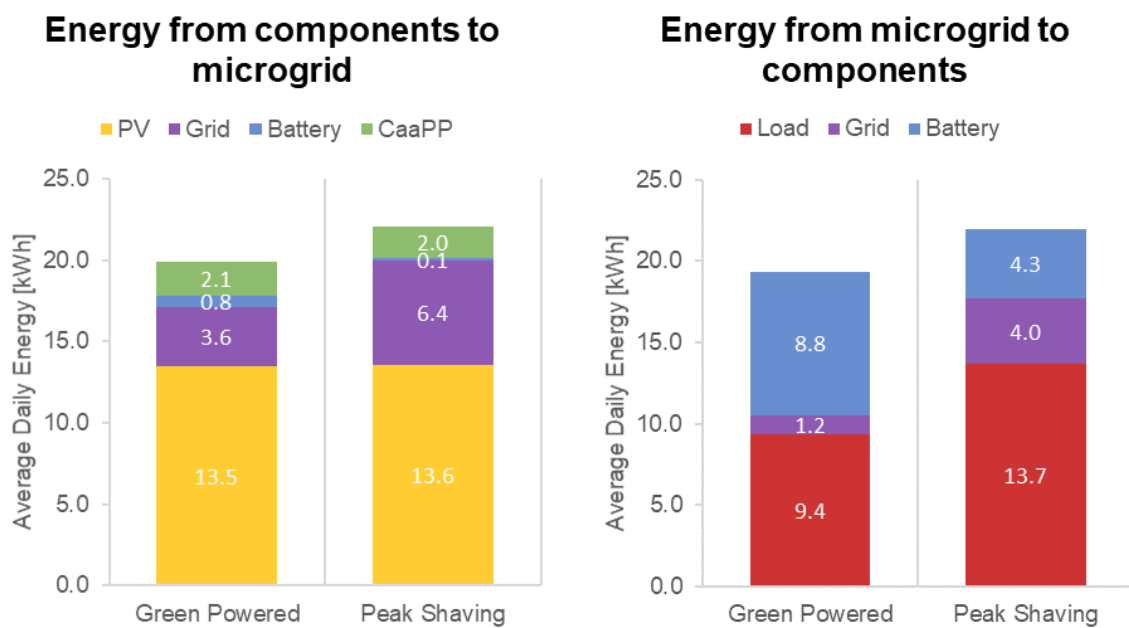
3.5 Conclusies

De twee bedrijfsmodi hebben verschillende doelstellingen en logica: de ene maximaliseert het verbruik van groene energie, en minimaliseert dus de inname van het net, terwijl de andere het gebruik van de netaansluiting binnen bepaalde grenzen houdt ($-P_{lim}, P_{lim}$), door gebruik te maken van de blauwe batterij en de CaPP om verbruiks- en productiepieken te dekken. Bij deze gegevens kunnen enkele relevante opmerkingen worden gemaakt.

In de Green Powered modus zijn de resultaten in termen van de bijdrage van groene energie in het micronetwerk verrassend, vooral op de zonnigste dagen, waar zonne-energie een groot deel van de belasting kan dekken en de batterij volledig kan opladen, met een piek van 88% groene energie en 24% bespaarde energie. Het is duidelijk dat de doeltreffendheid van deze methode afhangt van de

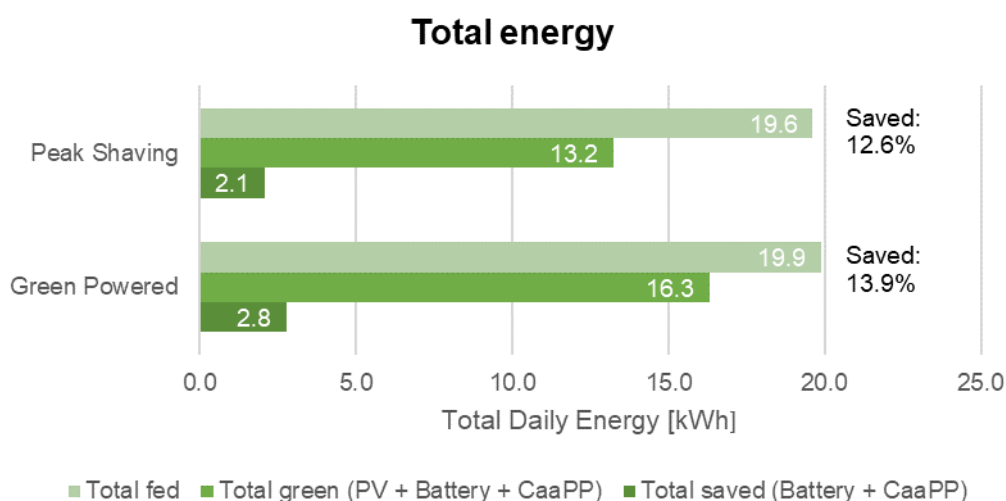
hoeveelheid zonne-energie (dus van het geïnstalleerde fotovoltaïsche vermogen). Tijdens de donkere uren kan de Blauwe Batterij slechts een klein deel van het totale gevraagde vermogen leveren, dat voor een belangrijk deel door de auto wordt gedekt. Dit suggereert dat de Blauwe Batterij moet worden opgeschaald om een meer significante bijdrage te leveren aan dit vermogenssysteem.

In de Peak Shaving-modus werd het primaire doel bereikt, dankzij de juiste keuze van de netgrenzen. Opnieuw werkte het systeem het best met een immense bijdrage van zonne-energie om de Blauwe Batterij op te laden, die een kleine bijdrage leverde. In deze scenario's hadden beide opslagsystemen te lijden onder de langere pauzes, waarin het micronetwerk binnen de grenzen alleen netstroom gebruikte. Zowel de CaPP als de Blue Battery vertoonden een aanzienlijke ontlading wanneer ze niet werkten, waardoor hun algemene prestaties in het gedrang kwamen.



Figuur 23 Energie van <-> naar componenten en microgrid

Figuur 35 geeft een overzicht van de energiestromen in beide scenario's (waarden berekend op basis van de volledige gegevensverzameling in het aanhangsel). Met name de totale en bespaarde energieën zijn:



Figuur 24 Vergelijking tussen Green Powered- en Peak Shaving cenario's op het TGV-microgrid

Een vergelijking tussen de twee modi levert de volgende overwegingen op:

- **Invloed van het weer en het seizoen** - Zoals vermeld in de technologische kwesties, had de input van zonne-energie verschillende bronnen en schalingsfactoren, zodat deze niet vergelijkbaar is. Anderzijds is de dagelijkse energiebehoefte van de belasting (in rood) toegenomen van september tot november. We kunnen veilig aannemen dat dit effect te wijten is aan het toegenomen gebruik van verwarming en verlichting omdat de buitentemperatuur en de lichturen afnemen.
- **Bijdrage aan het net** - De hoeveelheid energie die wordt gekocht van en verkocht aan het net is sterk afhankelijk van de bedrijfsmodus. In de modus Peak Shaving werd het dubbele van de energie aan het net onttrokken en bijna vier keer teruggeleverd. Als het grensbereik wordt verkleind (hier ingesteld op ± 900 W), zal dit verschil naar verwachting ook afnemen.
- **Blue Battery opgeslagen energie** - De beschikbare energie voor de batterij om op te laden was minder tijdens Peak Shaving dan Green Powered. Bij een overschot aan energie was de voorkeursontvanger het net in het eerste scenario (tot aan de limiet), gevolgd door de Blauwe Batterij in het tweede scenario.
- **Bespaarde energie** - De capaciteit van opslagsystemen (Blue Battery en CaPP) om stroom te leveren aan het microgrid bleek niet afhankelijk te zijn van de besturingslogica, dus van het verzoek. Deze in bedrijf zijnde technologieën werden beperkt door hun capaciteit, die lager bleek te zijn dan nodig. Als gevolg daarvan zijn de totale en relatieve bespaarde energieën in de twee scenario's vergelijkbaar, met slechts een kleine afwijking voor Green Powered.

Hoofdstuk 4 Validatie en uitwisseling van opgedane kennis en ervaringen (WP4)

4.1 Introduction

Het belangrijkste kenmerk is de controle, gevestigd in de MGCC (MicroGrid Central Controller), de besluitvormende eenheid die de energiedistributie en de activering/deactivering van de componenten beheert. Zoals vermeld in de vorige hoofdstukken, is de MGCC in het microgrid van de Green Village via één PCC (Point of Common Connection) verbonden met het hoofdnnet en met de andere opwekkings-, opslag- en verbruikseenheden, namelijk±

- PV-panelen
- Last
- Blue Battery
- Car as a PowerPlant (CaPP)

De informatie tussen de MGCC en elke component bestaat uit digitale signalen die informatie uitwisselen over vermogen, toestand van lading (SOC) of beschikbaarheid. In het bijzonder:

Tabel 6 Informatie-uitwisseling tussen MGCC en afzonderlijke eenheden

Unit	naar MGCC	van MGCC
PV panelen	zendt geproduceerde stroom	-
Last	zendt verbruikte stroom	-
Blue Battery	zendt SOC	ontvangt benodigde of gevoede stroom
CaPP	zendt SOC and beschikbaarheid	ontvangt benodigde stroom
PCC (grid)	-	ontvangt stroom nodig of wordt gevoed

Deze digitale informatie wordt met een hoge frequentie verzonden en ontvangen. Op elke tijdstap voert de MGCC een reeks bewerkingen en beslissingen uit om de energie in het netwerk optimaal te verdelen. Het type logica hangt af van welke specifieke parameter we willen dat het systeem maximaliseert of minimaliseert (kosten, energieverbruik van het net, emissies).

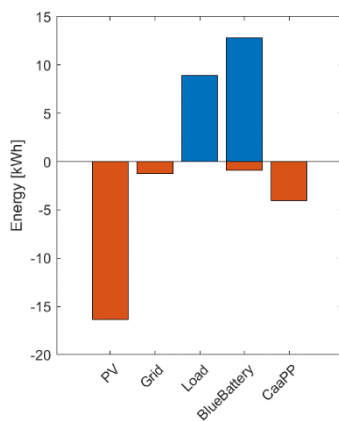
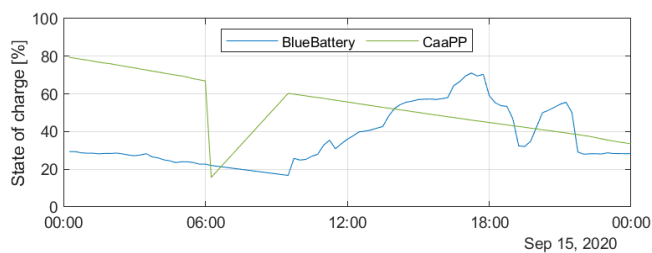
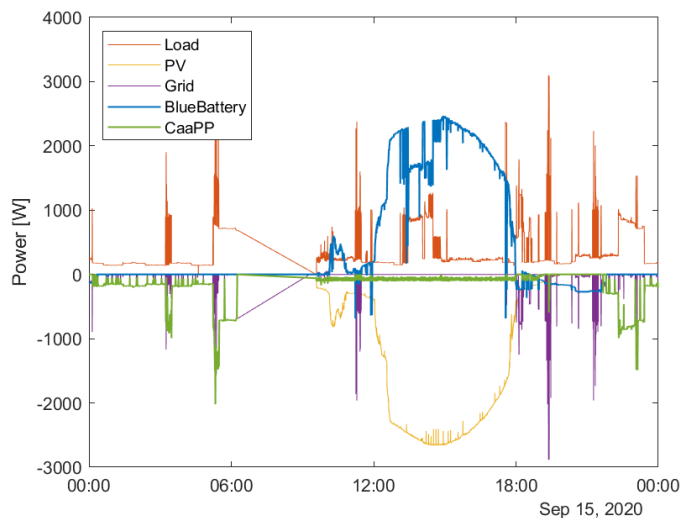
Zoals uitgelegd in hoofdstuk 2 kan het micronetwerk in twee modi werken: Green Powered en Peak Shaving. In de Green Powered modus is het doel om het groene energieverbruik te maximaliseren en de inname van energie van het net te minimaliseren. De Blue Battery wordt gebruikt om de zelfconsumptie van zonne-energie te optimaliseren, en de CaPP wordt gebruikt om de rest van de stroom te leveren. In de Peak Shaving-modus is het doel het gebruik van de netaansluiting binnen bepaalde grenzen ($-P_{lim}, P_{lim}$) te houden, waarbij de Blue Battery en de CaPP worden gebruikt om de verbruiks- of opwekkingspieken te dekken.

4,2 Modelvalidatie

Een goede methode om de geldigheid en nauwkeurigheid van de simulatie vast te stellen is het model uit te voeren met echte belasting en PV-gegevens van één specifieke dag als invoer en de resultaten te vergelijken met reële profielen. Voor elke besturingslogica is één dag gekozen en vergeleken.

Green Powered: September 15th

Real data



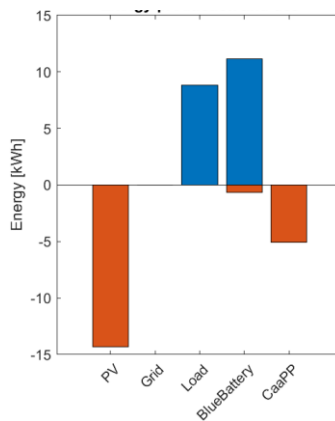
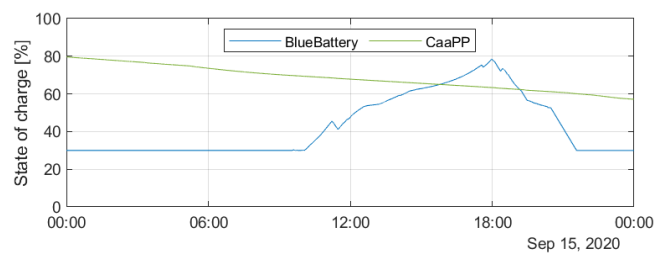
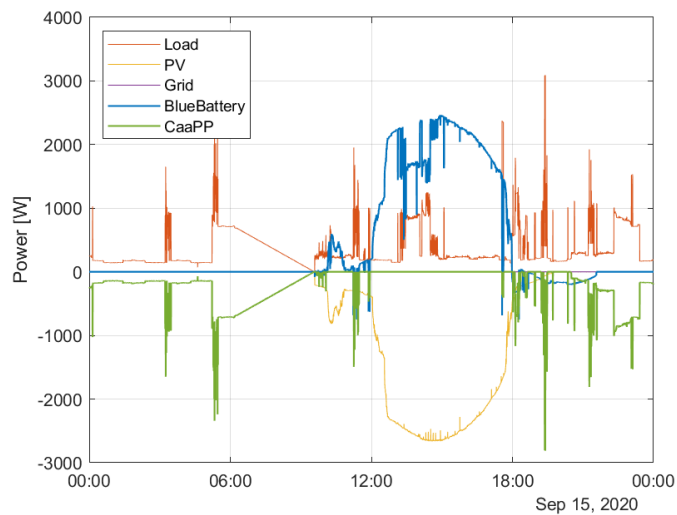
vanuit PV = 16.34 kWh
 vanuit Grid = 1.27 kWh
 vanuit Batterij = 0.87 kWh
 vanuit CaPP = 4.03 kWh
 naar Last = 8.89 kWh
 naar Grid = 0.01 kWh
 naar Batterij = 12.80 kWh

Totaal gevoed = 22.51 kWh

Totaal bespaard = 4.90 kWh

% bespaard = 21.76%

Simulation data



vanuit PV = 14.30 kWh
 vanuit Grid = 0 kWh
 vanuit Batterij = 0.64 kWh
 vanuit CaPP = 5.08 kWh
 naar Load = 8.84 kWh
 naar Grid = 0 kWh
 naar Batterij = 11.17 kWh

Totaal gevoed = 20.01 kWh

Totaal bespaard = 5.71 kWh

% bespaard = 28.54%

Figuur 25 De linker kolom toont de gesimuleerde profielen en de rechter kolom de experimentele profielen voor het Green-Powered scenario

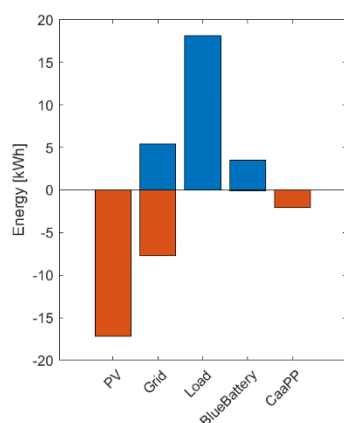
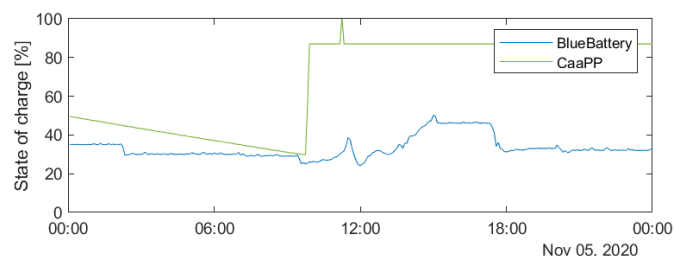
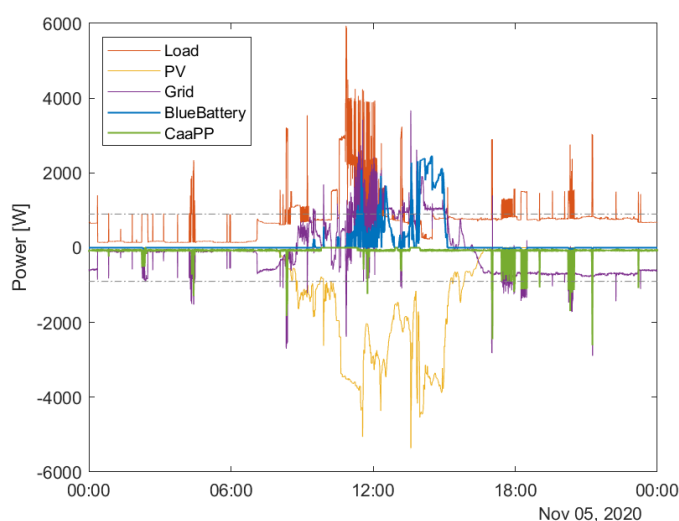
Het belangrijkste verschil tussen de energieprofielen zit in het gedrag van de waterstofauto: in het echte geval is de auto niet altijd in staat de belastingspieken te dekken, ook al heeft hij voldoende lading, zodat het net het moet overnemen. Het model kan dit willekeurige gedrag niet reproduceren, waarschijnlijk door de korte duur van de belastingspieken.

De ontwikkeling van de ladingstoestand van de batterij lijkt accuraat, met uitzondering van de kleine zelfontlading die optreedt wanneer de batterij is uitgeschakeld, die niet in de simulatie is gemodelleerd. Ondanks de overschatting van de CaPP-bijdrage is de daling van de ladingstoestand kleiner dan in werkelijkheid, wat betekent dat sommige verliezen in de SoC-formule over het hoofd zijn gezien.

In het algemeen kunnen we afleiden dat het echte systeem vaker dan gesimuleerd het net gebruikt om onregelmatige redenen - met andere woorden, het model simuleert een hogere bijdrage van Blue Battery en CaPP, wat resulteert in een hogere relatieve energiebesparing.

Peak Shaving: November 5th

Werkelijke data



vanuit PV = 17.15 kWh
 vanuit Grid = 7.72 kWh
 vanuit Battery = 0.05 kWh
 vanuit CaPP = 2.06 kWh
 naar Load = 18.12 kWh
 naar Grid = 5.38 kWh
 naar Battery = 3.47 kWh

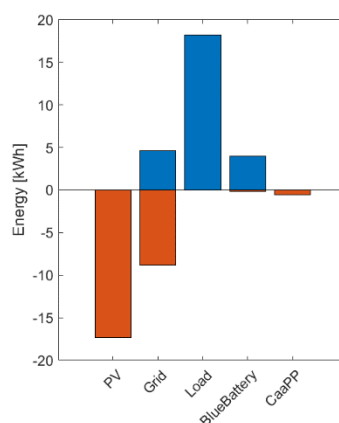
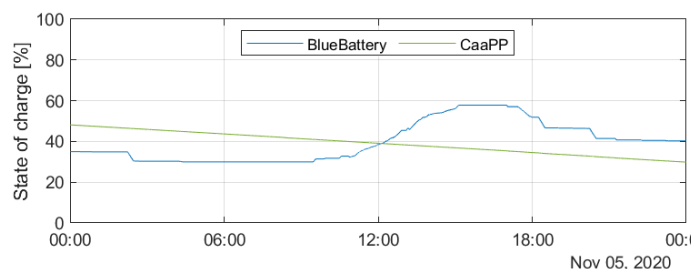
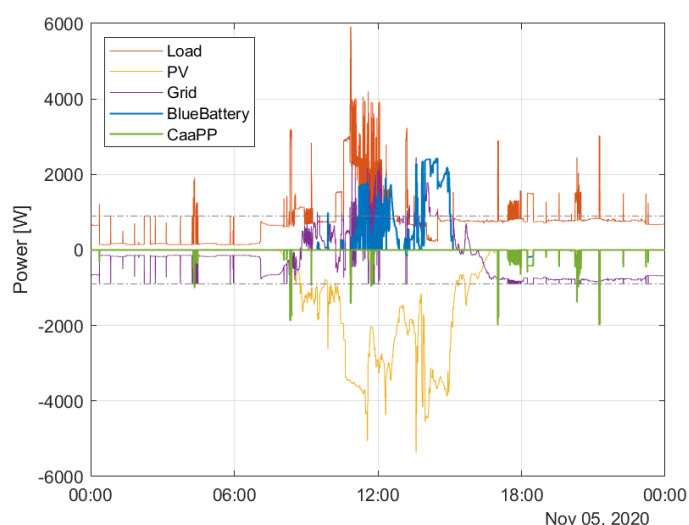
Totaal gevoed = 27.27 kWh

Totaal bespaard = 2.14 kWh

% bespaard = 7.84%

Grid in range = 83.88%

Simulatie data



vanuit PV = 17.31 kWh
 vanuit Grid = 8.81 kWh
 vanuit Battery = 0.13 kWh
 vanuit CaPP = 0.56 kWh
 naar Load = 18.21 kWh
 naar Grid = 4.62 kWh
 naar Battery = 3.98 kWh

Totaal gevoed = 26.81 kWh

Totaal bespaard = 0.69 kWh

% bespaard = 2.58%

Grid in range = 100%

Hier worden de waterstofauto's onderschat, waarschijnlijk als gevolg van overschrijdingen van het vermogen en verkeerde pieken in het reële systeem. De simulatie kan ook niet de weinige momenten reproduceren waarop het netvermogen buiten het grensbereik valt, wat het gevolg is van de onvolmaakte reactiviteit van het gehele systeem. Daarom wordt de permanentie van het netvermogen binnen het bereik ten onrechte gesimuleerd als 100%, terwijl dit in werkelijkheid ongeveer 84% is.

Wat de laadtoestand betreft, werd het bijvullen van waterstof door CaPP niet gesimuleerd. In het model is echter een automatisch bijvulmechanisme ingebouwd dat in werking kan worden gesteld wanneer het waterstofpeil onder een bepaald volume daalt. In een reël geval gebeurt het bijvullen niet altijd bij een vast brandstofpeil, hoewel een goede benadering kan worden gemaakt.

De energiestromen lijken *grosso modo* correct, maar de onderschatting van de waterstofauto leidt tot een lagere gesimuleerde bijdrage van hernieuwbare energiebronnen dan in het reële geval.

4.3 Samenvatting vergelijking simulatie en experimentele tests

Er is een vergelijking gemaakt tussen simulaties en experimentele tests. De besturingslogica is zeer vergelijkbaar met de code die voor het echte systeem is geschreven. De simulatie garandeert een correcte weergave van hoe, gegeven een PV- en belastingsprofiel, de Blauwe Batterij en de CaPP reageren, zich gedragen en interageren.

Naast de vermogensprofielen ziet ook het laadstatusprofiel van de batterij er zeer accuraat uit, dankzij de studie van de elektrochemische relaties van de Blue Battery. De energieberekeningen, die ook afhankelijk zijn van de tijdstap, lijken niet te worden beïnvloed door de verschillende gegevensfrequenties.

Er zijn echter enkele cruciale verschillen. Het brandstofcelvoertuig is waarschijnlijk te vereenvoudigd, aangezien het in het Green Powered-scenario overschat en in Peak Shaving onderschat blijkt te zijn. Bovendien is de simulatie van de laadtoestand veel optimistischer dan de werkelijkheid.

Een aanbeveling voor de toekomst is om een betere simulatie voor de auto te bestuderen, die het mogelijk maakt het werkelijke brandstofverbruik en gedrag in het micronetwerk te modelleren. Wat de Blue Battery betreft, kan de simulatie daarentegen nuttig zijn om het ideale gedrag te simuleren en de "gezondheidstoestand" en de prestaties van de stapels in te schatten.

Wat de gecombineerde opslag betreft, was er niet veel verschil in de geproduceerde energie tussen de twee scenario's. Dit wijst erop dat de capaciteitslimiet van deze technologieën onder de behoefte van het systeem ligt. Dit geldt vooral voor de Blue Battery, die nooit een significante hoeveelheid vermogen kon leveren. Bij dit vermogen moest de auto om de 2-3 dagen worden bijgevuld, wat vaker is dan verwacht.

4.4 Disseminatie

Versillende evenementen werden de afgelopen jaren bijgewoond door enkele partners (voornamelijk 2019). Tabel 14 geeft een overzicht van de evenementen waar het project werd gepresenteerd aan de wetenschappelijke gemeenschap, energie-experts, belanghebbenden, studenten en het grote publiek.

Bovendien werd een congres paper publicatie (Ghotge R, Álvarez J.S, et al., 2019, A Global Analysis on Microgrids through the PESTEL Framework") geaccepteerd voor mondelinge presentatie in de 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE 2020) in Cochin, Kerala, India afgelopen januari 2020. Deze zijn publiekelijk toegankelijk via IEEE Explore en via de TU Delft repository (DOI: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070725).

Daarnaast zijn er meerdere master theses en stageverslagen over het onderzoek geschreven, wiens werk ook deels publiekelijk toegankelijk is (bijv. [C. Chowdhary Kota](#)).

Disseminatie evenement	Presentator	Datum
De Delft Software Dagen - Editie 2019	Juan Sebastián Álvarez (AB - Project Manager)	12 November 2019
Alliander event ARNHEM	Rishabh Ghotge (TU Delft Onderzoeker)	2 December 2019
Power web institute TU Delft Lunchlezing	Juan Sebastián Álvarez (AB - Project Manager)	12 December 2019
PESGRE 2020	Rishabh Ghotge (TU Delft Onderzoeker)	3 January 2020

Tabel 7 Samenvatting van disseminatie evenementen 2019-2020

Hoofdstuk 5 Referenties

- [1] European Technology Platform SmartGrids, "Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future," 2006.
- [2] EU Project (Contract ENK-CT-2002-00610), "Microgrids: Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids," 2004.
- [3] C. M. e. al., "Microgrid Evolution Roadmap," in *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, Vienna, 2015.
- [4] D. Hansen, "IEEE 519 misapplications— Point of common coupling issues," in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburg, PA, 2008.
- [5] K. C. a. O. C. R. Kingsbury, "Energy storage by reversible electrodialysis: The concentration battery," *Journal of Membrane Science*, 2015.
- [6] V. Oldenbroek, V. Hamoen, S. Alva, C. B. Robledo, L. A. Verhoef and A. J. van Wijk, "Fuel cell electric vehicle-to-grid. Experimental feasibility and operational performance as balancing power plant. Fuel Cells, 18(5)," Delft University of Technology, Delft, 2018.
- [7] DNV GL, "Safety, operation and performance of gridconnected energy storage systems," DNV GL AS, 2017.
- [8] J. & C. G. Eyer, "Energy storage for the electricity grid: Benefits and market potential assessment guide," pp. 1-232. , 2011).
- [9] D. A. Vermaas, Energy generation from mixing salt water and fresh water: smart flow strategies for reverse electrodialysis, 2014.
- [10] Toyota, "Toyota Mirai Warranty and Maintenance Guide," Toyota, [Online]. Available: <https://www.toyota.com/t3Portal/document/omms-s/T-MMS-19Mirai/pdf/T-MMS-19Mirai.pdf..> [Accessed 17 September 2019].
- [11] Honda, "2021 Honda Clarity Plug-In Hybrid – The Versatile Hybrid," Honda Automobile, [Online]. Available: <https://automobiles.honda.com:443/clarity-plug-in-hybrid>. [Accessed 12 September 2020].
- [12] C. B. v. d. Statistiek, "Verkeersprestaties personenauto's; kilometers, brandstofsoort, grondgebied,," [Online]. Available: <https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/80428ned> (. [Accessed 15 September 2020].
- [13] A. P. M. W. R. Wittstock, "Challenges in Automotive Fuel Cells Recycling," *Recycling*, pp. 343-364, 2016.
- [14] C. H. a. C. H. A. Sternberg, "Greenhouse Gas Emissions for Battery Electric and Fuel Cell Electric Vehicles with Ranges over 300 km,," Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, [Online]. Available: <https://www.ise.fr>. [Accessed 15 Septembre 2020].
- [15] F. I. f. S. E. Systems, "Greenhouse Gas Emissions for Battery Electric and Fuel Cell Electric Vehicles with Ranges over 300 km,," Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, [Online]. Available: [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/document>.
- [16] European Commission, "Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)," 2019. [Online]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP.
- [17] V. O. e. al, "Fuel Cell Electric Vehicle-to-Grid: Experimental Feasibility and Operational Performance as Balancing Power Plant," in *6th European PEFC & Electrolyzer Forum*, Lucerne, Switzerland, 2017.
- [18] I. H. B. e. al., "Pure and Pseudo-pure Fluids Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014.

