

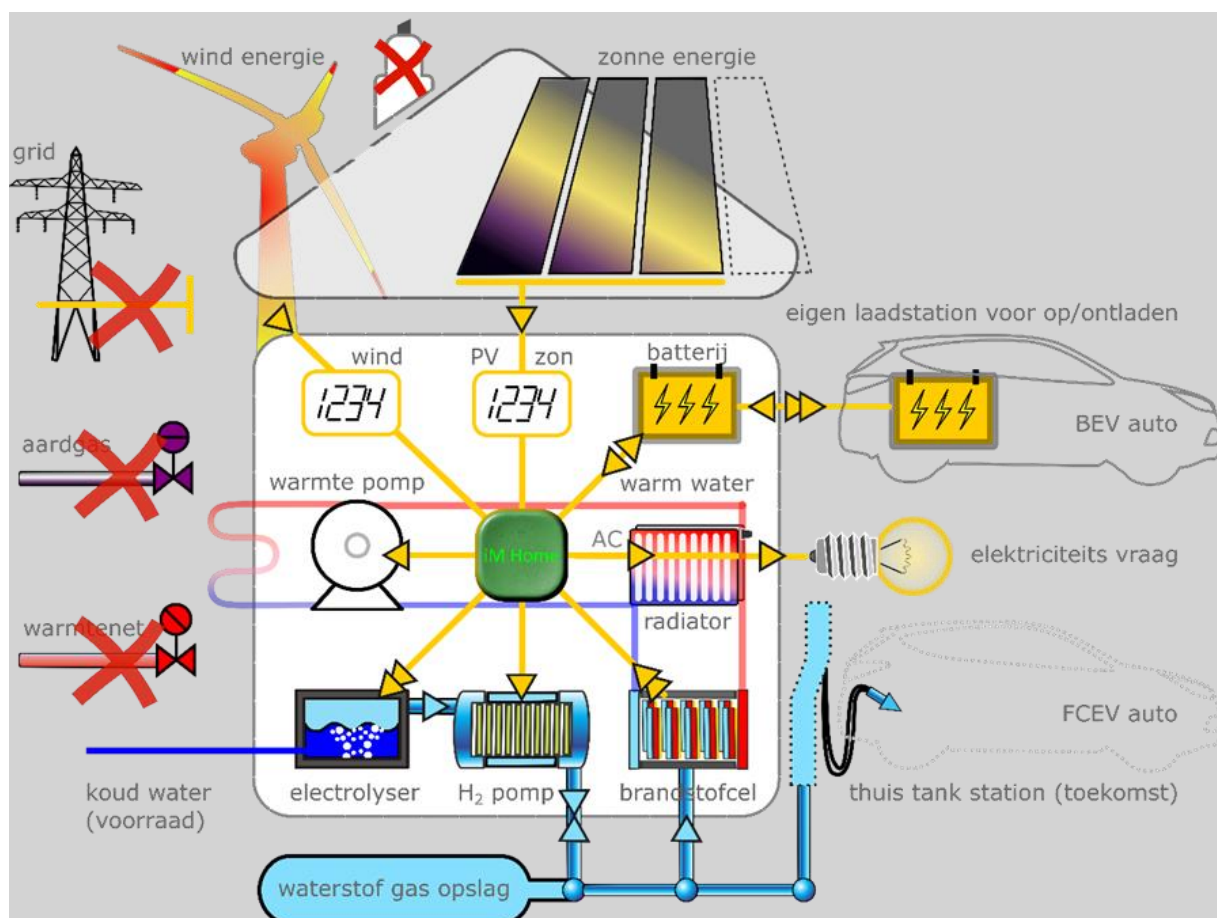


ISPT

Institute for Sustainable
Process Technology

Archypel

Haalbaarheidsstudie naar kleinschalige energieopslag
van duurzame elektriciteit met waterstof



Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1. Projectomschrijving	8
1.1 Achtergrond	8
1.2 Integratie technologieën en toepassingen	10
1.3 Doel	11
2. Modelling	12
2.1 Varianten	12
2.2 Gebruikspatronen en energievraag	12
2.3 Uitgangspunten, aannames, limitering	13
3. Energieopslagsysteem	15
3.1 Base case: energieopslagsysteem met ruimteverwarming	23
3.2 Base Case ⁽⁻⁾ : Energieopslagsysteem zonder ruimteverwarming en zonder mobiliteit	27
3.3 Base case ⁽⁺⁾ : Energieopslagsysteem met ruimteverwarming en mobiliteit	29
4. Veiligheid	32
4.1 Algemene veiligheid	32
4.2 Veiligheid waterstof in de gebouwde omgeving	34
4.3 Installatie specifieke veiligheid	34
5. Marktvraag	36
6. Business cases	39
7. Systeemwaarde	41
8. Conclusies en vervolgstappen	43
8.1 Conclusies	43
8.2 Mogelijke vervolgprojecten en aanbevelingen	44
8.3 Slotwoord	45
Bijlagen	46
Bijlage 1: Technische configuratie	46
Bijlage 2: Value Curving analyse Value curving data 'As-is' (huidige situatie)	49
Bijlage 3: HOMER	51

Samenvatting

Project

Het Institute for Sustainable Process Technology (ISPT) heeft samen met Alliander, HyET, MTSa, Nedstack, Hydron Energy, PDC en de Hogeschool Arnhem-Nijmegen de haalbaarheid onderzocht van kleinschalige energieopslag met waterstof. Het opslagsysteem is gedimensioneerd voor een autarkisch huis dat jaarrond zelfvoorzienend is qua energieopwekking. Daarbij is uitgegaan van de energievraag van een twee-onder-een-kapwoning in het midden van het land.

Welke kleinschalige energieopslag nodig en technisch mogelijk is en wat de kosten zijn, is het onderwerp van deze studie. Belangrijke vraag is tevens wat de commerciële kansen zijn voor brede toepassing van dit type opslagsystemen in een energiesysteem waar het aanbod van wind en zon geen gelijke tred houdt met de energievraag. Resultaten worden vergeleken met internationale rapporten en publicaties op dit onderwerp¹. In deze haalbaarheidsstudie is gekeken naar technologie, business case, marktvraag, veiligheid en eisen van de gebruikers.

Achtergrond

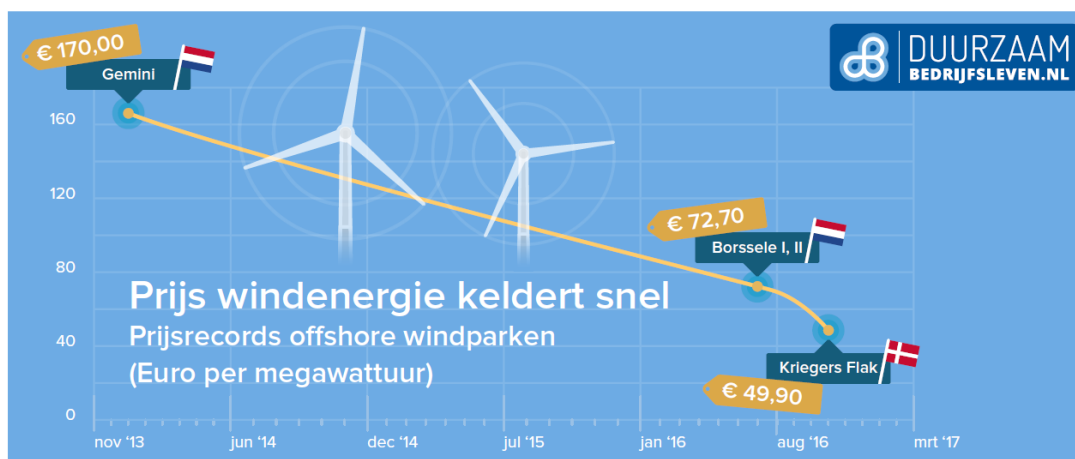
In 2050 moeten alle Nederlandse woningen volgens de overheid klimaatneutraal zijn om te voldoen aan de afspraken gemaakt in december 2015 in Parijs om klimaatverandering tegen te gaan. De uitstoot van CO₂ moet met 80% tot 95% worden teruggedrongen. Dat betekent dat Nederland veel minder energie uit fossiele bronnen moet gaan gebruiken. Aangezien de gebouwde omgeving een grote energieverbruiker is, is de verduurzaming van de gebouwde omgeving een belangrijke opgave. Energiesystemen voor gebouwen op basis van waterstoftechnologie kunnen (deels) onafhankelijk van de gas- en elektriciteitsinfrastructuur werken en bijdragen aan de noodzakelijke verduurzaming. Omdat de verduurzamingsopgave in de gebouwde omgeving omvangrijk, divers, en complex is, liggen hier forse commerciële kansen voor bedrijven die waterstoftechnologie ontwikkelen en voor netbeheerders zoals Alliander. Netbeheerders kunnen door toepassing van 'stand-alone' systemen investeringen in de energie-infrastructuur beperken.

Energieopwekking vindt in toenemende mate kleinschalig en lokaal plaats door wind en pv-panelen. Alhoewel het energieverbruik uit hernieuwbare bronnen in Nederland in 2016 5,9% is², zal dat in de komende decennia aanzienlijk (moeten) gaan groeien. Met de toename van het aanbod wordt ook de vraag relevanter wat te doen als de opwekking groot is (de zon schijnt en/of het waait hard) en de vraag klein is. Dat zijn de momenten dat duurzame elektriciteit tegen lage kosten beschikbaar is.

¹ IRENA (2017), Accelerating Off-grid Renewable Energy: Key Findings and Recommendations from IOREC 2016, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

² <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2017/22/aandeel-hernieuwbare-energie-5-9-procent-in-2016>

Omdat de prijs van de kosten van duurzaam opgewekte elektriciteit snel daalt zal het over niet al te lange termijn kunnen concurreren met fossiel opgewekte energie. Hoe snel de prijzen dalen laten onderstaande figuren zien.



Figuur 1: prijsontwikkeling windenergie

Lokale, residentiële energieopslag is interessant, aangezien de gebouwde omgeving in Nederland 33% van de totale energiebehoefte voor haar rekening neemt. Dit staat nog los van de energievraag voor mobiliteit voor bedrijven en huishoudens die 23% bedraagt³. In Archypel is onderzocht of waterstof die 'thuis' wordt geproduceerd voor mobiliteit kan worden gebruikt en via die route een bijdrage kan leveren aan verduurzaming van de mobiliteitssector.

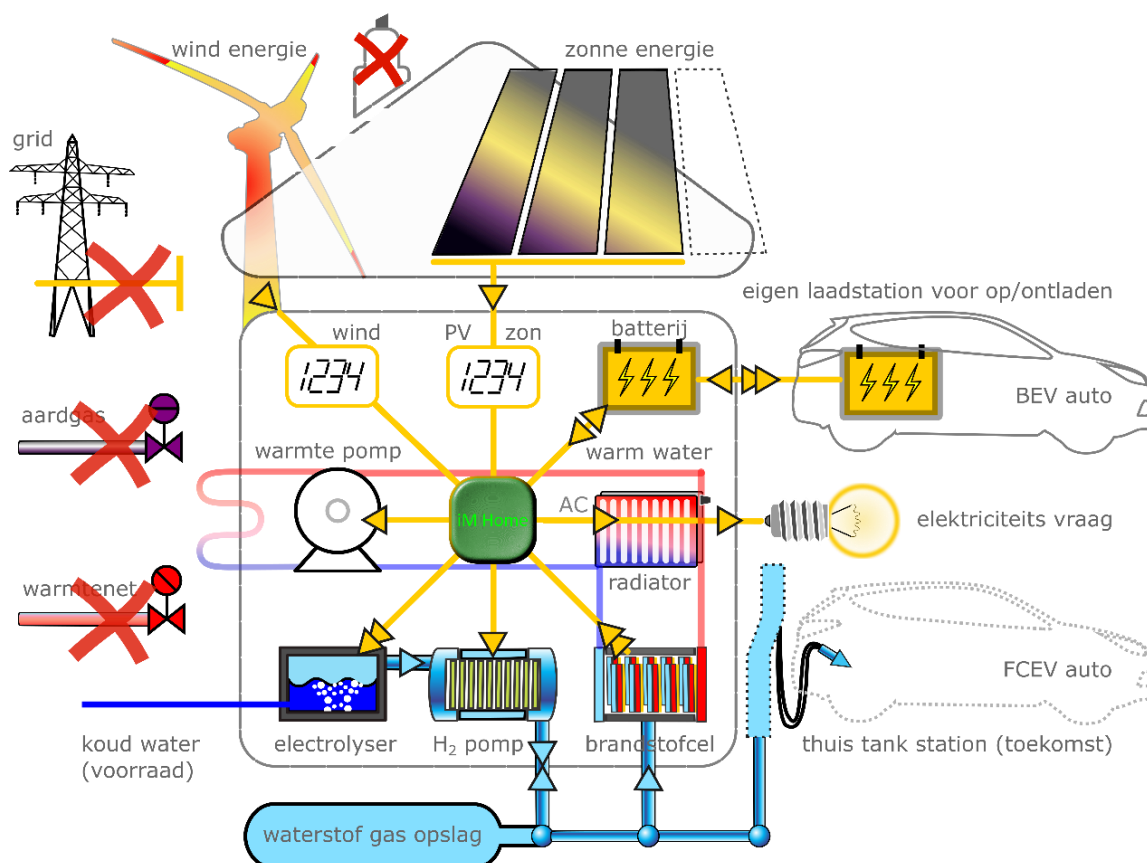
Eén van de opties om de vraag op het wisselende aanbod af te stemmen is vraagflexibilisering: meer elektriciteit gebruiken op momenten dat de prijs laag is en vice versa. Daarnaast is het nodig om duurzame elektriciteit op te slaan voor momenten dat de (duurzaam) geproduceerde elektriciteit niet kan voorzien in de energievraag. Allereerst om energie te hebben in de avond en 's nachts, maar ook voor periodes dat de zon en wind langdurig niet of onvoldoende energie leveren voor de vraag. Dat geldt vooral voor de winterperiode. De vraag voor energie-opslag speelt voor huishoudens, op wijkniveau, maar ook op regionaal en nationaal niveau. Deze energiebuffers moeten de verschillen tussen aanbod en vraag per dag, per week en op seizoenniveau opvangen. In het Archypel project kijken de deelnemende organisaties naar de deze vormen van opslag. Kleinschalige energieopslag met waterstof is niet alleen toepasbaar bij huishoudens, maar ook voor andere kleinschalige toepassingen zoals kantoren, boerderijen, kleinschalige industriële toepassingen.

³ NEV 2016

Waterstof (H₂)

Waterstof is gekozen als opslagmedium omdat het emissievrij kan worden geproduceerd op basis van duurzame elektriciteit én omdat de verschillende componenten die nodig zijn om waterstof te produceren, op te slaan en om te zetten in energie beschikbaar zijn. Archypel heeft de configuratie voor het energiesysteem uitgewerkt. Deze bestaat uit de volgende onderdelen (zie onderstaande figuur). Het systeem is opgebouwd uit de volgende componenten:

- Elektrolyser
- Waterstofcompressor
- Brandstofcel
- Warmtepomp
- Waterstofopslagtank(s)
- Batterij
- Regelsysteem
- AC/DC converter



Figuur 2: Archypel systeem

Buiten de scope van Archypel valt de componentselectie voor de duurzame elektriciteitsopwekking met windmolens en pv-panels, en de aansluiting of systemen voor vervoerstoepassingen voor een Battery Electric Vehicle (BEV) of Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV).

Systeemvarianten

De HAN heeft m.b.v. het modelleersysteem HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables) drie varianten gesimuleerd en doorgerekend op basis van de energievraag van een twee-onder-een-kapwoning in Amersfoort voor een gezin met vijf bewoners. Het huis is na het jaar 2000 gebouwd, dus redelijk geïsoleerd, en jaarlijks verbruikt deze woning 4400 kWh elektriciteit en 1600 m³ gas. Het verloop van het energieprofiel en de hoogte van de energievraag is conform het gemiddelde van alle twee-onder-één-kap woningen met vijf bewoners.

De volgende drie systemen zijn uitgewerkt:

1. De Base Case (**BC**) voorziet in een energieopslagsysteem voor elektriciteit, tapwater en ruimteverwarming.
2. Base Case Variant 1, **BC⁽⁻⁾** variant, is gelijk aan de BC zonder verwarming van de woning. Die wordt gedaan met een andere duurzame verwarmingsmodule bijvoorbeeld aardwarmte/warmtepomp of een houtkachel.
3. Base Case Variant 2, **BC⁽⁺⁾** variant, is gelijk aan de BC én 100 km/dag emissievrij rijden op zelf geproduceerde waterstof of elektriciteit.

Resultaten simulatie

De simulatie levert de volgende resultaten op. De gegevens voor 2017 zijn gebaseerd op de doorrekening met HOMER. De getallen voor 2030 zijn de inschatting van de betrokken partners bij massa productie van de componenten aangevuld met literatuurgegevens.

	Base Case	Base Case ⁽⁻⁾	Base Case ⁽⁺⁾	Referentie
Energievraag twee-onder-een-kapwoning	Elektriciteit, warm tapwater, verwarming van de woning met Archypel systeem	Elektriciteit, warm tapwater met Archypel. Ruimteverwarming woning met bijvoorbeeld houtkachel ⁴	Elektriciteit, warm tapwater, verwarming woning en 100 km emissievrij rijden met Archypel systeem	Elektriciteit, warm tapwater en verwarming woning met elektriciteit en gas via netaansluiting
Kosten kWh	2017: €1,53/kWh 2030: €0,93/kWh	2017: €2,16/kWh 2030: €0,91/kWh	2017: €1,39/kWh 2030: €0,84/kWh	2017: €0,22/kWh
CAPEX/ investering per systeem	2017: €305K 2030: €202K	2017: €87K 2030: €40K	2017: €323K 2030: €212K	
OPEX, operationele kosten per systeem	2017: €6.286/jr 2030: €2.338/jr	2017: €2.820/jr 2030: €940/jr	2017: €6.790/jr 2030: €2.565/jr	
gasvolume H ₂ opslag maximale druk	350 kg = 9-12 m ³ 700 bar	50 kg = 1-2 m ³ 700 bar	350 kg = 9-12 m ³ 700 bar	

Figuur 3: resultaten berekening HOMER

Homer berekent dat er qua ruimte een, voor de gebouwde omgeving onrealistisch groot aantal pv-panelen en windturbines nodig is om de energie jaarrond zelf op te wekken binnen de bebouwde kom. Buiten de bebouwde kom is het waarschijnlijk beter mogelijk om alle energie zelf op te wekken. Ook

⁴ Voor een gemiddeld huishouden is ongeveer 1/3 van de gaskosten nodig voor ruimteverwarming, rond de €450 per jaar. De aanschafkosten voor een eenvoudige kachel zijn ongeveer €750.

laat het zien dat er een grote buffer, van één à twee m³ in de BC⁽⁻⁾ tot ongeveer 10 m³ in de BC⁽⁺⁾ variant, nodig is om alle waterstof op druk op te slaan om de energievraag in de winter te dekken.

Technisch is het mogelijk een energieopslagsysteem te maken voor een autarkisch huis, maar vooralsnog hangt er wel een fors prijskaartje aan volledige onafhankelijkheid en zelfvoorzienendheid: afhankelijk van de functionaliteit van het systeem liggen de geschatte elektriciteitsprijzen tussen €0,84 tot €2,16/kWh (respectievelijk: Base Case⁽⁻⁾ en Base Case⁽⁺⁾ zie figuur 3), maar aanzienlijk hoger dan de verbonden 'grid' elektriciteitsprijzen, deze liggen rond de €0,22/kWh. De verwachting is dat het Archypel system energie tegen competitievere prijzen kan leveren op langere termijn (richting 2030), mede dankzij een kostendaling met seriematige productie van componenten en verregaande systeemintegratie, inclusief de besturing. Dat vraagt om een apart, doelgericht ontwikkeltraject.

Voor het in kaart brengen van de potentiële marktvraag is de positie van het Archypel energieopslagsysteem ten opzichte van de huidige alternatieven bepaald met behulp van de zogenaamde 'value curving' methode⁵. Op basis hiervan kunnen voor nieuwe producten, zoals voor het Archypel energieopslagsysteem, de sterktes en zwaktes ten opzichte van bestaande producten inzichtelijk worden gemaakt en worden geëvalueerd. De uitkomst geeft aan hoe het product gepositioneerd moet worden en welke waarde-elementen verder ontwikkeld moeten worden.

De value curving analyse laat zien dat de Archypel-systemen nu al potentieel interessant zijn voor een beperkte doelgroep van huiseigenaren in Nederland met voldoende ruimte en financiële middelen, die de waarde-elementen onafhankelijkheid, duurzaamheid, (groen) imago en emotionele beleving belangrijk vinden.

Conclusies

Een Archypel systeem waarbij een huis alle energie op eigen terrein opwekt en opslaat in waterstof en batterijen is technisch mogelijk, maar is om een aantal redenen nog niet aantrekkelijk. Een belangrijke praktische beperking is de ruimte die nodig is voor alle zonnepanelen en windturbines; deze nemen meer ruimte in beslag dan de twee-onder-een-kapwoning beschikbaar heeft. Een ander praktisch nadeel is het volume dat nodig is voor de opslag van waterstof voor de winterperiode, daarvoor is een tank nodig van ongeveer 10 m³. Zoals bij elk nieuw systeem dat nog niet in grote aantallen wordt geproduceerd, zijn de kosten in vergelijking met alternatieve systemen nog te hoog.

Een mogelijke vervolgstap kan zijn om een Archypel systeem te ontwerpen dat verbonden is met het elektriciteitsnet, of aaneengeschakelde microgrids, waardoor het systeem kleiner en goedkoper kan worden (lagere investeringskosten) én er gebruik kan maken van de infrastructuur in Nederland.

De huidige energie (gas- en elektriciteit-) en de ICT infrastructuur maken het voor Nederland niet direct noodzaak om een Archypel systeem voor autarkische woningen te realiseren, maar dit soort systemen kunne, in hybride vorm, een belangrijke bijdrage leveren aan het efficiënt inpassen van hernieuwbare energie en nationale CO₂ emissies te reduceren.

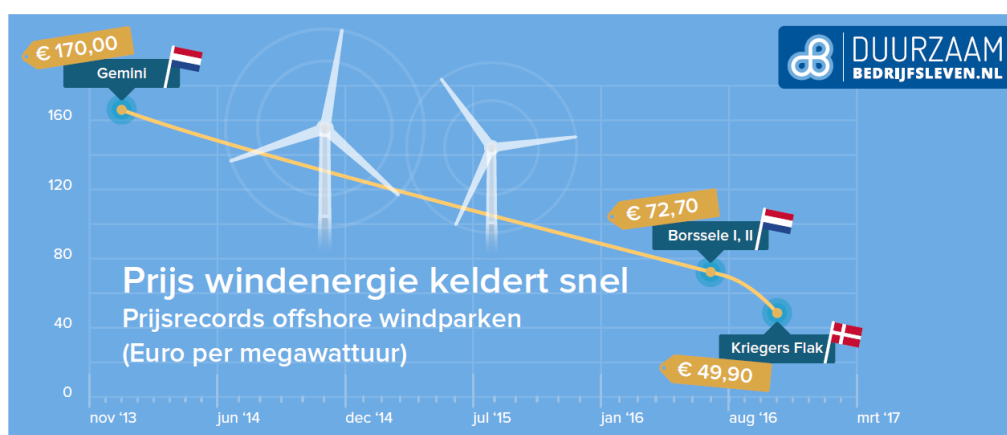
⁵ W. Chan Kim and R. Mauborgne, Harvard Business Review, January 1997 entitled "Value Innovation: The Strategic Logic of High Growth"

1. Projectomschrijving

1.1 Achtergrond

In 2050 moeten alle Nederlandse woningen volgens de overheid klimaatneutraal zijn om te voldoen aan de afspraken gemaakt in december 2015 in Parijs om de opwarming van de aarde te beperken. De uitstoot van CO₂ moet om die reden worden teruggedrongen. Dat betekent fors minder energie gebruik uit fossiele bronnen, waaronder vergaande reductie van het gebruik van aardgas in de gebouwde omgeving. Het huidige energieverbruik zal, in navolging van de afspraken gemaakt in Parijs, met 80% tot 95% in 2050 moeten worden teruggebracht. Stichting Natuur & Milieu wil dat sneller en wil dat vanaf 2035 al 90% van alle huizen van het gas af is en Milieudefensie ziet het liefst dat alle gebouwen en woningen in 2035 zonder aardgas kunnen⁶. Zogenaamde 'all electric' huizen zijn niet op het gasnet en ook niet op een warmtenet aangesloten, maar zijn bij de huidige opwekking van elektriciteit *niet* CO₂-neutraal aangezien vooralsnog maar 6% van de elektrische energie uit duurzame bronnen komt.

Energieopwekking vindt in toenemende mate kleinschalig en lokaal plaats door wind en pv-panelen en dat aandeel zal sterk gaan groeien in de komende decennia. Alhoewel het energieverbruik uit hernieuwbare bronnen in Nederland in 2016 5,9% is⁷, zal dat in de komende decennia fors (moeten) gaan groeien. Met de toename van het aanbod wordt ook de vraag relevanter wat te doen, wanneer opwekking overvloedig is (de zon schijnt en/of het waait hard) en verbruik laag is. Volledige benutting van duurzaam opgewekte energie wordt steeds aantrekkelijker, omdat de kosten van duurzaam opgewekte elektriciteit snel dalen, zoals de figuren hieronder laten zien.



⁶⁶ <https://www.bewustnieuwbouw.nl/geen-gasaansluiting-nieuwbouwwijk-toekomst/> ⁶ <https://www.bewustnieuwbouw.nl/geen-gasaansluiting-nieuwbouwwijk-toekomst/>

⁷ <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2017/22/aandeel-hernieuwbare-energie-5-9-procent-in-2016>



Figuur 4: prijsontwikkeling duurzaam opgewekte elektriciteit

Residentiële energieopslag is juist interessant, aangezien de gebouwde omgeving in Nederland 33% van de totale energiebehoefte voor haar rekening neemt. Lokale energieopslag kan ook een bijdrage leveren aan het verduurzamen van de energievraag voor verkeer en transport (23%) ten behoeve van deze bedrijven en huishoudens⁸.

Eén van de opties om gebruik te maken van goedkope duurzame elektriciteit is vraagflexibilisering: méér elektriciteit gebruiken op momenten dat de prijs laag is en vice versa. Daarnaast is het noodzakelijk om duurzame elektriciteit op te slaan als buffer voor die momenten dat de opgewekte elektriciteit (tijdelijk) niet kan voorzien in de energievraag. De behoefte aan energieopslag speelt op meerdere niveaus: voor voorhuishoudens, op wijkniveau, maar ook op regionaal en nationaal niveau. Deze energiebuffers moeten de verschillen tussen aanbod en vraag voor periodes van één dag, per week en over seizoenen opvangen. In het Archipel project kijken bedrijven naar de energieopslag op basis van waterstof voor huishoudens. Deze technologie is ook voor andere kleinschalige toepassingen zoals kantoren, boerderijen, kleinschalige industriële toepassingen én voor mobiliteit geschikt.

Welke kleinschalige energieopslag technisch mogelijk is en wat de kosten zijn, is onderwerp van deze studie. Belangrijke vraag is tevens wat de commerciële kansen zijn voor brede toepassing van dit type opslagsystemen in een energiesysteem waar meer duurzame energie wordt opgewekt. Resultaten worden vergeleken met internationale rapporten en publicaties over dit onderwerp⁹. In het project kijken we o.a. naar technologie, business case, mogelijke kostenreductie, marktvraag, veiligheid en gebruikersvriendelijkheid.

⁸ NEV 2016

⁹ IRENA (2017), Accelerating Off-grid Renewable Energy: Key Findings and Recommendations from IOREC 2016, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

1.2 Integratie technologieën en toepassingen

Het opslagsysteem met waterstof bestaat uit de volgende componenten:

- een kleinschalige elektrolyser om waterstof te maken
- Waterstofcompressor
- Brandstofcel
- Warmtepomp
- Waterstofopslagtank(s)
- Batterij
- Regelsysteem
- AC/DC converter

Gekozen is voor een combinatie van waterstofopslag (voor de langere termijn) en energieopslag in accu's/batterijen voor de korte termijn.

Batterij-systemen worden al commercieel aangeboden voor het overbruggen van de dag-nachtcyclus, maar schieten te kort voor energieopslag over maanden en seizoenen. Brandstofcellen worden al ingezet om elektriciteit en warmte in huis te produceren als zogenaamde "Combined Heat and Power (CHP)" systemen en er zijn inmiddels meer dan 150.000 CHP-systemen geïnstalleerd in Japan onder het ENE-FARMFARM project. De EU heeft een vergelijkbaar programma, genaamd ENE-FIELD. Dat het commercieel lastig is, valt af te leiden uit een beslissing van HR-ketelproducent Vaillant. Deze heeft recent gemeld de ontwikkeling van hoge temperatuur Solid Oxide Fuel Cells CHP systemen stil te leggen¹⁰, omdat op dit moment de kosten voor huizenbezitters te hoog zijn en niet kunnen concurreren met andere traditionele systemen.

Verregaande integratie van energie-opslag-systemen zijn of worden al gerealiseerd als demonstratieproject in Zwitserland⁴⁸, in Duitsland¹¹, maar ook in Nederland zijn plannen voor een zelfvoorzienend 3D-geprint huis in Apeldoorn¹². Bedrijven gaan zich ook meer focussen op residentiële energieopslag voor vier seizoenen, waarbij sommigen het doel hebben om volledige grid-onafhankelijk¹³ te zijn.

De integrale warmtevoorziening blijkt een groot voordeel te zijn van brandstofcelssystemen, aangezien de warmtebehoefte gemiddeld groter is dan de elektrische energiebehoefte van huishoudens. Huidige HR-ketels kunnen alleen warmte leveren. Energiesystemen gebaseerd op de brandstofcel leveren meer functionaliteit en kunnen daardoor een grote bijdrage leveren aan het reduceren van CO₂ uitstoot.

Mobiliteit en infrastructuur

De koppeling tussen huishoudelijk energieverbruik en mobiliteit is actueel met de trend van elektrisch rijden en de beschikbaarheid van het Batterij Elektrisch Voertuig (BEV) die aan huis kan worden opgeladen. De significant grotere energiebehoefte om emissieloos te kunnen rijden vraagt om verzwaring van het elektriciteitsnetwerk, indien er geen alternatieve oplossingen worden gevonden om stroom(laad)pieken te managen en gridstabiliteit te waarborgen. Een goed voorbeeld heeft BMW

¹⁰ <https://www.h2-international.com/2017/05/03/vaillant-puts-fuel-cell-heating-on-ice/> <https://www.h2-international.com/2017/05/03/vaillant-puts-fuel-cell-heating-on-ice/>

¹¹ <https://www.stiebel-eltron.nl/nl/magazine/het-huis-van-de-toekomst.html>

¹² <http://www.energiefabriekapeldoorn.nl/>

¹³ <http://www.homepowersolutions.de/en>

gerealiseerd in California met hun programma om elektrische auto's te laden in combinatie met gridstabilisatie, en sinds eind november 2016 kunnen BMWi-eigenaars hun eigen zonne-energie toevoegen met behulp van een Digital Charging Service¹⁴ (screenprint in bijlage). Het inpluggen na parkeren wordt een gewoonte. In Nederland wordt gridstabilisatie ook ontwikkeld door Siemens, Tennet en VandenBron in samenwerking met Tesla auto eigenaren.

Thuis tanken is ook mogelijk voor elektrische auto's met een brandstofcel (FCEV) zoals de Toyota Mirai, Honda Clarity, etc. Dit heeft het consortium 'Simplefuel' aangetoond met het winnen van de Amerikaanse Department Of Energy (DOE) thuishoudingcompetitie¹⁵. Infrastructuur voor waterstofgas is grootschalig aanwezig voor industriële toepassingen, maar moet nog worden uitgebreid voor mobiliteit en zoals hier voorgesteld: residentiële toepassingen. Interessant is dat in FCEV auto's in Japan de mogelijkheid is ingebouwd om 5 kW elektrische stroom terug te leveren aan het lokale netwerk. Dergelijk opties worden verder uitgewerkt in initiatieven van professor Ad van Wijk zoals "Car As Power Plant" (TU Delft).

Er verdwijnen ook beperkingen zoals de plannen om de aansluitplicht voor nieuwbouwhuizen op het nationale gasnetwerk te laten vervallen. Het wetsvoorstel Voortgang Energie Transitie (VET) beoogt de energietransitie te ondersteunen en versnellen door de regelgeving rond de elektriciteits- en gasnetten aan te passen. Dit is onder meer noodzakelijk omdat een toename van intermitterend vermogen (zon, wind) en decentrale invoeding hoge eisen stellen aan de betrouwbaarheid en de betaalbaarheid van de voorzieningen. Politieke beslissingen geven mede richting aan een technische verandering in de residentiële energievoorziening en worden financieel ondersteund in subsidietrajecten zoals TKI-energo¹⁶, en geven financiële mogelijkheid aan bedrijven zoals Tennet en GasUnie om te investeren en alternatieve business cases te ontplooiën.

Voorgaande geeft een aantal redenen waarom Archypel vanuit de energievraag van een autarkische woning de haalbaarheid van een geïntegreerd energieopslagsysteem heeft onderzocht.

1.3 Doel

Het Archypel project richt zich op het uitwerken van de techniek voor kleinschalig energieopslag en het onderzoeken van de commerciële haalbaarheid van een dergelijk systeem. Dit project beantwoordt alle relevante vragen die nodig zijn om in de volgende fase stapsgewijs toe te werken naar een pilot. Doel is het produceren van een energieopslagsysteem (product) dat veelvuldig en winstgevend kan worden ingezet om kostenreductie uit productievolumes te kunnen benutten. De uitkomst van de haalbaarheidsstudie identificeert tevens de bottlenecks voor implementatie van een dergelijk energieopslagsysteem, en de schaalgrootte waarop het economisch haalbaar is (op dit moment). Dit inzicht is medebepalend voor de vervolgstappen.

¹⁴ <https://flipboard.com/@flipboard/flip.it%2Fn7Fj8--bmw-announces-new-program-to-manage-ele/f-6e6911e8bd%2Felectrek.co>
<https://flipboard.com/@flipboard/flip.it%2Fn7Fj8--bmw-announces-new-program-to-manage-ele/f-6e6911e8bd%2Felectrek.co>

¹⁵ http://www.greencarreports.com/news/1108482_simplefuel-home-hydrogen-fuel-dispenser-wins-1-million-doe-prize
<http://www.hydrogenprize.org/simplefuel-world-premiere-system-design-unveiling-at-act-expo-a-great-success/>
http://www.greencarreports.com/news/1108482_simplefuel-home-hydrogen-fuel-dispenser-wins-1-million-doe-prize
<http://www.hydrogenprize.org/simplefuel-world-premiere-system-design-unveiling-at-act-expo-a-great-success/>

¹⁶ <http://www.tki-energo.nl/site/wp-content/uploads/Urban-Energy-Kennis-Innovatieagenda-2016-2019-versie-29-05-2015.pdf>

2. Modelling

In dit hoofdstuk worden een aantal scenario's uitgewerkt waarbij een gemiddeld consumptiepatroon voor een gezin met vijf personen is gebruikt. Daarbij is de energiebehoefte op verschillende tijdschalen aangegeven: kortstondig, dagelijks, maandelijks en op seizoens- en jaarbasis. Deze informatie is gebruikt om de omvang van de energieopslag te bepalen.

2.1 Varianten

1. De **Base Case** voorziet in een energieopslagsysteem voor elektriciteit, tapwater en ruimteverwarming
2. Base Case Variant 1, de **Base Case** ⁽⁻⁾ variant, is zonder ruimteverwarming. Die wordt gedaan met bijvoorbeeld aardwarmte of een houtkachel.
3. Base Case Variant 2, de **Base Case** ⁽⁺⁾ variant, is met ruimteverwarming én 100 km emissievrij rijden.

2.2 Gebruikspatronen en energievraag

De HAN heeft met behulp van het modelleringssysteem HOMER bovenstaande varianten doorgerekend. Bij de modellering is uitgegaan van een autarkische woning, die met behulp van pv-panelen en windmolen(s) energie opwekt voldoende voor de energievraag jaarrond.

De energiebehoefte van een huishouden wordt in belangrijke mate bepaald door de volgende factoren:

- Samenstelling en leeftijdsopbouw van het gezin/huishouden
- Woningtype (rijtjeshuis, twee-onder-één-kap, vrijstaand)
- Klimaat op geografische locatie, dagelijks weerpatroon

Leefpatronen van verschillende gezinssamenstellingen zijn online beschikbaar^{17 18}. Voor een aantal scenario's heeft Alliander de data aangeleverd om een realistische voorstelling te maken ten behoeve van modellering van de verschillende woningtypes in HOMER in Nederland.

Eén van de uitgangspunten van het project is dat de woning autarkisch is qua energieopwekking. Dat bleek echter niet mogelijk bij de verschillende woningtypes. De benodigde ruimte voor het plaatsen van de PV-panelen, (zoals nodig in één variant) een windmolen en het energieopslagsysteem is voor alle gemodelleerde varianten met uitzondering van een boerderij te groot. De aanname dat elk type woning voldoende ruimte zou, hebben bleek echter niet realistisch. Alleen een boerderij heeft voldoende ruimte op eigen grond voor de zonnepanelen en een windmolen.

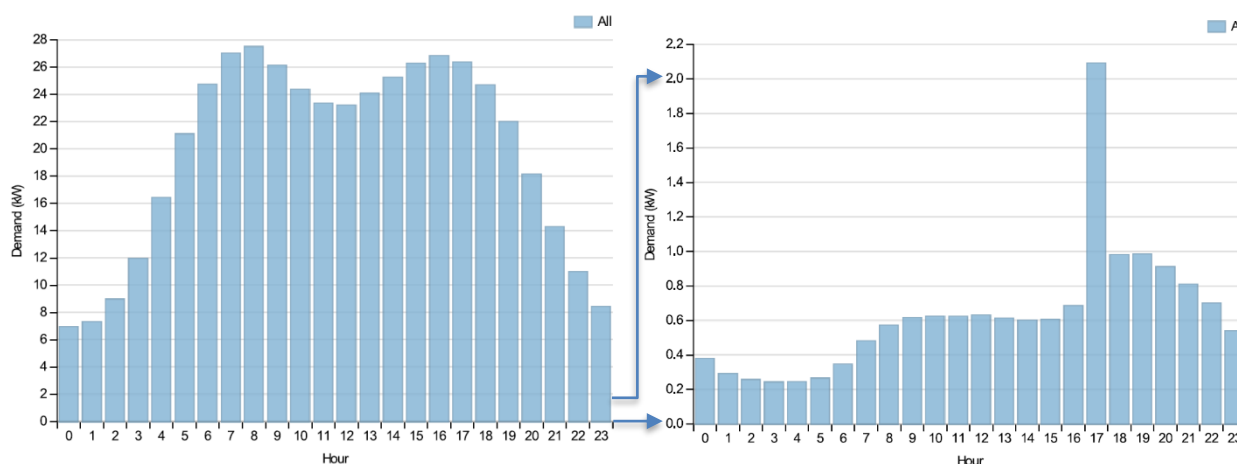
De warmte- en elektrische vraag zijn in dit project gebaseerd op een vijfpersoonshuishouden zoals gedefinieerd in de woonsituatie 'twee-onder-een-kap' woning.

¹⁷ <http://www.fc.n.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC-FCN/Forschung/Abgeschlossene-Projekte/~evmj/Energy-Consumption-Patterns-of-an-Aging/?lid=1>

¹⁸ D. Fischer, A. Härtl, B. Wille-Haussmann, "Model for electric load profiles with high time resolution for German households", Energy and Buildings 92, (2015) 170-179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.058>

De geografische locatie geeft aan welk (gemiddeld) weerpatroon men kan verwachten, zoals de temperatuur, hoeveelheid zonne-uren¹⁹ en verdeling van windsnelheden²⁰. De aangenomen locatie voor deze studie is het adres van ISPT te Amersfoort. Voor de modellering in HOMER zijn reële uurdata gebruikt van dichtstbijzijnde KNMI weerstation (de Bilt) uit het jaar 2013.

Energiegebruiksprofielen zijn goed onderzocht en kunnen op basis van bovenstaande input gegevens worden gegenereerd op een locatie naar keuze²¹. Data van Alliander voor de huishoudelijke warmtevraag zijn gebruikt voor verwarming, warm water en koken, gebaseerd op de historische gasconsumptie zoals normaliter gebruikt voor deze doeleinden. Archypel gaat uit van een huishouden met inductiekookplaat (30 minuten op 2.4 kW, 450 kWh per jaar), eventueel een warmtepompinstallatie (7 kW vermogen, niet meegenomen in Base Case) en het benutten van passieve zonnewarmte om de warmtevraag in de winterperiode te reduceren. Dit levert het onderstaande vraagpatroon op, waarbij opvalt dat tussen 17 en 18 uur de elektriciteitsvraag groot is ten behoeve van het koken.



Figuur 5: Dagelijks gemiddelde warmtevraag (links) en elektriciteitsbehoefte (rechts) van een 2-onder-1-kap huishouden.

2.3 Uitgangspunten, aannames, limitering

Het 'in huis' energiesysteem is gebaseerd op de beschikbaarheid van 100% duurzame energie met een overcapaciteit van 10% waarmee tijdelijke toe- en afnames in vraag of aanbod kunnen worden gecompenseerd, zodat op elk uur van de dag leveringszekerheid kan worden gegarandeerd. De modellering is uitgevoerd aan de hand van uurdata (resolutie) voor elektrische en warmtevraag, zonne-instraling en windsnelheid invoer. De standaardinstellingen die zijn gebruikt voor de computer-iteraties zijn in bijlage 3 te vinden.

Voor de berekening van de business case is uitgegaan van een looptijd van 20 jaar, wat overeenkomt met de technische levensduur van het energiesysteem. De projectpartners hebben een prognose gegeven van huidige en toekomstige prijzen van relevante componenten. Deze getallen zijn aangevuld met informatie die publiek beschikbaar is. Een voorbeeld daarvan is het kental voor schaalvergroting:

¹⁹ <http://pywatts.nrel.gov/>

²⁰ www.windfinder.com

²¹ www.loadprofilegenerator.de

seriematige productie zou de kosten verlagen met ongeveer 80% ('progress ratio') bij verdubbeling van cumulatieve productieaantallen. Eenmalige ontwerp/engineering kosten worden niet beschouwd.

Het Archypel systeem stoot geheel geen CO₂ uit, omdat er geen aardgas wordt verbrand. De inkomsten die hier mogelijkwerijs uit voortkomen, zoals het vermijden van uitstootbelasting, zijn niet meegenomen in de financiële berekening. Er is wel sprake van voorkomen piekbelasting van het elektriciteitsnetwerk in het geval van een autarkisch systeem. Dit laatste is meegenomen in het hoofdstuk over de systeemwaarde van dit soort oplossingen.

3. Energieopslagsysteem

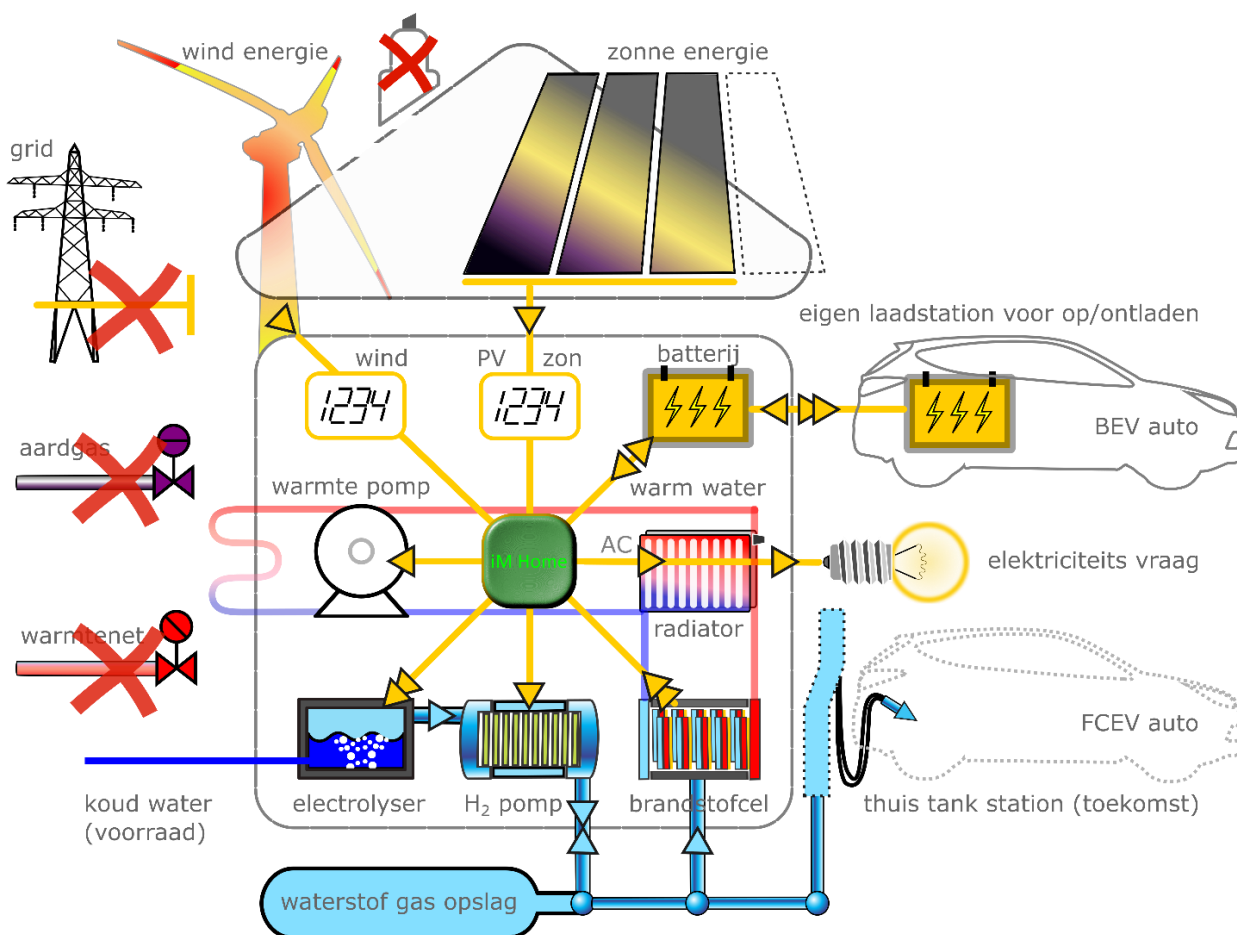
In dit hoofdstuk worden drie configuraties beschreven voor het energieopslagsysteem zoals gesimuleerd met HOMER. Deze configuraties worden in hoofdstuk 6 verder uitgewerkt als business case.

Hieronder is een schematisch overzicht van de verschillende componenten van het systeem afgebeeld. De energie die de pv-panelen en windturbines leveren wordt ten eerste gebruikt voor de momentane energievraag van de woning. Als er een overschot is aan energie wordt die opgeslagen in batterijen en in waterstof voor die momenten dat er wel een vraag is maar geen of onvoldoende aanbod van energie. Aan de rechterzijde van het schema is de auto weergegeven die of elektrisch of op waterstof rijdt.

Configuratie	Electriciteits Vraag	Warmte-kracht koppeling	Mobiliteitkoppeling
Base case	AC elektriciteit 11.92 kWh/dag	Warmte-kracht koppeling 7 kW vermogen 45.44 kWh/dag warmte	niet meegenomen
Base case ⁽⁻⁾	AC elektriciteit 11.92 kWh/dag	Alternatief = houtkachel niet meegenomen	niet meegenomen
Base case ⁽⁺⁾	AC elektriciteit 11.92 kWh/dag	Warmte-kracht koppeling 7 kW vermogen 45.44 kWh/dag warmte	Batterij-Elektrisch Voertuig (BEV – 100 km per dag) 10 kWh/dag energie

Figuur 6: Overzicht van configuratiespecificaties gemodelleerd in HOMER voor 201-kap scenario

Figuur 7 laat een volledig geïntegreerd energiesysteem zien waarin, naast batterijen, waterstof wordt gebruikt als energieopslag naast batterijen om seizoenen te overbruggen. Drie base-case scenario's worden beschouwd (zie figuur 6) waarin componenten worden geschaald op grootte, en er een koppeling wordt gemaakt tussen beschikbare zonne- en windenergie als input, de gemiddelde warmtevraag en ook mobiliteit met 100 km rijden per dag, en 's nachts opladen (Batterij (BEV); brandstofcel (FCEV) aangedreven auto's worden apart beschouwd).



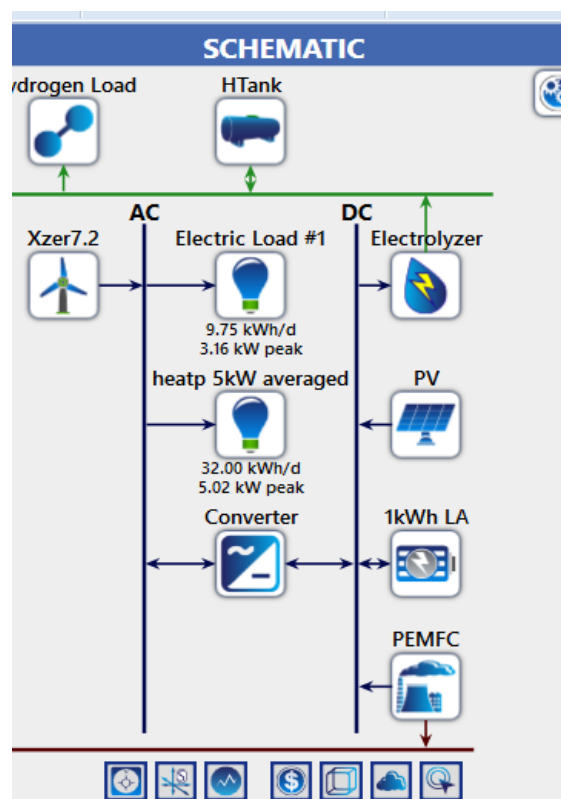
Figuur 7: Schematisch overzicht van een autarkisch huishouden

Het energieopslagsysteem zoals gesimuleerd met HOMER werkt als volgt: op elk moment dat wind- en zonne-energie beschikbaar is, wordt gekeken of aan de totale elektriciteits- en warmtevraag vanuit de bewoners kan worden voldaan; bij een tekort worden energiereserves aangesproken uit het opslagsysteem (ontladen batterij en bedrijven van brandstofcel en inverter voor omzetten DC → AC), en bij een overschot aan energie (DC) wordt de batterij weer opgeladen en de elektrolyser samen met de compressor aangezet. In HOMER is geen rekening gehouden met DC-DC conversie beperking/verliezen.

De warmtevraag voor verwarming van de ruimtes is omgerekend vanuit de het gasverbruik naar elektrische verbruik met een warmtepomp (bijvoorbeeld elektrische warmtepomp, evt. vloer- en wandverwarming). In de huidige situatie beslaat gasverbruik voor het verwarmen van het tapwater zo'n 30% van het de totale warmtevraag; of ruim 26%-32% van het totale gasverbruik^{22 23 24}. Tapwaterverwarming wordt hier voorzien uit warmte geproduceerd door de brandstofcel.

Conversie tussen wisselstroom (AC) en gelijkstroom (DC) wordt gedaan met behulp van een converter, bestaande uit een rectifier (AC → DC, 85% efficiëntie) en een inverter (AC ← DC, 90% efficiëntie) die als standaardcomponent zijn ingevoerd in HOMER. De elektrische vraag van gebruikers, de warmtepomp en de levering van windenergie zijn aangesloten op de wisselstroomlijn. Aangesloten op gelijkstroomlevering zijn pv-panelen, brandstofcellen, batterijen (ontladen) en op het gelijkstroomgebruik de batterijen (opladen) en elektrolyser. De AC en DC elektriciteitslijnen zijn schematisch hiernaast weergegeven in Figuur 8.

De totale elektrische vraag is een optelsom van de "load AC" en de "load DC". De convertor moet voldoende capaciteit hebben om te balanceren tussen deze netten. De opgegeven keuzemogelijkheden voor schaling van de inverter/rectifier waren 4, 10, 20 kW vermogen, waaruit 10kW voldoende bleek in de beschouwde situaties. Figuur 9 toont alle componentkeuzes voor HOMER.



Figuur 8: Schematisch overzicht van de relatie tussen AC en DC elektrisch stroom gebruik/levering

Windmolens (commercieel)	Zonnepanelen (2.75 kWh/m ² .d)	Batterij (commercieel)	Converter (commercieel)	PEM Fuel Cell (Nedstack)
1 kW	1 kW	1 kWh	4 kW	1.5 kW
(Windleaf)	2 kW		10 kW	2 kW
10 kW	5 kW ²		20 kW	4 kW
(Hummer H8.16)	10 kW			8 kW
	20 kW			12 kW

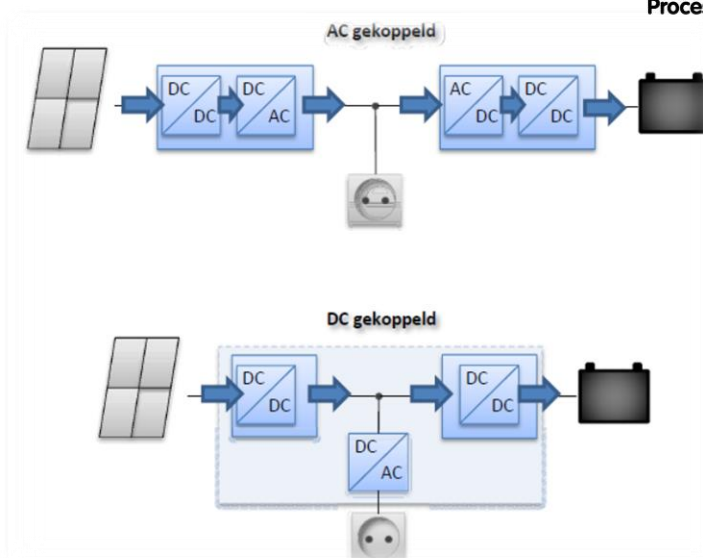
Figuur 9: Overzicht van de opgegeven component groottes (units/eenheden) die HOMER kan inpassen in het systeem, dat verder geoptimaliseerd kan worden door vervolgens 'precies' passende componenten te ontwikkelen.

²² <http://www.energieloket.info/energieverbruik-woning/> 300 m³ voor tapwater vs. 1150 m³ voor verwarming (26%)

²³ http://www.otb.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/Onderzoeksinstituut_OTB/Onderzoek/Onderzoek_en_advies/Onderzoeksthema_s/Nederlands/Duurzame_woningkwaliteit/Duurzaam_en_gezond_wonen/De_onderzoeken_binnen_de_groep_Duurzaam_en_Gezond_wonen/Energie_en_comfort/doc/4_stap1_EH29mrt10.pdf 385 m³ voor tapwater vs. 1200 m³ voor verwarming (32%)

²⁴ <https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Rapport%20Kentallen%20warmtevraag%20woningen%20NEW.pdf> 375 m³ voor tapwater vs. 1212 m³ voor verwarming (31%)

Lithium-ion batterijen zijn in HOMER gemodelleerd als 1 kWh standardeenheden, en het is in het midden gelaten of deze batterijen zijn geïnstalleerd in het huis, of deel uitmaken van de auto/mobiliteit opties (in geval van BaseCase⁽⁺⁾). De vervangingskosten worden in rekening gebracht bij 30% afname in geleverd vermogen, waarbij een standaard verouderingscurve is gehanteerd in het model. Vervangingskosten voor alle componenten van het energiesysteem zijn door de partners opgegeven of de kosten zijn geschat aan de hand van commerciële marktwaarde in de huidige of toekomstige marktscenario's.



Figuur 10: Schematische weergave van AC- en DC gekoppelde systemen

Energiebronnen, verbruikers en opslagsystemen voor energie kunnen op verschillende manieren worden gekoppeld: AC gekoppeld vs. DC gekoppeld zoals in Figuur 10 schematisch wordt weergegeven.

Bij een AC gekoppeld systeem kunnen de energie omvormers elk afzonderlijk worden aangesloten op het (lokale) AC-net waarop ook de verbruikers zijn aangesloten. Het is daarmee mogelijk om als basis bestaande, commercieel beschikbare systemen (bijvoorbeeld zonnemvormers, accusystemen) te gebruiken en deze te combineren tot één installatie. Afstemming tussen systemen teneinde de vermogensstromen te regelen is bij gebruik van bestaande systemen een belangrijk aandachtspunt, zodat de kwaliteit van de elektriciteitsvoorziening goed blijft²⁵.

Bij een DC gekoppeld systeem worden de energieomvormers gekoppeld via een DC-koppeling. Op deze DC-koppeling is daarnaast een omvormer aangesloten die de DC spanning omzet naar een AC netspanning waarop de lokale verbruikers aangesloten kunnen worden. Zelfstandige commercieel beschikbare systemen zijn veelal niet geschikt om via een DC-koppeling aangesloten te worden. Voor de verdeling van de energiestromen is een overkoepelende aansturing noodzakelijk. Als er een energietekort is, dan moet bepaald worden welke bron dit gaat leveren; terwijl bij een energieoverschot moet bepaald worden waar deze energie opgeslagen of verbruikt gaat worden. Daarbij moet de aansturing rekening houden met alle randvoorwaarden van de verschillende bronnen, verbruikers en energieopslag systemen.

Efficiëntie

Bij de omzetting van opgewekte DC spanning naar een AC spanning wordt vaak gebruik gemaakt van een DC tussenspanning. Bij de DC/AC omzetting wordt in dat geval gebruik gemaakt van een DC/DC

²⁵ S. Whaite, B. Grainger, A. Kwasinski, Review on "Power Quality in DC Power Distribution Systems and Microgrids", Energies (2015), 8, 4378-4399; doi:10.3390/en8054378, www.mdpi.com/journal/energies.

en opvolgende DC/AC conversie. Bij de opslag van een overschot aan opgewekte energie zal de DC tussenspanning eerst worden omgezet naar een AC spanning om vervolgens –in verband met opslag- weer omgezet te worden naar een DC spanning. Dit leidt tot extra conversieverliezen.

Vermogenspieken en benodigde capaciteit

Het gemiddelde vermogen dat een huishouden per uur nodig heeft ligt lager dan de kortstondige belastingspieken die incidenteel optreden. Daarnaast zijn veel energieomvormers (bijvoorbeeld omvormers van zonne-energie) niet in staat om snelle veranderingen in de energiebehoefte (bijvoorbeeld het aan- of uitschakelen van een waterkoker) te volgen. Hierdoor zullen bij snelle vermogensvariaties kortstondige vermogenstekorten of -overschotten ontstaan.

Bij een netgekoppelde installatie (grid) kan dit kortstondige tekort/overschot worden vereffend via het externe net. Als er meerdere huishoudens op één net zijn aangesloten dan zullen de vermogensvariaties relatief afnemen omdat de kortstondige variaties in benodigd vermogen per huishouden niet samenvallen. Bij *niet* netgekoppelde installaties zal de volledige variatie opgevangen moeten worden door de componenten binnen die ene installatie. Dit betekent dat er relatief een grotere (over)capaciteit noodzakelijk is.

Regelbandbreedte

Bij gebruik van meerdere losse standaard systemen (AC gekoppeld systeem) is de bandbreedte van de digitale communicatie beperkt. Dit kan met name voor niet netgekoppelde installaties voor problemen zorgen.

Communicatie	bandbreedte
Digitale communicatie tussen systemen	-
Digitale communicatie binnen 1 systeem	+
Regeling op basis van stroom/spanning metingen	++

Bij DC gekoppelde installaties kan, naast de digitale communicatie, ook de DC-tussenspanning gebruikt worden voor de snelle afstemming tussen verschillende systemen. Variaties van de DC-spanning hebben in dit geval geen invloed op de AC spanning (want de DC/AC omvormer zorgt voor de stabiele spanning), en hebben dus geen invloed op de aangesloten verbruikers.

In stand-alone AC gekoppelde installaties is er verder de mogelijkheid om te communiceren via de AC eigenschappen, bijvoorbeeld door het verhogen of verlagen van de lokale netspanning en/of de frequentie. Hierbij moet het systeem echter altijd binnen de normale net toleranties blijven, omdat ook de gebruikers op diezelfde netspanning aangesloten zijn. De benodigde voorzieningen voor het afstemmen van de vermogensstromen zijn niet gestandaardiseerd waardoor, zeker wanneer het bestaande systemen van verschillende fabrikanten betreft, de regeling van de installatie een groot aandachtspunt is.

Systeemcomponenten

Hieronder worden de fuel cell, electrolyser en elektrochemische compressor componenten nader beschreven.

PEM fuel cell (PEMFC)

Een PEM brandstofcel is een type brandstofcel waarbij een proton geleidend membraan toegepast is. Dit zure polymeer elektrolyt membraan, veelal gebaseerd op een gesulfoneerd tetrafluoretheen copolymeer, scheidt gasstromen en is gasdicht, maar geleidt wel in gehydrateerde vorm protonen (H^+).

In een PEM brandstofcel wordt waterstof en zuurstof elektrochemisch "verbrand" waarbij elektrische energie (en warmte) wordt gegenereerd en water wordt geproduceerd. Een generieke PEM brandstofcel kent twee compartimenten die gescheiden worden door het polymeer elektrolyt membraan. Aan beide zijden van het membraan worden gekatalyseerde electrodes geplaatst. De volgende reacties treden hierbij op aan de negatieve, respectievelijk positieve electrode van de elektrochemische cel.

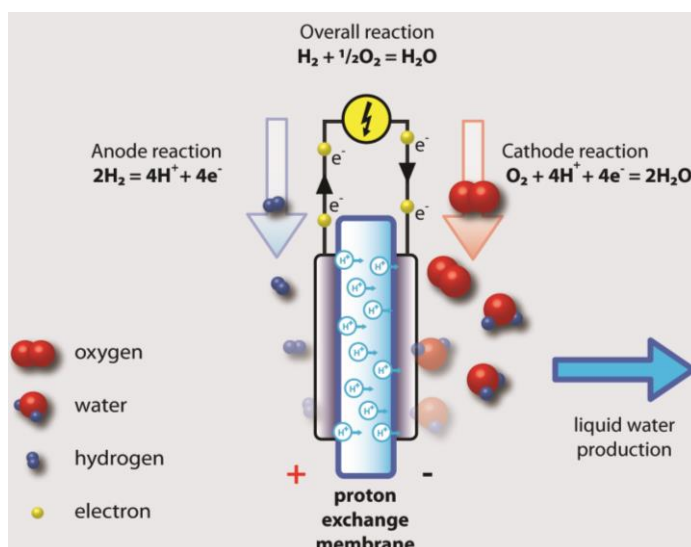
Anode (-): $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$

Kathode (+) : $\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$

De PEM brandstofcel heeft een aantal eigenschappen die zeer gunstig zijn voor het gebruik in stationaire en mobiele toepassingen zoals een hoge vermogensdichtheid, snelle opstarttijd, snelle respons voor variabele belasting en lage werkingstemperatuur en -druk. De efficiëntie van de energie omzetting in een PEMFC is gerelateerd aan de het werkpunt m.b.t stroomdichtheid en ligt tussen de 35-60% (t.o.v. de hoge verbrandingswaarde van waterstof (HHV²⁶)).



Figuur 11 PEM brandstofcel stack van NedStack (8 kWe)



Figuur 12: werkingsprincipe PEM brandstofcel

PEM water elektrolyser (PEMWE)

Een PEM water elektrolyser (PEMWE) is qua werking het tegenovergestelde van de PEMFC. Waar de brandstofcel elektrische energie genereert uit de elektrochemische verbranding van waterstof en zuurstof, wordt in een PEM water elektrolyser met behulp van elektrische energie water gesplitst in waterstof en zuurstof. In deze elektrochemische cel is tevens een polymeer electrolyt membraan toegepast dat protonen geleid. De volgende halfreacties treden op aan de electrodes van de cel:

Anode (+): $H_2O \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + 2 H^+$

Kathode (-) : $2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2$

Waterstofproductie middels elektrolyse van water in een PEMWE is een schoon en relatief simpel proces. Water wordt in een elektrochemische membraanmodule met behulp van elektrische stroom gesplitst in waterstof (H_2) en zuurstof (O_2). Water wordt geoxideerd aan de anode (positieve electrode) tot zuurstof en protonen ($H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^- + 2H^+$). De protonen worden onder invloed van een elektrische veld getransporteerd naar de kathode (negatieve electrode), waar er waterstof wordt gevormd ($2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2$). De waterstof is de brandstof.

Indien waterstof geproduceerd wordt door elektrolyse van water met elektriciteit geproduceerd uit niet-vervuilende hernieuwbare energie - zoals waterkracht, fotonvoltaïsche cellen, thermische zonnecellen, windenergie - kan men spreken van een schone energie(drager).

Elektrolytische waterstof (en zuurstof) heeft een hoge zuiverheid en kan zowel op grote als kleine schaal geproduceerd worden; de elektrochemische membraanmodule technologie is modulair en kan worden opgeschaald. Het rendement van de energie conversie is net als de brandstofcel gerelateerd aan het gekozen werkpunt m.b.t. stroomdichtheid en ligt globaal tussen de 75-90% (voltage efficiency t.o.v. HHV²⁶ H_2).



Figuur 13: PEM Water Electrolyse (PEMEW) stack van Hydron (4 kW_e)

²⁶ <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47302.pdf> "hydrogen fundamentals and case study summaries"

Elektrochemische Waterstof Compressor

HyET heeft een compressor voor waterstof ontwikkeld op basis van het elektrochemische brandstofcelprincipe, zodat die volledig stil is en gebruikt kan worden in of nabij huizen. De compressor is ook uniek vanwege het feit dat de waterstof in één stap van enkele bars tot maximaal 1000 bar isotherm gecomprimeerd kan worden, wat de compressor efficiënt maakt. Hiernaast staat afgebeeld een foto van het nieuwste EHC stack model van HyET, de HCS100. Een compressor unit kan tot 10 kg/dag comprimeren wat gelijk staat aan de productie van een 25 kW elektrolyser. De compressor stack zelf is klein, 30 cm hoog en 25 cm in diameter. Een ondersteunend systeem (Balance of Plant) is o.a. noodzakelijk voor de stroom regeling, warmtehuishouding en bevochtiging van het gas.

Het huidige beschikbare EHC systeem van HyET is ontworpen als stand-alone meetsysteem en nog relatief groot met afmetingen: 60x60x140 cm (bxdxh). Deze module genaamd "MoHyTO" staat weergegeven op de foto hiernaast. Op dit moment wordt gewerkt aan een veel kleiner (deel)systeem dat gericht is om geïntegreerd te worden in een energieketen zoals binnen dit project. De afmetingen voor een compressorsysteem voor deze debieten moet rekening gehouden worden met 40 bij 40 bij 55 cm.



Figuur 14: HCS100 compressor stack (EHC)



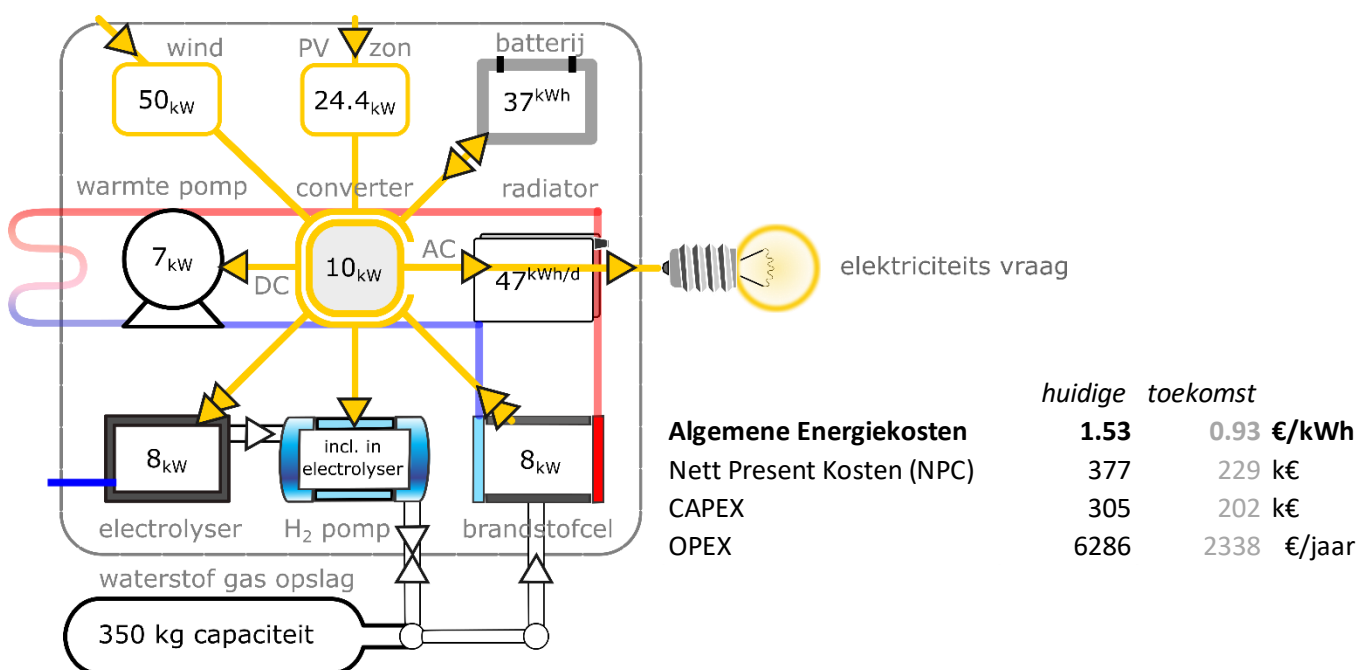
Figure 15: Mobile Hydrogen Test Systeem (MoHyTO)

3.1 Base case: energieopslagsysteem met ruimteverwarming

De Base-Case situatie (zie onderstaande tabel) beschrijft een autarkisch huishouden met een energie-consumptiepatroon passend bij het type twee-onder-één-kap, waarbij de gegenereerde systeemwarmte wordt gebruikt voor voorziening in de warmtebehoefte (warm water, ruimteverwarming, koken), maar de energie niet wordt gebruikt voor de mobiliteitsbehoefte (opladen of tanken van een batterij/brandstofcel of een elektrische auto). De totale energievraag is een sommatie van de (gemiddelde) warmtevraag en de (gemiddelde) elektriciteitsvraag over alle dagen van het jaar.

Base Case	<i>huidige</i>	<i>toekomst</i>	
Energie Vraag (excl. H ₂)	20936		kWh/jaar
Wind-energie productie	49362	49362	kWh/jaar
Zonne-energie productie	21632	18743	kWh/jaar
Totaal productie	70993	68104	kWh/jaar

Modellering laat zien dat de volgende vermogens en energiecapaciteit van de componenten nodig zijn, waarbij rekening wordt gehouden met (in)efficiëntie van kleine windmolens.



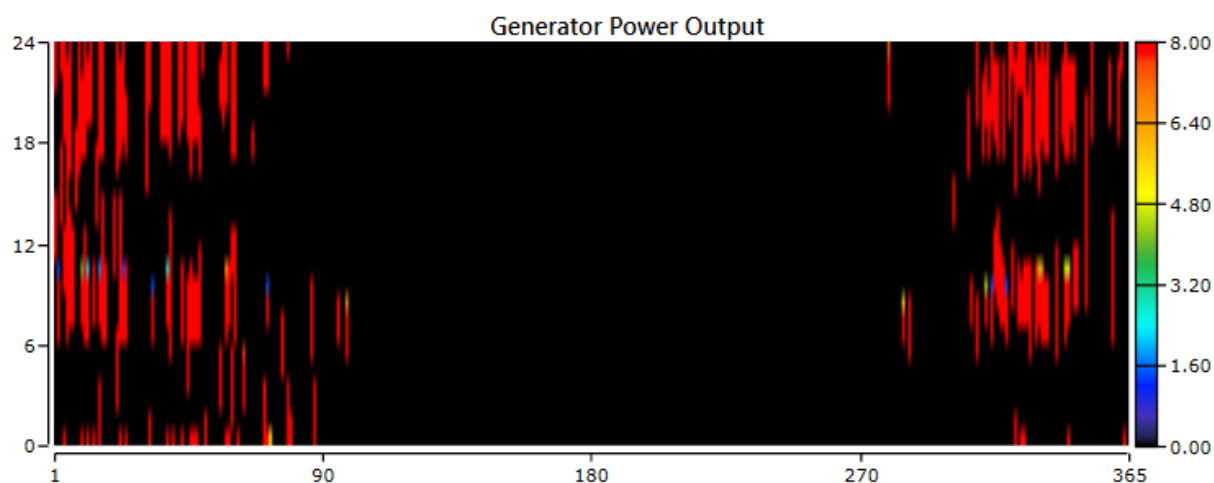
Figuur 16: geoptimaliseerde schaalgrootte van componenten in Base Case (uitgangspunt) met beschouwing warmtekoppeling en zonder beschouwing van mobiliteit

De energiekosten voor deze configuratie zijn berekend op 1.53 €/kWh, waarbij het kostenaandeel van de zonne-energie 0.118 €/kWh en van de windenergie 0.229 €/kWh²⁷ is. De operationele kosten van het energieopslag systeem alleen zijn 1.183 €/kWh, als we de kosten voor de zon- en windenergie niet meenemen. Dit is lager dan de gemiddelde batterijkosten van 1.350 €/kWh (zie hoofdstuk 6)

De componenten in het energiesysteem hebben elk een eigen gebruikspatroon zien zoals de figuren hieronder laten zien.

Brandstofcel

De tapwater-warmtevraag wordt mede geleverd door de operationele brandstofcel, die een totaal bijdraagt van 6.11 MWh op jaarbasis; dit is 37% van de totale warmtevraag voor verwarming. De brandstofcel is per jaar slechts 784 uur operationeel, doorgaans alleen in de winter in de ochtend- en avonduren, en schakelt dan bijna altijd in op vol vermogen.

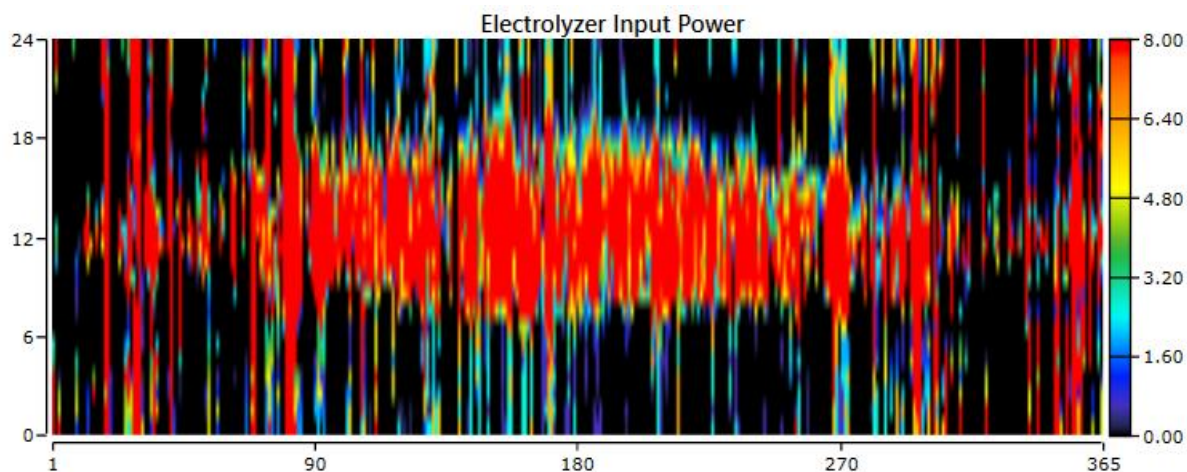


Figuur 17: Operationeel patroon en geleverd vermogen (kleur) van de brandstofcel waarin activiteit te zien is in de winter, gezien over de uren van de dag (y-as) en dagen in het jaar (x-as).

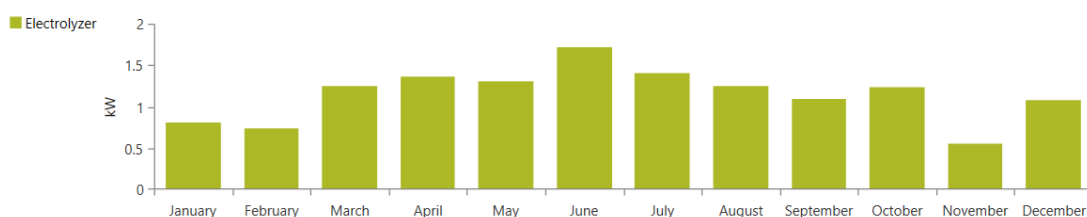
²⁷ De meest recente tender laat zien dat wind op zee rond de €0,05/kWh kost – het verschil komt door schaalgrootte en efficiëntie

Electrolyser

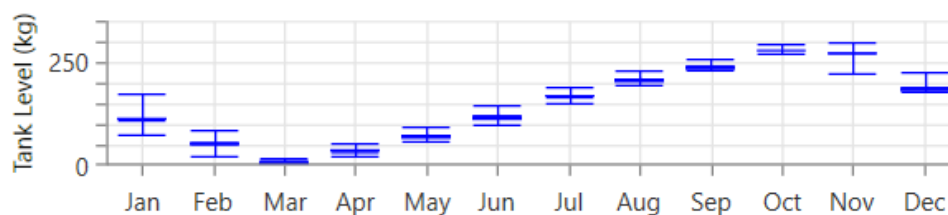
De elektrolyser in combinatie met de compressor worden juist benut tijdens de zomerdagen overdag, wanneer er een overschot zonne-energie beschikbaar is om waterstof te maken. Deze waterstof wordt opgeslagen waardoor de voorraadbuffer toeneemt tot maximaal 300 kg om de winterperiode te kunnen overbruggen.



Figuur 18: Operationeel patroon en geleverd vermogen (kleur) van de elektrolyser gezien over de uren van de dag (y-as) en dagen in het jaar (x-as), met de grootste activiteit in de zomermaanden, zoals ook duidelijk zichtbaar in de staafgrafiek met verbruik per maand weergegeven.



Waterstofopslag



Figuur 19: Hoeveelheid waterstof opgeslagen in de buffer tank per maand.

Deze hoeveelheid waterstof moet gedurende het jaar worden opgeslagen in lokale waterstoftanks. De waterstofvoorraad bereikt een minimum in maart en een maximum rond november. Op de aangenomen 700 bar druk neemt 300 kg waterstof op kamertemperatuur een volume in beslag van 7.65 m³ volgens NIST²⁸ (dichtheid 39.224 kg/m³).

Een zogenaamde standaard bundel waterstof (16x cilinders, zie foto) bevat 800 liter volume waarin gecomprimeerd wordt op 200 bar druk (standaard) of op 300 bar druk²⁹; dit bevat een totale hoeveelheid van respectievelijk 11.93 kg³⁰ en 14.62 kg waterstof, zodat er respectievelijk 25 (200 bar) en 20.5 (300 bar) bundels nodig zijn voor de bovengenoemde 300 kg opslag. Hypothetisch zijn er op 700 bar druk 'slechts' er slechts 11 waterstof bundels noodzakelijk.

Ongeveer 11 kg waterstof kan worden opgeslagen in 1x composietcilinder met koolstofvezelwikkeling (Hexagon-Raufoss, 375 bar maximum, 24.649 kg/m³, inhoud 450 dm³) zoals weergegeven in figuur 20. Er zijn 27 stuks van dergelijke composietcilinders noodzakelijk om 300 kg waterstof op te slaan en een autarkisch 2o1-kap huishouden het volledige jaar in warmte- en elektriciteitsbehoefte te voorzien.



Figuur 20: foto een voorbeeld waterstof 'bundel' of 'pakket' (rode cilinders) en commerciële composiet waterstof cilinder van Hexagon-Raufoss met inhoud 450 liter.

Composiet tanks kunnen waterstof op 700 bar opslaan (en hoger), maar zijn relatief duur. De Department of Energy (USA) hanteert een target kost voor een enkele tank (5.6kg inhoud, type IV) van \$15 per kWh, oftewel \$500/kg(H₂), waarin het koolstofvezel materiaal 62% van de kosten voor rekening neemt^{31 32}. Voorspellingen geven aan dat voor deze prijs (\$15/kWh) ook mobiele systemen realiseerbaar zijn op 500 bar druk met 40 kg(H₂) opslagcapaciteit. Meerdere opties zijn mogelijk.

²⁸ NIST calculator (<http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi>)

²⁹ <http://www.wystrach-gmbh.de/produkt-wystrach-anlagenbau.html>

³⁰ Op basis van offerte Air Products van vergelijkbaar product

³¹ FCTO Data Record #15013, 11/25/2015: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15013_onboard_storage_performance_cost.pdf

³² Ordaz, G., C. Houchins, and T. Hua. 2015. "Onboard Type IV Compressed Hydrogen Storage System -Cost and Performance Status 2015," DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15013_onboard_storage_performance_cost.pdf, accessed 5 July 2016.

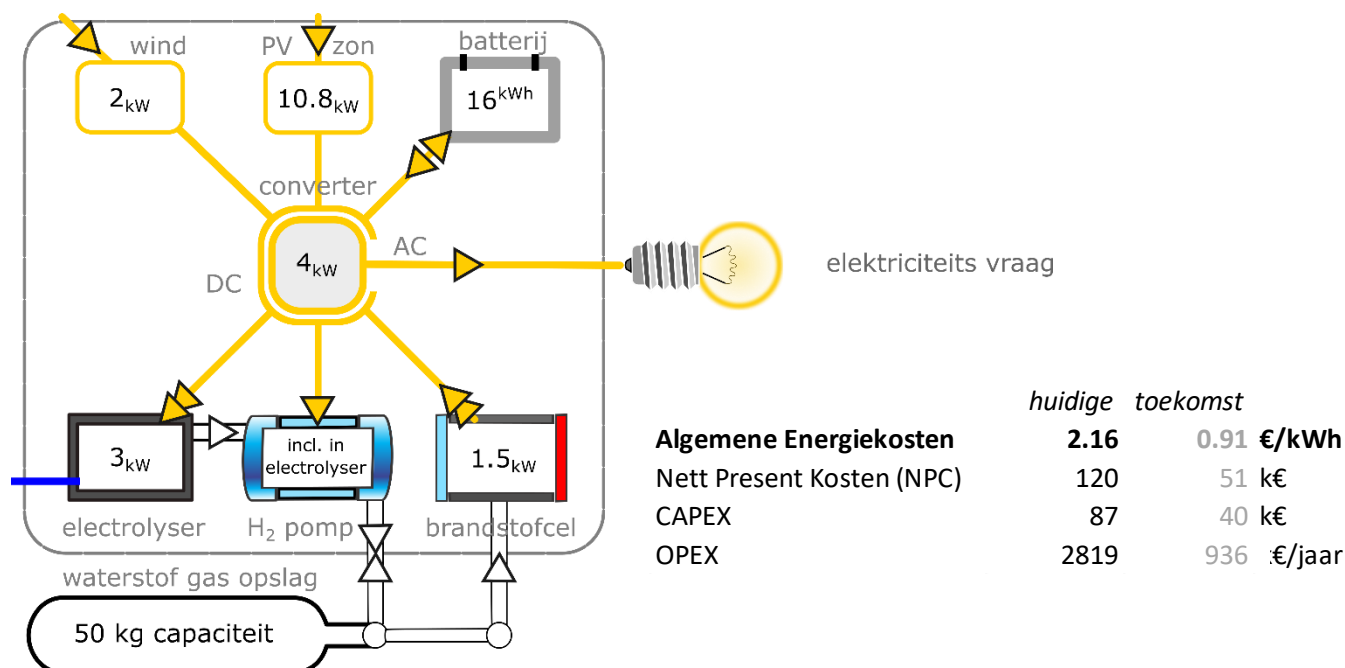
3.2 Base Case⁽⁻⁾: Energieopslagsysteem zonder ruimteverwarming en zonder mobiliteit

De Base Case⁽⁻⁾ (zie onderstaande tabel) beschrijft een autarkisch huishouden type twee-onder-één-kap, waarin er geen koppeling is gemaakt met de warmtevraag voor ruimteverwarming. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van houtkachel. Het systeem levert wel warm tapwater en er wordt voorzien in de (AC) elektriciteitsvraag. De totale energievraag is een sommatie van de (gemiddelde) elektriciteitsvraag over alle dagen van het jaar.

HOMER laat zien dat de investeringskosten voor deze variant het laagst zijn (NPC). Maar deze optie levert niet de meest voordelige energieprijs, doordat warmte niet wordt benut. Bovendien zijn dit niet alle kosten, omdat de genoemde voorbeeld houtkachel niet in HOMER is meegerekend en de kosten voor mobiliteit ook niet zijn toegevoegd. Bij hetzelfde gebruikerspatroon komen dus extra kosten.

Base Case ⁽⁻⁾	<i>huidige</i>	<i>toekomst</i>	
Energie Vraag (excl. H ₂)	4351		kWh/jaar
Wind-energie productie	1049	1049	kWh/jaar
Zonne-energie productie	9563	9554	kWh/jaar
Totaal productie	10612	10603	kWh/jaar

Modellering laat zien dat de volgende vermogens en energiecapaciteit van de componenten nodig zijn, waarmee rekening wordt gehouden met (in)efficiëntie van kleine windmolens.



Figuur 21: schaalgrootte van componenten in Base Case (-) zonder warmtekoppeling

De totale algemene energiekosten zijn in deze situatie berekend op 2.16 €/kWh, waarbij het kostenaandeel van de zonne-energie 0.132 €/kWh en van de windenergie 0.672 €/kWh is omdat dit een kleine windgenerator is met minder voordelige prestatie/kosten verhouding. De operationele kosten van het energieopslag systeem alleen is 1.356 €/kWh, als we de kosten voor de zon- en windenergie niet meenemen.

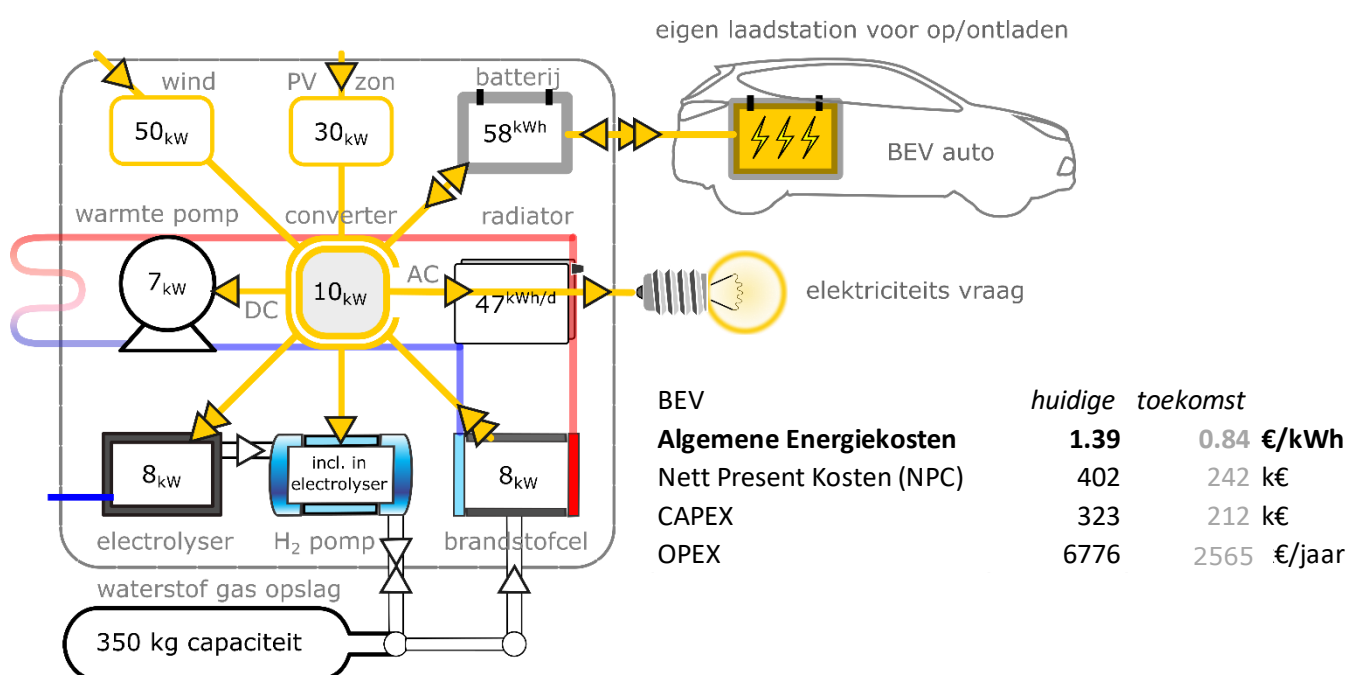
De tapwater-warmtevraag wordt geleverd door de brandstofcel (nu met een vermogen van 1.5 kW ipv 8 kW) met een totaal energie verbruik van 872 kWh op jaarbasis, oftewel 86% minder dan in de Base Case aangezien in dit scenario de ruimteverwarming buiten beschouwing is gelaten. De brandstofcel is per jaar slechts 584 uur operationeel, 25% minder dan in de Base Case situatie, en schakelt alleen in de winter in en dan bijna altijd op vol vermogen.

3.3 Base case⁽⁺⁾: Energieopslagsysteem met ruimteverwarming en mobiliteit

De Base Case⁽⁺⁾ situatie (zie onderstaande tabel) beschrijft een autarkisch huishouden type twee-onder-één-kap, waarbij de gegenereerde systeemwarmte wel wordt benut (warm water, huisverwarming, koken) en het systeem voorziet in een mobiliteitsbehoefte van 100 km per dag rijden en 's nachts opladen van één batterij-elektrisch voertuig (BEV). De totale energievraag is een sommatie van de (gemiddelde) elektriciteitsvraag, de (gemiddelde) warmtevraag en de dagelijkse mobiliteits-energievraag over alle dagen van het jaar. HOMER berekent de volgende capaciteiten:

Base Case ⁽⁺⁾	<i>huidige</i>	<i>toekomst</i>	
Energie Vraag (excl. H ₂)	25013		kWh/jaar
Wind-energie productie	49362	49362	kWh/jaar
Zonne-energie productie	26586	24084	kWh/jaar
Totaal productie	75948	73446	kWh/jaar

Modellering laat zien dat de volgende vermogens en energiecapaciteit van de componenten nodig zijn, waarmee rekening wordt gehouden met (in)efficiëntie van kleine windmolens.

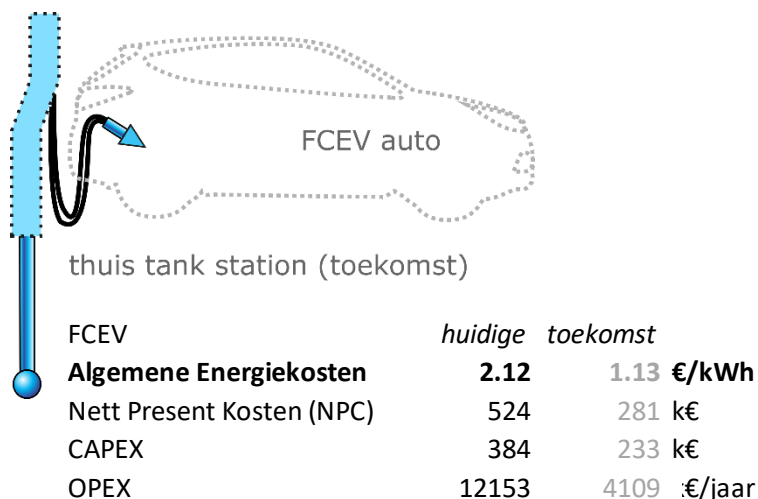


Figuur 22: schaalgrootte van componenten in Base Case (+) met warmtekoppeling en met mobiliteit

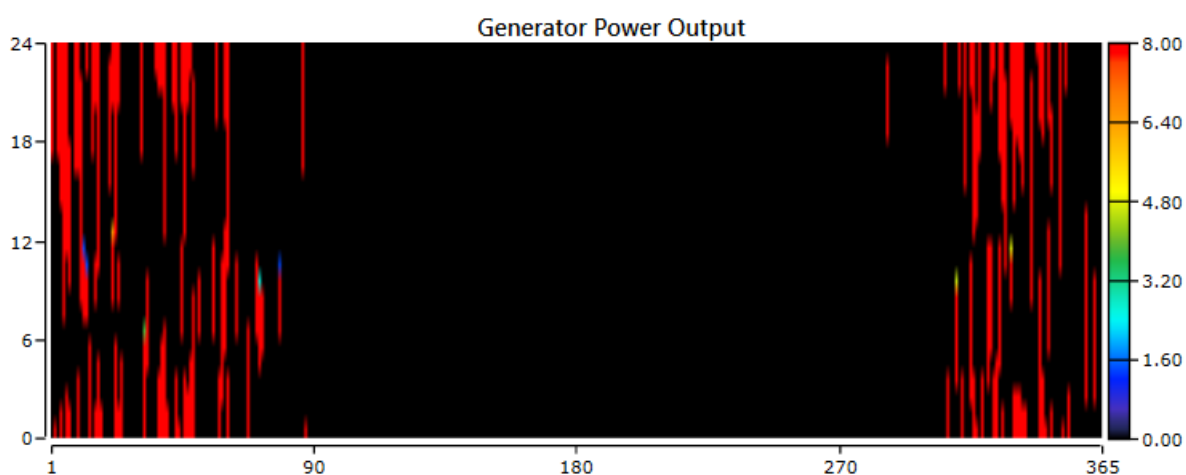
In vergelijking met de Base Case vraagt de koppeling met persoonlijke mobiliteit alleen om vergroting van het PV zonnepaneel oppervlakte van 24,4 naar 30 kW piekvermogen, en een grotere batterij-capaciteit van 37 naar 58 kWh (totale capaciteit kan verdeeld worden over huishouden en auto). Ter informatie, het batterijvermogen van de Nissan Leaf is 24 kWh, in een Tesla typisch 85 kWh.

De totale algemene energiekosten zijn in deze situatie berekend op 1.39 €/kWh, waarbij het kostenaandeel van de zonne-energie 0.116 €/kWh en van de windenergie 0.229 €/kWh is. De operationele kosten van het energieopslag systeem alleen zijn 1.045 €/kWh, als we de kosten voor de zon- en windenergie niet meenemen.

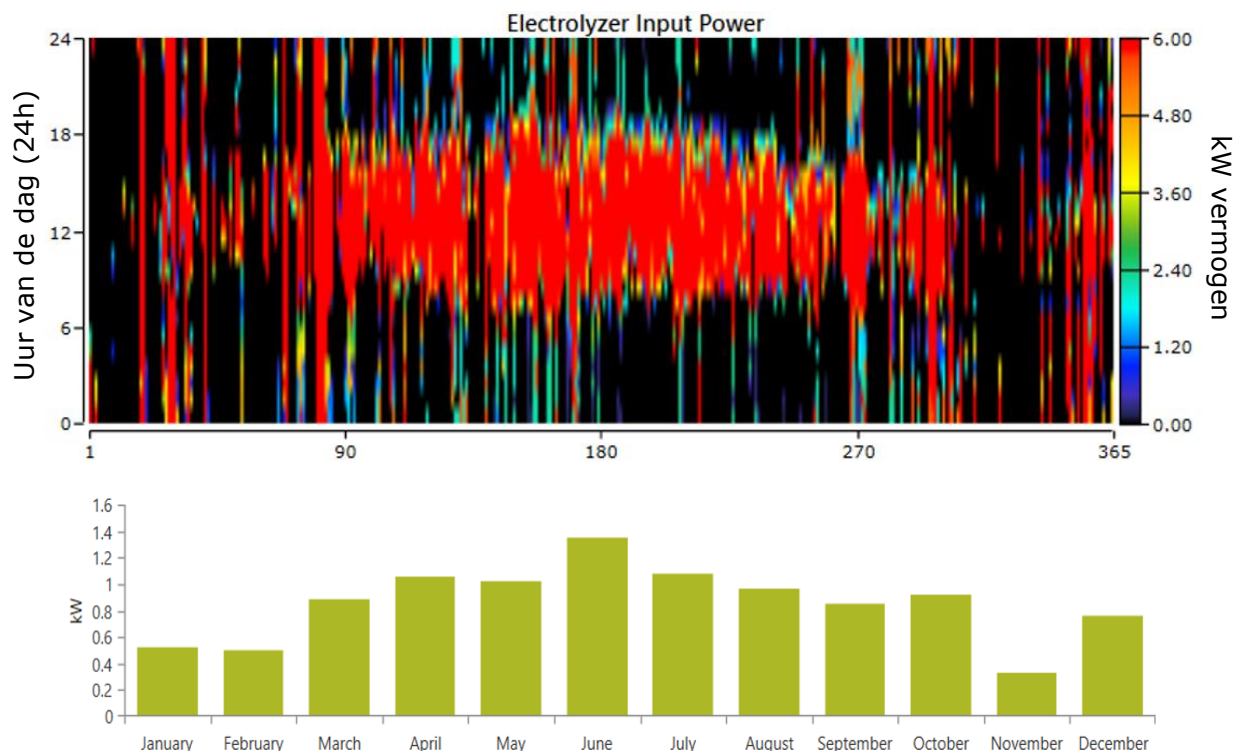
Wanneer vooruit gekeken wordt naar de situatie met een brandstofcelauto (FCEV) waarbij 1 kg/day waterstof wordt getankt, dan worden de energiekosten hoger door de lagere efficiëntie van de elektrolyse (omzetting elektriciteit naar waterstof) in vergelijking met de opslag in de batterij. Deze hoeveelheid waterstof (1kg/dag) hoeft niet extern te worden getankt tegen een kostprijs van ~10 €/kg, en deze bespaarde 3650 €/jaar moet worden verrekend als men vergelijkt met een uitgangssituatie waarin mobiliteit en brandstofkosten los staan van een autarktisch huishouden.



De tapwater-warmtevraag wordt geleverd door de brandstofcel met een totaal op jaarbasis van 5.85 MWh; dit is 35% van de totale warmtevraag voor verwarming. De brandstofcel is per jaar slechts 746 uur operationeel en schakelt dan bijna altijd in op vol vermogen (zie figuur 23), in het geval van de FCEV draait de brandstofcel 643 uur en is de warmteproductie totaal 5.05 MWh.

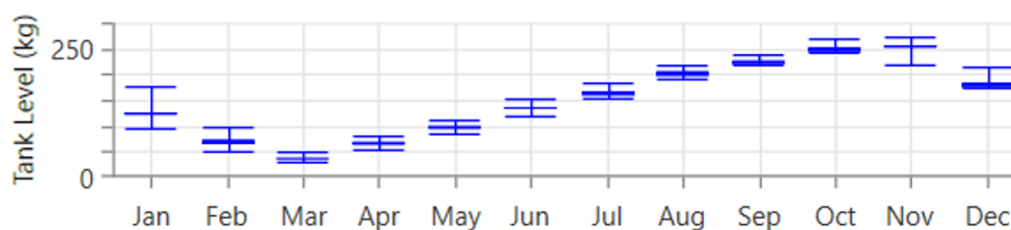


Figuur 23; Operationeel patroon en geleverd vermogen (kleur) van de brandstofcel is 's winters actief, gezien over de uren van de dag (y-as) en dagen in het jaar (x-as).



Figuur 24: Operationeel patroon en geleverd vermogen (kleur) van de elektrolyser gezien over de uren van de dag (y-as) en dagen in het jaar (x-as), met de grootste activiteit in de zomermaanden, zoals ook duidelijk zichtbaar in de staafgrafiek met verbruik per maand weergegeven.

De elektrolyser wordt juist overdag benut tijdens de zomerdagen, wanneer er overschot zonne-energie beschikbaar is om waterstof van te maken. Deze waterstof wordt eerst opgeslagen waardoor de voorraadbuffer toeneemt tot maximaal 350 kg om de winterperiode te kunnen overbruggen.



Figuur 25: Hoeveelheid waterstof opgeslagen in de buffer tank per maand.

4. Veiligheid

4.1 Algemene veiligheid

Waterstof is een gas met een lange historie als grondstof en reststroom in de procesindustrie. Qua veiligheid is er dan ook veel ervaring. Deze ervaring helpt bij het beoordelen van veiligheidsaspecten in de gebouwde omgeving. Er zijn speciale sites opgericht om deze informatie toegankelijk te maken ³³
³⁴.

De tabel in figuur 26 geeft een aantal veiligheid gerelateerde kentallen van waterstof. Om de veiligheid gerelateerde aspecten van waterstof in perspectief te zetten, zijn ook enkele andere bekende brandstoffen en energiedragers opgenomen in de tabel. Op basis van deze kentallen worden drie veiligheidsthema's besproken: toxiciteit, explosieveiligheid via ontbranding en explosieveiligheid bij hoge druk opslag.

	waterstof	methaan (aardgas uit leiding)	LPG	benzine (zuiver)	diesel (dieselolie)	LiFePO4 (lithium-ion accu)	methanol (mierzuur)
chemiekaart	C-0145	C-0151 en C-0166	C-0279	C-3206	C-0149		C-0029
zelfontbrandingstemperatuur [°C]	500	537-670	287-537	280-470	>225	thermal runaway bij 150	528
explosiegrenzen [volume% in lucht]	4-77	4.4-17	1.5-15	1.4-7.6	0.6-6.5		10-57
minimum ontstekingsenergie [mJ]	0.011	0.29	0.25	>0.6			
relatieve dichtheid (lucht = 1) (verzadigde damp)	0.07	0.6	1.7	1.15	1		1,02
CMR-effecten bij de mens	geen verdenking	geen verdenking	onvoldoende gegevens	niet waarschijnlijk	aanwijzingen kanker-verwekkend	bij thermal runaway ontwikkeling toxische gassen	geen verdenking
LevensBedreigendeWaarde (LBW) [mg/m3]	3300		26300	5000	200		500
LC50 inademing rat, ppmV in 4 uur	>20000	>20000	9600	5.6 mg/l	4.1 mg/l		7.85
grenswaarde (TGG 8 uur) [mg/m3]	niet vastgesteld	667 indicatief	1750	240	100		9
grenswaarde (TGG 15 minuten) [mg/m3]	niet vastgesteld		2180	480			
energiedichtheid [MJ/kg]	141.8	55.5	50	47.3		0.32	22

Bronnen:

Chemiekaarten, editie 32, chemiekaarten.nl, 2017

Bouwens et.al., BINAS, 6e editie, Noordhof, 2013

Brandveiligheid van elektrische bussen, Instituut Fysieke Veiligheid, 2016

batteryuniversity.com, 2017

Figuur 26: Enkele veiligheid gerelateerde kentallen van brandstoffen en energiedragers met kleurcode ter referentie aan onderstaande bronvermelding ³⁵ ³⁶ ³⁷ ³⁸

³³ <http://knowwhy.eu/course/fuel-cell-basics-hydrogen-safety/>

³⁴ <https://h2tools.org/>

³⁵ Chemiekaarten, editie 32, chemiekaarten.nl, 2017

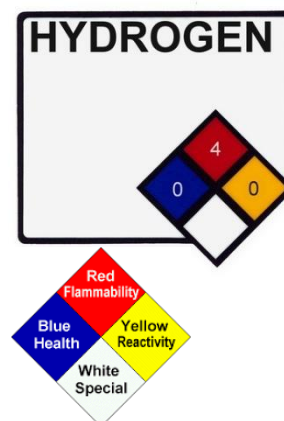
³⁶ Bouwens et.al., BINAS, 6e editie, Noordhof, 2013

³⁷ Brandveiligheid van elektrische bussen, Instituut Fysieke Veiligheid, 2016

³⁸ batteryuniversity.com, 2017

Toxiciteit

Uit figuur 26 blijkt dat er voor waterstof qua toxiciteit geen verdenking is. Volgens de Amerikaanse 'Nationale Fire Protection Agency' krijgt waterstof ook een rating van nul. Bij het ontsnappen van waterstof in een binnenruimte levert inademing geen vergiftigingsgevaar. Het eerst denkbare gezondheidsrisico bij grote hoeveelheden waterstof in een binnenruimte is verstikkingsgevaar door de verdringing van lucht en daarmee afwezigheid van de zuurstof; daarvoor moet er sprake zijn van meer dan 50% waterstof volume percentage in lucht.



Explosieveiligheid door ontbranding

Bij een waterstof-lucht mengsel van meer dan 4% waterstof (LEL-waarde) ontstaat een explosief mengsel. Dit is vergelijkbaar met aardgas. De energie die vrijkomt bij explosie is bij gelijke volume percentages echter *lager* dan bij aardgas, doordat de energiedichtheid per volume van een waterstof mengsel ook aanzienlijk lager is dan bij aardgas.

De energie nodig om een explosief waterstof-lucht mengsel te laten ontbranden is circa een factor 30 lager dan voor een aardgas-lucht mengsel of een benzinedamp-lucht mengsel. Er is dus weinig energie nodig om een explosief waterstof-lucht mengsel te laten ontbranden. Het omzetten van een lichtschakelaar genereert al een vonk die ontbranding kan veroorzaken. Om dit in verhouding te zetten: deze vonk is ook voldoende om een aardgas-lucht mengsel of een benzinedamp-lucht mengsel te laten ontbranden. Het voorkomen van een explosief mengsel heeft dan ook de hoogste prioriteit.

Explosieveiligheid bij hoge druk

Hoewel waterstof een zeer hoge energiedichtheid per eenheid gewicht heeft, heeft het juist een zeer lage energiedichtheid per eenheid volume. Daardoor zal waterstof als gas altijd onder druk worden opgeslagen om tot voldoende energieopslag voor een toepassing te komen.

Bovenstaande valt te vertalen naar de schaal van het Archypel project. We gaan uit van waterstof opgeslagen in tanks van 20 kg onder maximaal 700 bar, gestald in een binnenruimte van minimaal 6 x 4 x 2,5 meter (garage, 60 m³). Een momentane rupture van één tank van 20kg levert dan een instantane drukverhoging in de ruimte van 4,7x en een momentane druk op de wanden van 3700 kg/cm². Dit is te groot voor standaardwanden. Het is af te raden om grote hoeveelheden waterstof in een woning onder hoge druk op te slaan zonder extra maatregelen. Deze maatregelen zullen een combinatie moeten zijn van installatietechnische maatregelen, zoals het verdelen van de waterstof over meerdere kleinere tanks van een type dat bij perforatie niet direct volledig openbarst, en van bouwkundige maatregelen zoals het opstellen van de opslagtanks in een ruimte met drukontlasting, bijvoorbeeld door (een deel van) het dak als zwakste schakel te ontwerpen en mogelijk opgebouwde druk snel een weg naar buiten het gebouw vindt.

4.2 Veiligheid waterstof in de gebouwde omgeving

Net zoals bij alle brandstoffen en energiedragers is het gebruik van waterstof niet intrinsiek veilig. Er zijn maatregelen nodig om tot een voldoende laag risiconiveau in de gebouwde omgeving te komen.

Een belangrijk aspect daarvan is dat de gebruiker gewend is aan het gebruik van waterstof, of daarvoor wordt opgeleid. Dit is vergelijkbaar met het gebruik van aardgas in Nederlandse huishoudens. De gemiddelde Nederlander ervaart dit niet als potentieel onveilig, omdat hij als kind al geleerd heeft veilig met aardgas om te gaan. Zo zal het gebruik van een nieuwe brandstof of energiedrager als waterstof ook zijn plek moeten vinden in de 'veiligheidsgenen' van de gebruikers.

Aan de kennisopbouw van de technische veiligheidskant van het gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving heeft het Leeds City Gate project veel bijgedragen ³⁹. In dit project is daadwerkelijk waterstof gedistribueerd in een stadswijk en is gekeken naar de consequenties voor leidingen, het effect van lekkages in huis etc. Hieronder zijn de belangrijkste constatering samengevat uit dit project en gecombineerd met NEN bevindingen⁴⁰ gerelateerd aan veiligheid van waterstof binnenshuis:

- Gezien de historie van het gebruik van aardgas met zijn oorsprong in stadsgas dat al een significante hoeveelheid waterstof bevatte, liggen huisinstallaties technisch gezien dicht bij het gebruik in combinatie met waterstof.
- Huisinstallaties geschikt voor waterstof zijn verkrijgbaar op de markt hoewel de aantallen die worden omgezet nu zeer klein zijn. Het betreft 'boilers', 'cookers' en 'heaters'. Bij 'gas fires' ligt dit wat anders omdat de markt voor gashaarden vooral esthetisch gedreven is: sfeervuur met een mooie gele vlam door onvolledige verbranding. Deze sfeerfunctie ombouwen naar waterstof is nog niet beschikbaar.
- Het ombouwen van een de huisinstallatie van aardgas naar waterstof kost circa £1200 (€1050) per huishouden.
- PE zoals gebruikt wordt als leidingmateriaal voor aardgas is geschikt als leidingmateriaal voor waterstof distributie.
- Waterstoflekage in een woning geeft het risico voor ophoping tot boven het LEL -niveau. Doordat waterstof zoveel lichter is dan lucht, zijn anders dan bij aardgas, verhoogde concentraties bij lekkages het eerst onder de kap geconstateerd. Een maatregel hiertegen is ervoor zorgen dat waterstof onder de kap/pannen kan ontsnappen naar de buitenlucht.

4.3 Installatie specifieke veiligheid

Het totale Archipel systeem bestaat uit een aantal componenten die samengebouwd zijn tot een totaal energiesysteem:

1. Waterstofopslag
2. Electrolyser en compressor voor waterstofproductie en transport richting opslag
3. Brandstofcelsysteem voor de omzetting van waterstof in elektriciteit en warmte
4. Inverter en netkoppeling voor het leveren van elektriciteit aan de huisinstallatie en eventueel het elektriciteitsnet
5. Optioneel: laadpunt voor de auto

³⁹ Leeds City Gate h21 project, Leeds City Gate, 2016, www.northerngasnetworks.co.uk/wp-content/uploads/2016/07/H21-Report-Interactive-PDF-July-2016.pdf

⁴⁰ Bevindingen NEN verkenningcommissie Veiligheidsaspecten gebruik waterstof in binnenruimten, NEN, 2016

Voor een veilig ontwerp en gebruik van een dergelijk systeem moet op verschillende niveaus naar de veiligheid gekeken worden. Zowel de individuele componenten als ook het gehele systeem moet veilig functioneren en door de interactie van de verschillende deelsystemen mag er geen onveilige situatie ontstaan.

Op systeem niveau is CE certificering en markering verplicht. Vanuit de eisen die gesteld worden aan CE markering zijn een aantal richtlijnen relevant voor het ontwerp, productie en gebruik van het Archipel systeem:

- ATEX richtlijn 2014/34/EU: De ATEX richtlijn omvat de eisen voor apparatuur en veiligheidssystemen in potentieel explosiegevaarlijke omgeving.
- PED richtlijn 2014/68/EU: De PED richtlijn omvat de standaarden voor ontwerp en productie van drukapparatuur, zoals opslagtanks, leidingwerk e.d.
- EMC richtlijn 2014/30/EU: De EMC richtlijn omvat de eisen aan elektronica en elektrische apparaten die zouden kunnen storen of verstoord kunnen worden door elektromagnetische interferentie
- laagspanningsrichtlijn 2014/35/EU: De laagspanningsrichtlijn beschrijft de eisen aan elektrische apparatuur met een gelijkspanning tussen 50 en 1000 Volt en/of een wisselspanning tussen 75 en 1500 Volt.
- machine richtlijn 2006/42/EC: De machinerichtlijn omvat de veiligheids- en gezondheidseisen aan apparatuur en veiligheidscomponenten.

Op de website: www.fuelcellstandards.com⁴¹ wordt een actueel overzicht gegeven van de voor waterstof en brandstofcel toepassingen relevante eisen en standaarden.

Voor Archipel zijn – onder andere - de volgende standaarden van toepassing:

- IEC 62282-2 Fuel cell modules
- IEC 62282-3-100 Stationary Fuel Cell Systems - Safety
- IEC 62282-3-400 Stationary fuel cell power systems - Small stationary fuel cell power system with combined heat and power output
- IEC 22734-2 Hydrogen generators using water electrolysis process – part 2: Residential applications
- ISO/CD 19884 (under development) –gaseous hydrogen – cylinders and tubes for stationary storage
- ISO 26142:2010 – hydrogen detection apparatus – stationary applications

Bovenstaande standaarden beschrijven alle delen van het Archipel systeem, met uitzondering van de kwantitatieve eisen die gesteld worden aan de opslag van waterstof. PGS-15 richtlijnen ⁴² geven wellicht een goede indicatie welke maatregelen getroffen dienen te worden bij welke hoeveelheden waterstof, echter deze normen beschrijven de eisen voor de opslag van flessen bedoeld voor transport van gasen en niet die voor gasopslag in een vaste opstelling.

Het voorgestelde Archipel systeem is zo nieuw voor toepassing in huishoudens, dat er nog geen volledige regelgeving bestaat. Betrokken partijen werken nu actief samen om de bestaande regelgeving aan te passen, en waar nodig toevoeging te schrijven voor specifieke toepassingen.

⁴¹ www.fuelcellstandards.com

⁴² <https://www.infomil.nl/onderwerpen/hinder-gezondheid/veiligheid/pgs/handleiding-pgs-15/>

5. Marktvraag

Voor het in kaart brengen van de potentiële marktvraag is de positie van het Archypel energieopslagsysteem ten opzichte van de huidige alternatieven bepaald met behulp van de zogenaamde 'value curving' methode⁴³. Deze beproefde methode, die is ontwikkeld op de INSEAD business school, maakt het mogelijk om in een diagram een vergelijking tussen verschillende producten in hetzelfde marktsegment visueel inzichtelijk te maken. Dit wordt gedaan door elk product te waarderen op een schaal van één tot vijf voor verschillende waarde-elementen die belangrijk zijn voor een specifieke markt. Op basis hiervan kunnen voor nieuwe producten, zoals voor het Archypel energieopslagsysteem, de sterktes en zwaktes ten opzichte van bestaande producten inzichtelijk worden gemaakt en worden geëvalueerd. De uitkomst hiervan bepaalt de relevantie en de mate waarin het product interessant kan zijn voor potentiële klanten. Dit bepaalt dus hoe het product gepositioneerd moet worden en welke waarde-elementen verder ontwikkeld moeten worden.

Toepassing van de 'value curving' methode op de Archypel systemen/scenario's is gedaan door middel van workshops met en het vragen van input en feedback aan alle bij Archypel betrokken partijen.

Belangrijke onderdelen daarbij zijn:

- In kaart brengen van de waarde-elementen voor de zelfstandige energievoorziening in een woning en het aanbrengen van prioriteiten daarin.
- Bepalen van de Archypel technologiescenario's en de referentieconfiguraties
- Waarderen van de waarde-elementen op een schaal van 1-5 voor elke configuratie/scenario, waarbij 5 de maximale of hoogste en 1 de minimale of laagste score is.

De volgende waarde-elementen, in volgorde van prioriteit, zijn gebruikt bij de value curving:

- Beschikbaarheid (van vermogen voor elektra/warmte/mobiliteit, seizoenonafhankelijk)
- Prijs en TCO (total cost of ownership)
- Comfort (bediengemak, direct beschikbaar, geen gedragsaanpassing nodig)
- Betrouwbaarheid (levensduur, onderhoud, energievoorraad beschikbaar, redundantieredundantie)
- Duurzaamheid (inclusief milieueffect van gebruikte materialen, uitstoot van CO₂)
- Compatibiliteit (retrofit mogelijk, lage installatie meerkosten)
- Onafhankelijkheid (autonome energievoorziening, zelfcontrole, geen netwerkkosten)
- Veiligheid (zowel feitelijk als perceptie)
- Imago (innovatieve, hippe uitstraling en zichtbaarheid)
- Dimensies (grondoppervlak en volume)
- Gezondheid (milieu binnenshuis, geluid)
- Emotie (emotionele beleving)
- TRL (Technology Readiness Level)

De volgende scenario's of systemen zijn bij de analyse beschouwd. Drie Archypel Base Cases:

- Base Case: H₂/FC/batterij/ruimteverwarming/tapwater
- Base Case⁽⁻⁾: Idem – verwarming (kleinste systeem) via warmtepomp met verwarming door houtkachel
- Base Case⁽⁺⁾: Idem + mobiliteit (EV)

⁴³ W. Chan Kim and R. Mauborgne, Harvard Business Review, January 1997 entitled "Value Innovation: The Strategic Logic of High Growth"

Drie referentie cases

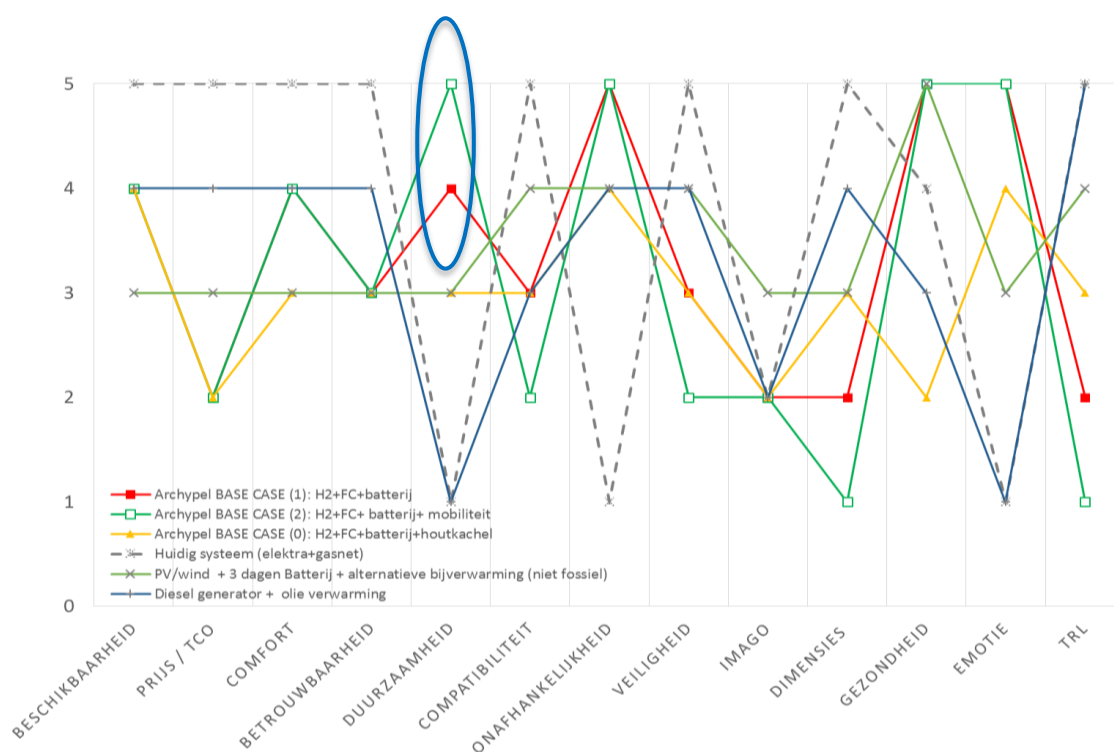
- Huidig systeem: Aansluiting op elektra- en gasnet
- PV/wind + batterij en bijverwarming (niet fossiel)
- Diesel generator + fossiele verwarming (olie)

De Archipel systemen/scenario's zijn gelijk aan die in hoofdstuk 3 zijn beschreven. Om Base Case⁽⁻⁾ gelijk te schakelen aan de andere systemen is gekozen voor verwarming middels een niet-fossiele energiebron, zoals een houtkachel. Bij de keuze voor de referentiesystemen is gekeken naar de meest voorkomende huidige systemen. Voor de meeste huizen is het huidige systeem een aansluiting op het gas/elektra-net. Als meer duurzame variant is gekozen voor een huis met duurzame opwekking middels PV of wind met batterijopslag en in combinatie met een niet-fossiele bijverwarming. Daarnaast is de fossiele autarkische variant met dieselgenerator en olieverwarming beschouwd.

In onderstaande tabel worden de belangrijkste kenmerken per systeem samengevat.

	Archipel (H2+FC+batterij) BASE CASE (1)	Archipel (H2+FC+ batterij+ mobiliteit) BASE CASE (2)	Archipel (H2+FC+batterij+ houtkachel) BASE CASE (0)	Huidig systeem (elektra+gasnet)	PV/wind + 3 dagen Batterij + alternatieve bijverwarming (niet fossiel)	Diesel generator + olie verwarming
Eigen elektriciteits- opwekking (PV/wind)	Ja (deels)	Ja (deels)	Ja (deels)	Nee	Ja (deels)	Ja
Autonoom voor elektriciteit	Ja (deels)	Ja (deels)	Ja (deels)	Nee	Ja (deels)	Ja
Autonoom voor verwarming	Ja (deels)	Ja (deels)	Ja (deels)	Nee	Deels	Nee
Autonoom voor mobiliteit	Nee	Deels	Nee	Nee	Nee	Nee

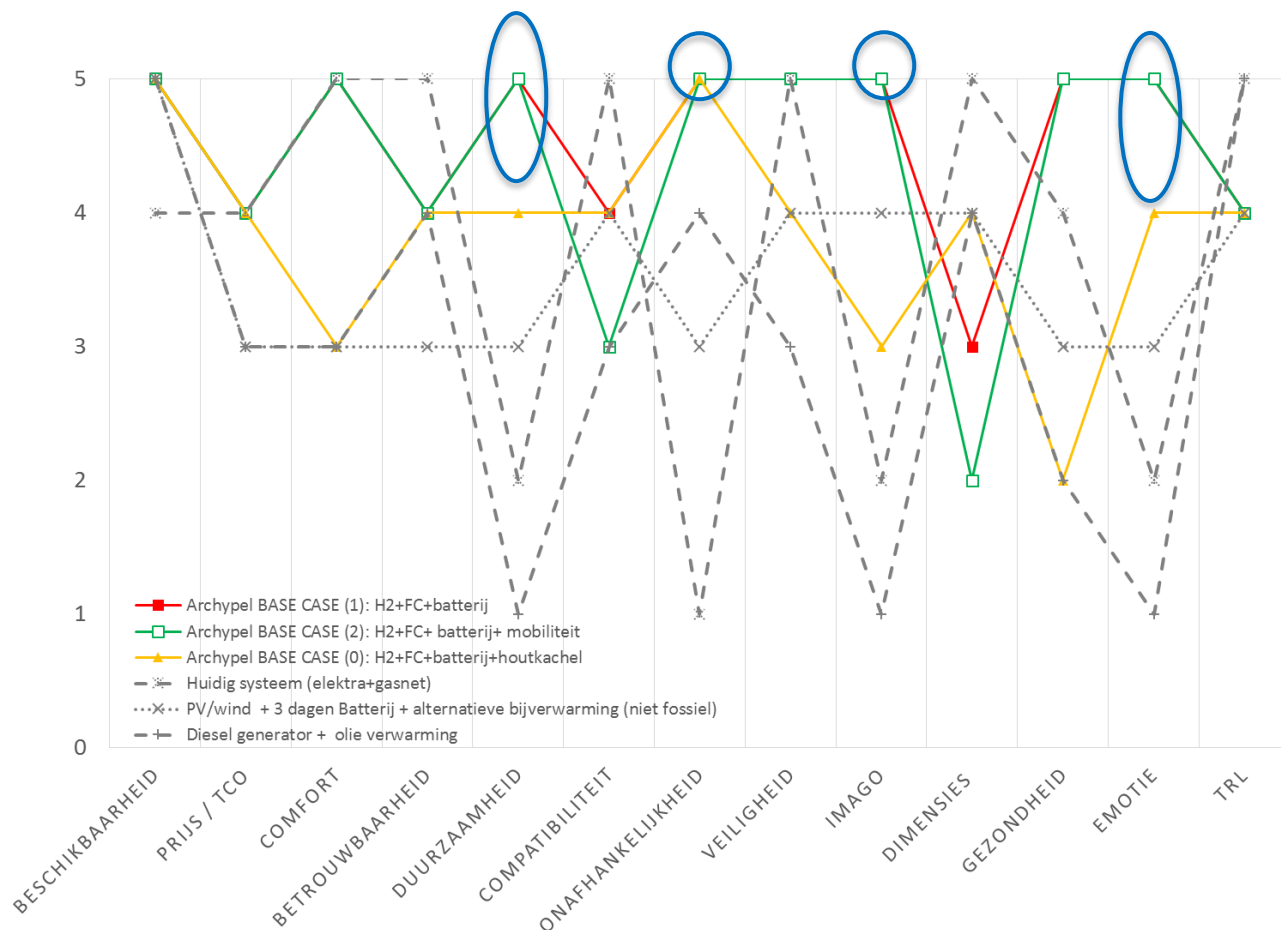
Figuur 27 value curve 'as is'





ISPT

Institute for Sustainable
Process Technology



Figuur 28: Value curve 'to be', over 5 jaar bij productie van >5000 stuks per jaar

De resultaten van de value curving zijn bepaald op basis van de huidige situatie 'as is' (figuur 27), en op een tijdshorizon van circa 5 jaar en een productieniveau van 5.000.000 per jaar 'to be' (Figuur 28). Het blijkt dat de sterke punten van de Archypel-systemen liggen op het gebied van duurzaamheid, onafhankelijkheid, imago en emotie. Belangrijke tekortkomingen ten opzichte van bestaande systemen zijn onder andere prijs en dimensies.

Op basis van de value curving analyse kan geconcludeerd worden dat de Archypel-systemen relevant en potentieel interessant zijn voor een beperkte doelgroep van huiseigenaren in Nederland met voldoende ruimte en financiële middelen, die onafhankelijkheid, duurzaamheid, imago en emotie belangrijk vinden. Met name de kleinste variant met houtkachel omdat die de laagste investering vraagt. In afgelegen gebieden (in het buitenland) kan het mogelijk wel aantrekkelijk zijn vanwege het voorkomen investeringen in elektriciteitskabels naar de locatie.

De marktvraag voor Archypel-systemen zal nagenoeg nihil zijn voor retrofit in bestaande kleinere woningen vanwege de dimensies en hoge Total Cost of Ownership (TCO). In hoofdstuk 6 wordt verder ingegaan op de business case.

6. Business cases

Evaluatie van de scenario's laat zien dat de Archypel systemen voor kleinschalige energieopslag in de vorm van waterstof specifieke sterktes en zwaktes kennen, die van groot belang zijn bij het ontwikkelen van business cases. Relevante aspecten voor een volledig autarkische woning zijn:

- **Dimensies:** Voor volledige jaarrond onafhankelijke energievoorziening gaan de dimensies van een Archypel-systeem de inpassing in bestaande twee-onder-een-kapwoning ver te boven. Alleen al de benodigde waterstofopslagcapaciteit voor gecomprimeerde opslag neemt circa 10 m³ in beslag. Het gehele systeem is groter. Ook de lokale opwekking van duurzame elektriciteit met wind/PV vraagt meer ruimte dan de gemiddelde (stads)woning beschikbaar heeft. Toepassing lijkt met name interessant voor (vrijstaande) woningen met meer ruimte.
- **Kosten:** De kosten voor een Archypel-systeem zijn significant. Inclusief verwarming en eventueel elektrische auto overschrijdt de investering, zelfs naar toekomstige verwachting 200 k€. Ook de operationele kosten zijn nog hoog met een geschatte jaarlijkse OPEX van meer dan 6.000 € per jaar, maar deze zullen in 2030 naar verwachting dalen naar 0 – 2.000 € per jaar. Als verwarming via bijvoorbeeld een houtkachel plaatsvindt is de CAPEX met 40.000 € al een stuk toegankelijker.
- **Duurzaamheid, onafhankelijkheid, imago en emotie:** Het Archypel-systeem scoort in vergelijking met bestaande systemen op deze punten hoog en is naar verwachting voornamelijk interessant voor een selecte groep die deze kernwaarden omarmt en de financiële middelen heeft.

Gezien de hoge kosten van de Base Case en van de Base Case⁽⁺⁾ wordt verwacht dat Base Case⁽⁻⁾ de meeste potentie heeft als business case. Zonder volledige autonomie (verwarming) is het Base Case⁽⁻⁾ systeem met een geschatte CAPEX van €87.000 (huidig) en €40.000 (toekomst) interessanter geprijsd. Ook de OPEX is maar één derde van het volledige systeem. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat ruimteverwarming door middel van een houtkachel niet is meegenomen (extra OPEX wordt geschat op circa €450 per jaar).

Toepassing van een Base Case⁽⁻⁾ systeem zal naar verwachting gericht zijn op vrijstaande woningen omdat deze voldoende ruimte kunnen bieden voor zowel de opwekking als opslag van de waterstof. Volgens het CBS⁴⁴ waren in 2012 van de ruim zeven miljoen woningen in Nederland waarvan één miljoen vrijstaand. Hiervan zal maar een klein aantal eigenaren voldoende vermogend zijn en onafhankelijkheid, duurzaamheid, imago en emotie dermate belangrijk vinden dat zij als potentiële afnemers van een Archypel-systeem kunnen worden gezien.

Ook kan het systeem een oplossing bieden voor vakantiewoningen en is een alternatief voor batterijopslag ter overbrugging van langere perioden (langer dan enkele weken). Met name in het buitenland zijn veel vakantiewoningen nu niet op het elektriciteitsnetwerk aangesloten en is er vraag naar een duurzame energievoorziening als alternatief voor inzet van dieselgeneratoren.

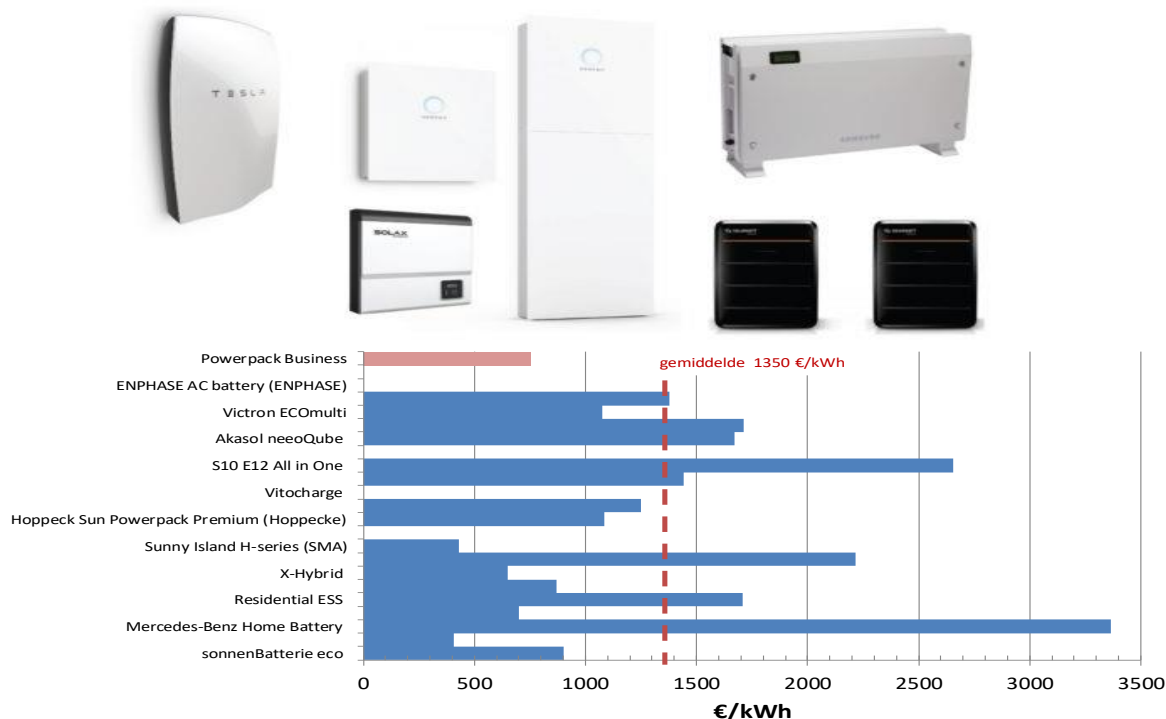
Een voorzichtige inschatting is dat er een marktvraag zal zijn voor circa 5.000 systemen per jaar op de middellange termijn in Nederland. Een voorbeeld van het feit dat een dergelijke markt bestaat is een recent artikel in de Volkskrant van 10 mei 2017 genaamd 'Met een warmtepomp de winter door'⁴⁵, waarin voorbeelden worden gegeven van early-adopters, die tienduizenden euro's investeerden in een duurzaam warmtepompsysteem. De aanschafkosten voor een Archypel systeem liggen nu nog fors

⁴⁴ <http://statline.cbs.nl>

⁴⁵ <http://www.volkskrant.nl/economie/de-toekomst-met-een-duurzame-warmtepomp-de-winter-door~a4493541/>

hoger, en om die reden zou een programma gericht op kostenverlaging de commerciële kansen vergroten. De verwachte toekomstige prijs van een Base Case⁽⁻⁾ systeem van €40.000 komt hierbij in de buurt. Verdere optimalisatie en mogelijk kleinschaliger waterstofopslag (bijvoorbeeld 10 kg) kan het systeem aantrekkelijk maken voor huiseigenaren die een batterijpakketten als opslag overwegen. Zeker indien het mogelijk is een Base Case⁽⁻⁾ systeem aan te bieden voor circa €10.000, wat vergelijkbaar is met de installatie van een 5 kWh batterijpakket, zie hieronder. Een kleinere waterstofopslagcapaciteit van ca. 10 kg (200 kWh⁴⁶) leidt weliswaar niet tot volledige autonomie, maar biedt in veel gevallen voldoende buffer (3-4 weken), indien de mogelijkheid bestaat van externe bronnen waterstof te betrekken, bijvoorbeeld van een waterstofauto kan deze periode nog langer zijn.

Commerciële batterijpakketten zijn beschikbaar om thuis zonne-energie op te slaan en de dag-nachtperiode te overbruggen. Deze systemen zijn weergegeven in figuur 29 en hebben een vermogen van ~5 kWh en een typische kostprijs van 1.350 €/kWh⁴⁷. Deze kosten zijn exclusief installatie en er zijn geen bepalingen bekend wat er gebeurt bij einde levensduur van de batterij.



Figuur 29: opslagsystemen op basis van batterijen - aanvullende informatie is te vinden in het afstudeerverslag van Rogier den Balvert, getiteld 'Studie naar de toekomstige business case voor een autonoom energiesysteem met opslag in waterstof' van 6 juni 2017. (Balvert, 2017)

Concluderend is de verwachting dat met name de kleinere systemen met alleen elektriciteit en warmwatervoorziening (en verwarming via bijvoorbeeld een houtkachel) een hele interessante markt kan zijn. Advies is om dit in een demonstratieproject verder te onderzoeken. Hierbij zou naast Nederland ook uitdrukkelijk het marktpotentieel in de heel Europa meegenomen moeten worden. Daarnaast zal de haalbaarheid van een Archipel systeem naar verwachting ook sterk verbeteren indien meerdere woningen, bijvoorbeeld op wijkniveau, worden gekoppeld aan centrale opwek- en opslag.

⁴⁶ Uitgaande van een lagere verbrandingswaarde van 33.33 kWh/kg-H₂ en 60% efficiency in de conversie naar elektriciteit

⁴⁷ : <https://cleantechnica.com/2016/11/23/introducing-cleantechnicas-new-home-battery-overview-age/>

7. Systeemwaarde

De combinatie van de energievoorziening in een huishouden en 100 km emissievrij rijden per dag, vraagt om tamelijk grote hoeveelheden duurzame energieopwekking. In de bestaande centraal-aangesloten, *niet*-autarkische situatie wordt verwacht dat er congestie ontstaat, wanneer deze energie allemaal via het elektriciteitsnetwerk wordt getransporteerd, waardoor netverzwaring noodzakelijk is.

Eén belangrijke oorzaak is de piekbelasting die ontstaat omdat de duurzame energie op een ander moment opgewekt wordt dan dat het wordt verbruikt. De netverzwaring die nodig is wordt bekostigd door de netbeheerder maar uiteindelijk doorberekend naar de burger. Lokale opslag van energie in huis (zoals bij Archypel het geval is) kan besparen op netverzwaring, of de noodzakelijkheid zelfs geheel voorkomen.

Om te onderzoeken wat er bespaard wordt doordat er geen verzwaring noodzakelijk is, is er gekeken naar verschillende bronnen die hier onderzoek naar hebben gedaan. Deze bronnen geven aan dat de kosten per huishouden voor netverzwaring sterk afhankelijk zijn van de situatie (zoals de locatie van de woning en kwaliteit van het reeds aanwezige net). Aangezien Archypel een haalbaarheidsstudie is, is er gerekend met gemiddelde kosten op basis van verschillende onderzoeken. In figuur 30 zijn de resultaten weergegeven. Uit deze gegevens blijkt een variabele inschatting tussen de €375 en €5570/huishouden. Deze getallen lopen nogal uiteen, omdat er met verschillende scenario's is gerekend. Er kan wel geconcludeerd worden dat de business case voor aanleg van een "Archypel-installatie" niet geheel bekostigd kan worden uit de besparing op netverzwaring.

Document	Kosten
1) Netbeheerkosten	€5570/huishouden
2) Netbeheer Nederland, energie in beweging, net voor de toekomst, 2011	€5325/huishouden
3) Liander, Flexpotentieel/ Waarde Vraagverschuiving (Jan van Oorschot)	€1500/huishouden
4) Ecofys	Minimaal €1750/huishouden
5) Stroomversnelling	€2575/huishouden
6) Flexnet	€375/huishouden
Gemiddeld	€2850/huishouden in 25 jaar

Figuur 30: Resultaten genoemd in verschillende openbare bronnen

In Figuur 31 wordt de vergelijking gemaakt tussen de huidige bestaande aansluit/energie kosten van een woning met de energieprijzen die betaald zou worden in het geval van de drie 'base-case' situaties. Let op dat hier CAPEX/installatie kosten volledig buiten beschouwing zijn gelaten, evenals de beperkingen in functionaliteit met betrekking tot warmtebenutting en mobiliteit. Deze getallen laten zien dat bij een bestaande installatie in 2017: 3x...4x meer, en in jaar 2030: 1.5x...2x meer, moet worden betaald voor gebruikte energie (OPEX) in geval van volledige onafhankelijkheid. Logischerwijs, is er historisch altijd gekozen voor een centrale energieoplossing, mits de situatie het toelaat.

2017	kosten huidig			Base case		Base Case ⁽⁻⁾		Base case ⁽⁺⁾	
	verbruik	prijs	kosten	prijs	kosten	prijs	kosten	prijs	kosten
	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[€/kWh]	[€]	[€/kWh]	[€]	[€/kWh]	[€]
gas	1600	0.64	1024						
elektra	4400	0.2	880	1.53	6732	2.16	9504	1.39	6116
capaciteitstarief gas		277	277						
capaciteitstarief elektra		237	237						
kosten aansluiting nieuw gas *		813							
kosten aansluiting nieuw elektra *		768							
Totaal per jaar			2418		6732		9504		6116
* Maximal 25m eter									
2030	kosten huidig			Base case		Base Case ⁽⁻⁾		Base case ⁽⁺⁾	
	verbruik	prijs	kosten	prijs	kosten	prijs	kosten	prijs	kosten
	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[€/kWh]	[€]	[€/kWh]	[€]	[€/kWh]	[€]
gas	1600	0.64	1024						
elektra	4400	0.2	880	0.93	4092	0.91	4004	0.84	3696
capaciteitstarief gas		277	277						
capaciteitstarief elektra		237	237						
kosten aansluiting nieuw gas *		813							
kosten aansluiting nieuw elektra *		768							
Totaal per jaar			2418		4092		4004		3696

Figuur 31: Overzicht van de energiekosten per jaar voor de verschillende business cases in vergelijking met huidige niet-autarkische woningsituatie

De verwachting is dat met name de kleinere systemen met alleen elektriciteit, warmwatervoorziening en een energie-opslag voor enkele weken (en verwarming via bijvoorbeeld een houtkachel) een hele interessante markt kan zijn bij tijdelijke bewoning, met name voor vakantiewoningen.

Bezien vanuit de systeemwaarde zijn er een aantal redenen om een Archipel systeem te ontwikkelen voor meerdere huishoudens:

- De kosten kunnen over meerdere huishoudens verdeeld worden
 - Meerdere gebruikers komt de stabiliteit van het interne (micro)grid ten goede.
- Een centraal systeem kan makkelijker professioneel bediend en onderhouden worden, hetgeen voor een (complex) Archipel systeem voornamelijk noodzakelijk is. Huishoudens kunnen in die situatie per afgenomen kWh en liter warm water 'service kosten' afrekenen.

8. Conclusies en vervolgstappen

8.1 Conclusies

Aan de hand van de Archypel studie kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

1. De componenten nodig voor een kleinschalig energieopslagsysteem met waterstof zijn of commercieel of als prototype beschikbaar. Een Archypel systeem dat jaarrond voorziet in de energievraag van een twee-onder-een-kapwoning wordt technisch mogelijk geacht.
2. Een 100% autarkisch twee-onder-een-kapwoning die jaarrond alle energie zelf opwekt en opslaat in Nederland acht het projectteam vooralsnog als (te) ambitieus. Het koppelen van meerdere woningen aan centrale opwek en opslag is beter realiseerbaar.
3. Een Archypel systeem dat is opgebouwd uit componenten die op dit moment beschikbaar zijn op de markt is momenteel nog erg kostbaar.
 - a. De door Homer berekende kosten voor een Archypel systeem zijn op korte termijn met €0,84 tot €2,16/kWh aanzienlijk hoger dan de huidige elektriciteitsprijzen, deze liggen rond de €0,22/kWh.
 - b. De energiekosten van het Archypel systeem op langere termijn (richting 2030) mede op basis van een verwachte kostendaling komen in de buurt van de dan verwachte energiekosten.
 - c. De kosten voor netverzwaring door de Netbeheerders zijn aanzienlijk lager dan de door Homer berekende investeringskosten (CAPEX) voor het Archypel systeem en dragen daarmee maar in beperkte mate bij aan een positieve business case.
 - d. Componenten zijn nu alleen beschikbaar in kleine serie of als prototype en inherent tegen hoge kosten. Door massaproductie kan de prijs per kWh drastisch dalen.
 - e. Verdere kostenbesparing én volumeverkleining (dimensies) kan worden bereikt door een Archypel systeem te ontwerpen waarbij alle componenten geïntegreerd worden ontworpen, inclusief de besturing. Dat vraagt om een apart, doelgericht ontwikkeltraject.
4. De fysieke ruimte die het Archypel systeem nodig heeft voor de opwekking van alle elektriciteit en voor de productie en opslag van waterstof is te groot voor de modelwoning.
 - a. Er is volgens de modelberekeningen van Homer veel meer ruimte nodig voor zonnepanelen en windmolen(s) dan een reguliere twee-onder-een-kapwoning beschikbaar heeft. Bovendien zal in de gebouwde omgeving een windturbine veel discussie oproepen.
 - b. De opslagruimte die het Archypel systeem alleen al nodig heeft voor de opslag van waterstof, ongeveer 10 m³ in de basecase, resulteert in een systeem dat te groot is voor de gemodelleerde woning.
 - c. De base case⁽⁻⁾ waarbij het Archypel systeem niet wordt ingezet voor verwarming van de woning heeft aanzienlijk minder waterstofopslag nodig. Verwarming van de woning kan bijvoorbeeld met een warmtepomp, aardwarmte of houtkachel worden gedaan. Dat resulteert in een systeem dat zowel qua aanschafkosten als qua ruimtegebruik in de gemodelleerde woning past.
5. Praktijkervaring opgedaan met een systeem in Zwitserland⁴⁸ wijken af van de door Homer berekende waarden voor energie-opwek en -opslag. Nader onderzoek moet uitwijzen of de

⁴⁸ <http://www.umweltarena.ch/uber-uns/energieautarkes-mfh-brutten/>

gebruikte waarden naar beneden bijgesteld kunnen worden. Als dat het geval is komt de commerciële toepassing van dit soort systemen in Nederland eerder dichterbij dan in 2030 (zie 3b).

6. De variant waarbij mobiliteit (waterstofauto of een elektrische auto) onderdeel uitmaakt van het energieopslagsysteem heeft als voordeel dat de waterstofopslag in de auto, zelf ook deel uitmaakt van het energiesysteem en ook als buffer kan worden gebruikt.
 - a. Zo kan in periodes van overschot opgewekte energie, die op dat moment niet nodig is voor de woning en niet in de woning kan worden opgeslagen, worden opgeslagen in de waterstoftank van de auto.
 - b. Vice versa kan extern getankte energie (elektriciteit en/of waterstof) vanuit de auto naar de woning worden overgeheveld. Wat het Archypel systeem flexibeler en goedkoper maakt.
 - c. Aldus wordt op een praktisch uitvoerbare manier het autarkische principe - waarbij geen sprake meer is van een vaste elektriciteits- en gasaansluiting - gerealiseerd, terwijl er in periodes van overvloed en schaarste, zonder verliezen, toch aan de energievraag voldaan kan worden.
7. Alternatieven die niet volledig autarkisch zijn en (deels) gebruik maken van de bestaande energie infrastructuur in Nederland lijken interessante mogelijkheden te bieden.

8.2 Mogelijke vervolgprojecten en aanbevelingen

Waar de Archypel studie zich in belangrijke mate richtte op haalbaarheid vanuit verschillende invalshoeken zoals technisch, financieel, toepassing in huizen en de consequenties daarvan, zal een vervolgstudie zich vooral moeten richten op de technologische invulling van een realistisch ontwerp. Hierbij zullen de afzonderlijke systeemcomponenten zoveel mogelijk geïntegreerd moeten worden, teneinde kosten te besparen tegen een zo hoog mogelijke efficiëntie bij een zo klein mogelijk volume van het systeem.

Partijen denken aan de volgende stappen:

1. **Technische invulling:** basic engineering waarin alle componenten reeds in design-fase op elkaar worden afgestemd.
2. **Verbreden kennisbasis:** Combineren van de Archypel studieresultaten met extern opgedane ervaring, inclusief afstemming met het voltooide project in Zwitserland⁴⁸.
3. **Verdieping:** Nader uitwerken van de koppeling van de auto (mobiliteit) aan het Archypel systeem waarmee extra opslag én extra aanvoer beschikbaar komt. Hiervoor is een wel (HOMER) modelsoftware aanpassing noodzakelijk.
4. **Meer focus op buffering:** De studie uitbreiden met (ondergrondse) warmwateropslag, alternatieve verwarming, batterij systeem, H₂ opslag systeem, SMART local grid systeem en hiervoor (Nederlandse) leveranciers in het project team opnemen.
5. **Vergroting van scope:** vervolgonderzoek zal zich richten op een kleinschalig energieopslag systeem op *wijkniveau*. Dit heeft de volgende voordelen t.o.v. een systeem op huisniveau:
 - a. De kosten zullen door schaalvoordeel dalen
 - b. De benodigde ruimte voor opwek kan makkelijker ingepast worden
 - c. De benodigde ruimte voor het waterstofopslagsysteem kan makkelijker ingepast worden.

- d. Noodzakelijke piekvermogens dalen, omdat gelijktijdig gebruik⁴⁹ statistisch minder voorkomt, waardoor er relatief kleinere componenten gebruikt kunnen worden.
 - e. Een centraal systeem kan professioneel bediend en onderhouden worden.
6. **Een begin maken:** De base case⁽⁻⁾ variant, die alleen elektriciteit en warm water levert, zou het makkelijkste in een demonstratieproject verder ontwikkeld kunnen worden met de componenten van (deels huidige) projectpartners. Hierbij wordt geen rekening gehouden met (bestaande) verwarming van de woning, bijvoorbeeld door middel van een warmtepomp of een houtkachel. Het is ook een realistisch scenario dat in de toekomst nieuwbouwhuizen zo goed geïsoleerd zijn dat er nog nauwelijks verwarming nodig is. Hierbij zou naast Nederland ook uitdrukkelijk het marktpotentieel in de heel Europa meegenomen moeten worden.

8.3 Slotwoord

Dit haalbaarheidsproject heeft een duidelijk beeld opgeleverd voor één situatie van een volledig duurzame, autarkische, 2-onder-1-kap woning in Nederland. Hieruit blijkt dat op dit moment een behoorlijke prijs moet worden betaald voor een passend energiesysteem, met een betaalbaar vooruitzicht naar 2030. Deze situatie geeft inzicht, maar is geen blauwdruk van dé oplossing.

De uitkomsten van Homer geven inzicht en mogen best ter discussie worden gesteld. Dat komt vooral door de model aannames (e.g. type woning en bouwjaar) en gehanteerde kostprijzen. Echter, ook als de benodigde energieopslag zou halveren (i.e. waterstof voorraad van 300kg → 150kg) veranderen de conclusies niet.

Het verkregen inzicht is uitermate waardevol gebleken om het 'Plan van Aanpak' richting, en mogelijke technische oplossingen perspectief te geven. Realisatie van lokale energie-opslag is bewezen effectief⁴⁹ voor het oplossen van pijnpunten in het elektriciteitsnetwerk bij hoge penetratie van zonnepanelen en EV-mobiliteit. In verdere samenwerking, krijgt een probaat energie-opslag-systeem verder vorm.

Onveranderd blijft de trend om meer duurzame energie te benutten met als doel binnen Nederland CO₂ emissie te voorkomen. Integrale aanpak is de sleutel: energieproductie/distributie/consumptie wordt iets collectiefs.

⁴⁹ Op MSR niveau van elektriciteits-distributie netten (de transformator in de wijk) werd bijvoorbeeld gerekend met een gelijktijdigheidsfactor van 25: dat wil zeggen dat voor 1 huis in een wijk slechts 1/25^e van het aansluitvermogen op de middenstransformator gereserveerd hoefde te worden. Let op, sindsdien is deze factor flink bijgesteld, zoals in het project "IN4Energy" beschouwd vanuit het oogpunt van de gebruiker en van de techniek. (zie: Intelligent Net in Duurzaam Lochem (2012-2015) <https://app.tki-urbanenergy.nl/storage/app/uploads/public/58c/d4a/6bd/58cd4a6bd03a0296600422.pdf>)

Bijlagen

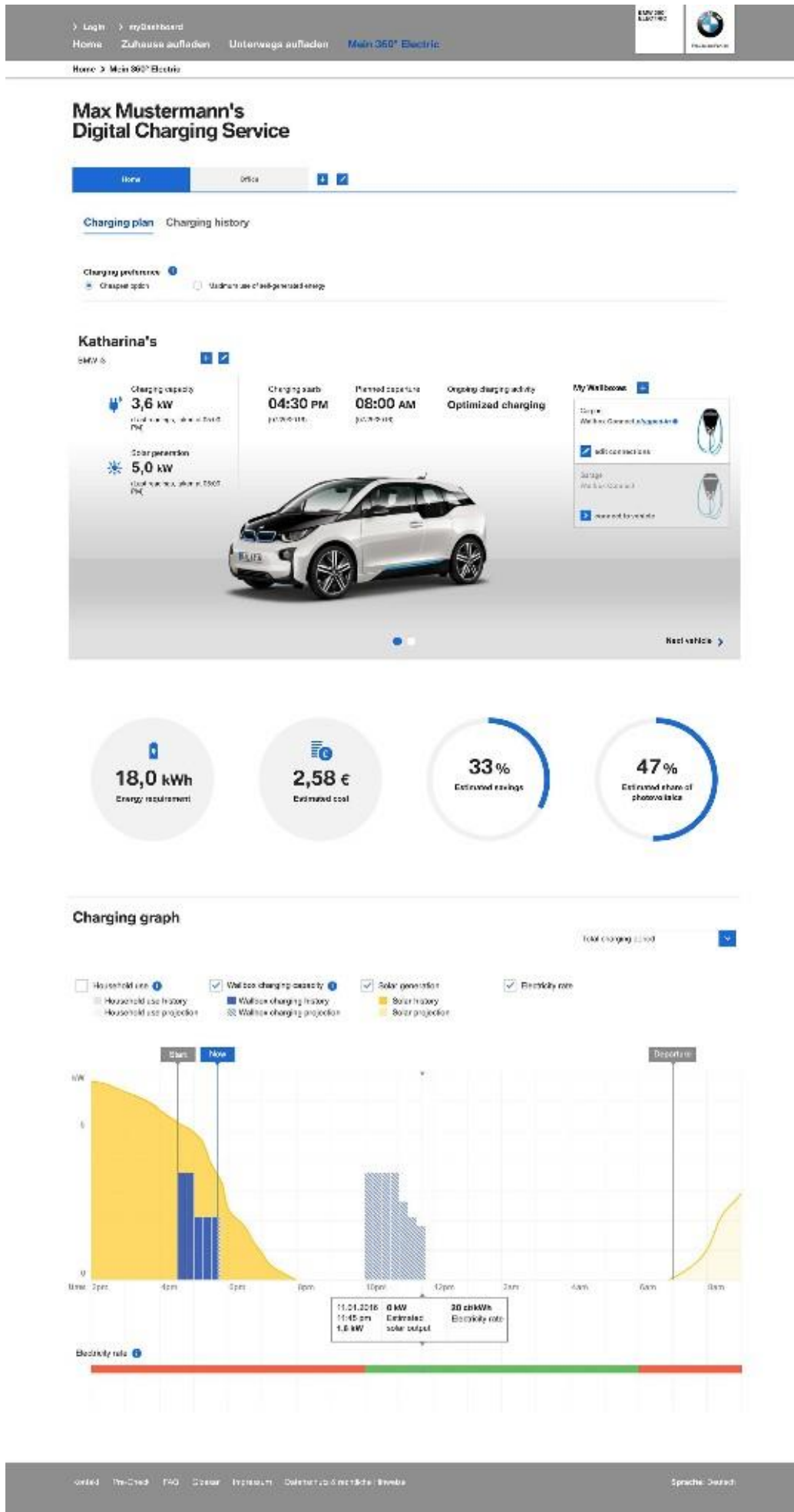
Bijlage 1: Technische configuratie

Tabel: Lijst met commerciële energieopslag systemen en producten op basis van alleen batterijen
(bron: <http://products.cleantechnica.com/batteries/>)

Naam (producent)	Capacity [kWh]	Prijs	Chemistry	Service life ⁵⁰
sonnenBatterie eco (Sonnen)	4 (combi up to 16kWh 8 units)	€3,599 Incl. BTW	LiFePO4	10,000 cycles or 10 years
Powerwall 2 (Tesla)	13.5	\$5500 (no Vat) Incl inverter	Lithium ion	10 years
Mercedes-Benz Home Battery (Mercedes Benz)	2.5	\$9000..10000	Lithium ion	8,000 cycles or 10 years
MAVERO (kreisel)	8, .. , 22	€5599 -€14740	Lithium ion	5,000 cycles or 20 years
Residential ESS (Samsung SDI)	3.6, .., 10.8	€6148, ...	Lithium ion	6,000 cycles or 5 years
RESU (LG Chem)	2.9 .. 9.5	€2529 - €5069	Lithium ion	6,000 cycles or 10 years
X-Hybrid (SolaX)	3, .. , 4.6	€1948, ...	Lithium ion	backup power 10 years
Sunny Boy Smart Energy (SMA)	2	€4429 Incl. inverter	Lithium ion	backup power 5 years
Sunny Island H-series (SMA)	6, 8	€2582, €3384	Lithium ion	backup power 5 years
Hoppecke Sun Powerpack Classic (Hoppecke)	5.5, .. , 22	Unknown	Lead gel	2500 cycles or 10 years
Hoppecke Sun Powerpack Premium (Hoppecke)	5, 7.5 (combi up to 30kWh)	€5432 ...	LiFePO4	7000 cycles or 20 years
MyReserve 500 (Solarwatt)	4.4 (combi up to 11 kWh)	€5499 ...	Lithium ion	7400 cycles or 10 years
Vitocore (Viessmann)	2.5 (combi up to 10kWh)	Unknown	Lithium ion	6000 cycles or 20 years
Freedom PowerBank (ZEN Energy)	12.8, .., 19.2	\$19,750 ...	Lithium ion	backup power 10 years
S10 E12 All in One (E3/DC GmbH)	4.6 (combi up to 13.8 kWh)	€12222	Lithium Ion	backup power 10 years
S10 mini (E3/DC GmbH)	2.3 (combi up to 9.2kWh)	Unknown	Lithium Ion	backup power 10 years
Akasol neeoQube (Akasol)	5.5	€9199	Lithium Ion	7,000 cycles or 20 years
Kostal PIKO Batterie Li (KOSTAL)	3.6, .., 9.6	€6166 - €11128	LiFePO4	6,000 cycles or 15 years
Victron ECOMulti (Victron Energy)	2.3 (combi up to 6.9kWh)	€2475 ...	LiFePO4	Battery 3 year, 5 years
SONY Fortelion (SONY)	4.8 (combi up to 19.2kWh)	€6612 ... (1.2kWh batt costs €1215)	LiFePO4	backup power 20 years
ENPHASE AC battery (ENPHASE)	1.2	Unknown	LiFePO4	Available in 201 in US only

⁵⁰ Opmerking: 20 jaar heeft 7300 dagen, oftewel 7300 dagelijkse dag/nacht cycles

BUSINESS	Capacity [kWh]	Prijs	Chemistry	Service life
SonnenBatterie Pro (Sonnen GmbH)	24, .. 240	Unknown Incl. peak shaving	Lithium Ion	10,000 cycles or 10 years
Powerpack Business (TESLA)	200 (combi from 2 to 54 powerpacks of 100kWh)	\$162,000 incl. 250kW inverter of \$65000 per 2? powerpacks costing \$47000	Lithium Ion	unknown



ISPT

Institute for Sustainable
Process Technology



Bijlage 2: Value Curving analyse Value curving data 'As-is' (huidige situatie)

	SEQ	Ranking door Archipel deelnemers	As is' waarden/scores						Omschrijving
			Archipel (H2+FC+batterij) BASE CASE	Archipel (H2+FC+batterij)+ mobiliteit BASE CASE (+)	Archipel (H2+FC+batterij)+ houtkachel BASE CASE (-)	Huidig systeem (elektra+gasnet)	PV/wind +3 dagen Batterij + alternatieve bijverwarming (niet fossiel)	Diesel generator + olie verwarming	
Hoofdenkenmerken/ uitgangspunten			Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	
Eigen elektriciteits-opwekking (PV/wind)									
Autonoom voor elektriciteit			Ja	Ja	Ja	Nee	Grotendeels	Ja	
Autonoom voor verwarming			Ja	Ja	Deels	Nee	Deels	Nee	
Autonoom voor mobiliteit			Nee	Deels	Nee	Nee	Nee	Nee	
Waarde-elementen									
Beschikbaarheid	1	23	4	4	4	5	3		4 Altijd genoeg vermogen beschikbaar (elektra/warmte/mobiliteit), niet seizoensafhankelijk
Prijs / TCO	2	21	2	2	2	5	3		4 Lage aanschaffkosten (relatief) en OPEX (energie, onderhoud). Verdienvermogen (terugverkoop) Mobiliteit: vervoerskosten, fiscaliteit
Comfort	3	16	4	4	3	5	3		4 Bediengemak (zelfregulerend), IoT (op afstand bedienbaar), snel opwarmen/koelen, geen operationele beperkingen, warmwaterlevering, geen gedragsaanpassing nodig Mobiliteit: Direct beschikbaar, thuis tanken, snel tanken, range, extra opslag
Betrouwbaarheid	4	13	3	3	3	5	3		4 Lange levensduur, weinig onderhoud en lang onderhoudsinterval, fall-back systeem, energievoorraad beschikbaar Mobiliteit: Voldoende voorraad, zekerheid, fallback (auto als power plant)
Duurzaamheid	5	11	4	5	3	1	3		2 Levensduur, milieueffect gebruikte materialen, milieu (CO2 uitstoot/emissies van deeltjes) Mobiliteit: milieu, groene brandstof
Compatibiliteit	6	11	3	2	3	5	4		3 Backward compatible (retrofit), lage installatie meerkosten, bestaande middelen gebruiken
Onafhankelijkheid	7	11	5	5	4	1	4		4 Zelfcontrole (dag/jaar basis), autonome energie, geen netkosten, geen bureaucratie
Veiligheid	8	10	3	2	3	5	4		4 Feitelijke veiligheid en perceptie van veiligheid, track record
Imago	9	7	2	2	2	2	3		2 Innovatief, nieuw, hip, zichtbaar
Dimensies	10	6	2	1	3	5	3		4 Grootte (footprint/volume), verplaatsbaarheid Mobiliteit: grootte van tanksysteem, druk, mileage/range
Gezondheid	11	2	5	5	2	4	5		3 Uitstoot in huis, milieu binnenhuis, geluid
Emotie	12	2	5	5	4	1	3		2 Gemeenschappelijk delen
TRL	13	-	2	1	3	5	4		5 Technology Readiness Level



Value curve 'to be', over 5 jaar bij productie van >5000 stuks per jaar

	SEQ	Ranking door Archipel deelnemers	As is' waarden/scores						Omschrijving
			Archipel (H2+FC+batterij) BASE CASE (1)	Archipel (H2+FC+batterij+ mobiliteit) BASE CASE (2)	Archipel (H2+FC+batterij+ houtkachel) BASE CASE (0)	Huidig systeem (elektra+gasnet)	PV/wind + 3 dagen Batterij + alternatieve bijverwarming (niet fossiel)	Diesel generator + olie verwarming	
Hoofdkenmerken / uitgangspunten	Eigen elektriciteits-opwekking (PV/wind)		Ja (deels)	Ja (deels)	Ja (deels)	Nee	Ja (deels)	Ja	
	Autonoom voor elektriciteit		Ja (deels)	Ja (deels)	Ja (deels)	Nee	Ja (deels)	Ja	
	Autonoom voor verwarming		Ja (deels)	Ja (deels)	Ja (deels)	Nee	Deels	Nee	
	Autonoom voor mobiliteit		Nee	Deels	Nee	Nee	Nee	Nee	
Waarde-elementen	Beschikbaarheid	1	23	5	5	5	4	5	5 Altijd genoeg vermogen beschikbaar (elektra/warmte/mobiliteit), niet seizoenafhankelijk
	Prijs / TCO	2	21	4	4	4	4	3	3 Lage aanschafkosten (relatief) en OPEX (energie, onderhoud). Verdienvermogen (terugverkoop) Mobiliteit: vervoerskosten, fiscaliteit
	Comfort	3	16	5	5	3	5	3	3 Bediengemak (zelfregulerend), IoT (op afstand bedienbaar), snel opwarmen/koelen, geen operationele beperkingen, warmwater levering, geen gedragsaanpassing nodig Mobiliteit: Direct beschikbaar, thuis tanken, snel tanken, range, extra opslag
	Betrouwbaarheid	4	13	4	4	4	5	3	4 Lange levensduur, weinig onderhoud en lang onderhoudsinterval, fall-back systeem, energievoorraad beschikbaar Mobiliteit: Voldoende voorraad, zekerheid, fallback (auto als power plant)
	Duurzaamheid	5	11	5	5	4	2	3	1 Levensduur, milieueffect gebruikte materialen, milieu (CO2 uitstoot/emissies van deeltjes) Mobiliteit: milieu, groene brandstof
	Compatibiliteit	6	11	4	3	4	5	4	3 Backward compatible (retrofit), lage installatiemeerkosten, bestaande middelen gebruiken
	Onafhankelijkheid	7	11	5	5	5	1	3	4 Zelfcontrole (dag/jaar basis), autonome energie, geen netkosten, geen bureaucratie
	Veiligheid	8	10	5	5	4	5	4	3 Feitenlijke veiligheid en perceptie van veiligheid, track record
	Imago	9	7	5	5	3	2	4	1 Innovatief, nieuw, hip, zichtbaar
	Dimensies	10	6	3	2	4	5	4	4 Grootte (footprint/volume), verplaatsbaarheid Mobiliteit: grootte van tanksysteem, druk, mileage/range
	Gezondheid	11	2	5	5	2	4	3	2 Uitstoot in huis, milieu binnenhuis, geluid
	Emotie	12	2	5	5	4	2	3	1 Gemeenschappelijk delen
	TRL	13	-	4	4	4	5	4	5 Technology Readiness Level

Bijlage 3: HOMER

HOMER simulatie software

HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables) is een software pakket waarin een microgrid geoptimaliseerd kan worden op de business case en een ontwerp voor een energiesysteem met of zonder netaansluiting kan worden geëvalueerd. Verschillende duurzame en conventionele componenten, beschikbaarheid van zon en wind, kosten, en het vraagprofiel kunnen worden opgegeven en worden meegenomen in de simulatie. In dit project is HOMER Pro 3.8 gebruikt.

Op basis van opgegeven informatie simuleert Homer een aantal mogelijke systeemconfiguraties en sorteert deze op basis van de *Net Present Cost (NPC)*. Resultaten worden getoond in grafieken en tabellen die inzicht in de economische en technische consequenties geven. Ook bestaat de mogelijkheid om gevoeligheidsanalyses uit te voeren.

Simulatie

Homer simuleert de functionering van het systeem door energiebalans berekeningen uit te voeren voor elke tijdsstap (bv. uur) van een jaar. Voor elke stap worden de elektrische en warmtevraag voor die tijdssectie vergeleken met de energie die het systeem kan leveren in die tijdsstap en wordt voor elke component in het systeem de energiestroom van en naar die component bepaald en eventueel de state-of-charge (voor batterijen) en brandstofverbruik. Een groot aantal commerciële en generieke componenten zijn beschikbaar in de Homer bibliotheek, maar componenten kunnen ook door de gebruiker gedefinieerd worden. De gebruiker kiest welke componenten deel uitmaken van het energiesysteem.

Voor elke mogelijke systeemconfiguratie die opgegeven is door de gebruiker wordt dit proces herhaald, wordt bepaald of met deze configuratie in de vraag voorzien kan worden en worden de kosten van aanschaf, vervanging en onderhoud over de levensduur van het project bepaald. Simuleren is de kernfunctie van Homer.

Optimalisatie

De optimalisatie van het systeem gebeurt op basis van door de gebruiker opgegeven mogelijkheden voor beschikbare capaciteiten of aantallen voor elk van de componenten dan wel vanuit een eigen Homer Optimizer die een vrij zoekgebied binnen vastgelegde grenzen heeft, waarbij steeds naar de laagste kosten gezocht wordt en levert een lijst met mogelijke configuraties gesorteerd op kosten. Optimalisatie gebeurt dus door een reeks simulaties uit te voeren voor een bepaalde configuratie en te evalueren op kosten.

Gevoeligheidsanalyse

Middels een gevoeligheidsanalyse kan het optimalisatieproces herhaald worden voor elk van de gespecificeerde gevoeligheidsvariabelen.

De volgende standaard setting zijn gebruikt voor de modellering: