

COGEN Vlaanderen

Adviesnota 2015

Brandstofcel-WKK's in Vlaanderen



**COGEN
Vlaanderen**

Inhoud

1.	Samenvatting	5
2.	Inleiding.....	9
3.	Technologie	11
3.1	Brandstofcel-technologie	11
3.2	Opbouw van een stationaire brandstofcel-WKK	12
3.2.1	Brandstof hervormer	13
3.2.2	Cel en stack	13
3.2.3	De invertor	16
3.2.4	Hulpapparatuur	16
3.3	Systeemconfiguratie en inpassing	16
3.4	De voornaamste types brandstofcel-WKK's	17
3.4.1	Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEM FC).....	17
3.4.2	Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)	18
3.4.3	Overzicht.....	19
4.	Implementatie van brandstofcel als WKK	21
4.1	Prestaties van brandstofcel-WKK's.....	21
4.1.1	Productie van elektriciteit en elektrische efficiëntie	21
4.1.2	Productie en gebruik van warmte	22
4.1.3	Warmte-krachtverhouding	23
4.1.4	Primaire-energiebesparing	24
4.1.5	Degradatie en levensduur.....	25
4.1.6	Flexibiliteit van brandstofcel-WKK's	26
4.1.7	Emissies van brandstofcel-WKK's	29
4.2	Dimensionering en haalbaarheid.....	30
4.2.1	Mogelijke toepassingen	30
4.2.2	Modus van opereren + dimensioneren	31
4.2.3	Ruimte.....	31
4.2.4	Installatie, aansluiting en onderhoud	32
4.2.5	Geluid.....	32
4.2.6	Financieel	32
4.2.7	Brandstofcel-WKK in de EPB-berekening.....	33
5.	Analyse	35
5.1	Voornaamste voordelen en risico's	35
5.1.1	Voor de eindgebruiker	35
5.1.2	Voor het elektriciteitsnet.....	35
5.1.3	Voor de maatschappij.....	36

5.1.4	Voor de overheid	36
5.2	Stand van zaken	38
5.2.1	Groeiende wereldwijde markt	38
5.2.2	Opkomst van residentiële brandstofcel-WKK	38
5.2.3	Stand van zaken in Vlaanderen	40
5.3	Potentieel en evoluties	41
5.3.1	Inschatting van het technisch potentieel	41
5.3.2	Evoluties in kostprijs	42
5.3.3	Evoluties in materialen en technieken	43
5.3.4	Evoluties in de productieketen	44
6.	Addendum: De rol van waterstof	45
6.1.1	Kenmerken	45
6.1.2	Productie en opslag	45
6.1.3	Waterstof in een flexibel energiesysteem	46
6.1.4	Waterstof of elektriciteit	48
7.	Aanbevelingen/beleidsscenario's	49
	Literatuur	51

1. Samenvatting

Een brandstofcel is een systeem dat via een elektrochemisch proces waterstof en zuurstof omzet in elektrische energie zonder tussenstappen van verbranding en mechanische arbeid. Door deze rechtstreekse omzetting behaalt de technologie zeer hoge elektrische rendementen. Brandstofcellen worden ontwikkeld voor een reeks stationaire, draagbare en transport-toepassingen, en de grootte varieert van individuele cellen van 100W tot energiecentrales van enkele MW. De meeste brandstofcellen worden als WKK-toepassing voorzien, met nuttig gebruik van de warmte. Deze studie spitst zich toe op de stationaire brandstofcel-WKK en de voornaamste types die beschikbaar zijn.

In de cellen van de stack, het centrale deel van de brandstofcel-WKK, vinden elektrochemische reacties plaats tussen waterstofgas en zuurstof, waarbij een elektrische stroom wordt gegenereerd. De reactie is exothermisch en de vrijgekomen warmte kan gebruikt worden in een thermisch proces.

De stack wordt dus gevoed door waterstofgas. In het addendum wordt dieper ingegaan over de rol van waterstof in een flexibel energiesysteem. Door een hervormer toe te voegen aan het systeem van de brandstofcel-WKK, kan deze gevoed worden door aardgas. Dit is een opportuniteit in een land als België waar reeds een uitgebreid bestaand gasnetwerk ligt; zeker wanneer op lange termijn een vergroening van het gasnet voor een verdere koolstofreductie kan zorgen. Door *reforming* kan aardgas (of een andere brandstof) dan worden omgezet in waterstof. Het systeem bestaat verder nog uit een aantal types hulpapparatuur, zoals een inverter, pompen, ventilatoren, warmtewisselaars, waterbeheerssystemen en meet- en controlesystemen. De hele opstelling is zeer modulair, zonder dat er veel aan de basisconfiguratie verandert. Dit maakt dat brandstofcellen gebruikt kunnen worden in een zeer breed gamma van vermogens.

Deze studie gaat verder in op twee types brandstofcel-WKK die momenteel het verst ontwikkeld zijn: de PEM FC en SOFC. De PEM brandstofcel werkt op lage temperatuur, met als voordeel dat start-stops (bijvoorbeeld dag-nacht) mogelijk zijn. Deze lage temperatuur stelt een aantal eisen aan het systeem, waardoor de opbouw complexer en gemiddeld iets duurder is. De SOFC brandstofcel werkt op hoge temperatuur en is eenvoudiger in opbouw. De hogere temperatuur zorgt voor een langere opstartsnelheid en frequente start-stops zijn niet mogelijk. SOFC's hebben een zeer hoge elektrische efficiëntie en leveren ze relatief veel elektriciteit in verhouding tot de warmte.

We bekijken in deze studie niet de theoretische efficiëntie van een stack in labocondities, maar wel de netto efficiëntie van een brandstofcel-WKK in reële situaties. Ze ligt meestal rond de 30 à 55 % (HHV). Door degradatie van de stack zal de efficiëntie van een brandstofcel-WKK doorheen de tijd zakken. Naargelang het type brandstofcel en de werking ervan zal de warmte aan een verschillende temperatuur beschikbaar zijn en kan die voor verschillende toepassingen gebruikt worden. Hierbij kan men opmerken dat de condensatiewarmte in theorie tweemaal zo hoog als die bij een normale verbranding van aardgas. Daardoor is de beschikbare warmte zeer gevoelig is aan de temperatuur van het afgiftecircuit.

T.o.v. andere technologieën produceren de brandstofcellen in verhouding meer elektriciteit dan warmte. De kracht-warmteverhouding zal voor een PEMFC rond de 0,7 – 1,0 liggen; voor de SOFC ligt deze ver boven de 1. Dit verschil bepaalt niet enkel de keuze van de toepassing maar ook de bedrijfsvoering: brandstofcel-WKK's zullen niet enkel meer geschikt zijn voor een toepassing met lage warmtevraag (zoals een nieuwbouwwoning), maar ze zullen ook minder afhankelijk zijn van fluctuaties in deze warmtevraag, zowel economisch als naar CO₂-energiebesparing toe.

De primaire-energiebesparing die gemeten werd bij brandstofcel-WKK's in reële woningsituaties bedraagt ~20 tot 30%, al kan ze in theorie veel hoger zijn wanneer de warmte goed gebruikt wordt en de systemen en hun

toepassingen worden geoptimaliseerd. De berekende energiebesparing hangt af van de aannames van de efficiëntie van de brandstofcel maar ook van de gekozen referentiewaarden voor gescheiden productie van elektriciteit en warmte. Met dergelijke rendementen is de toepassing van brandstofcellen als decentrale energiebron vergelijkbaar met de toepassing van een zeer efficiënte STEG-centrale in combinatie met een duurzame/hernieuwbare bron van warmte-opwekking. Hoewel deze technologie dus fundamenteel anders presteert dan andere micro-WKK's, bestaat er binnen de huidige EPB-rekenmethode geen aparte rekenmethodiek; ze vallen onder de generieke categorie 'andere toepassingen'. Wellicht werkt dit in veel gevallen in het nadeel van de brandstofcel-WKK, die een beduidend hoger elektrisch rendement heeft dan de overige technologieën (bijvoorbeeld de stirlingmotor).

Door de hoge primaire-energiebesparing en het afwezig zijn van een verbrandingsproces, zijn emissies van o.a. NO_x, CO, VOC's en SO_x zeer laag. CO₂ wordt enkel gevormd bij het *reforming* proces maar de uitstoot is laag omwille van het hoger elektrisch rendement. Er wordt nagenoeg geen fijn stof gevormd; wat ook erg belangrijk is in de nabije omgeving van de installaties, bijvoorbeeld in een stedelijke omgeving.

De modulaire opbouw, de mogelijkheid van sommige types om te op- en af te schakelen en de mogelijkheid tot werken in deellast bieden perspectieven voor het aanbieden van flexibiliteit. De werkelijke prestaties in deze condities zullen afhangen van de inpassing, de grootte en het type. Bijvoorbeeld in het Japanse ene.farm project draaien de PEM brandstofcellen tijdens de dag, wanneer er een grote vraag is naar elektriciteit. Op dat moment wordt warm water opgeslagen. De toestellen staan 's nachts af, wanneer er weinig vraag is naar warmte en elektriciteit. Elektriciteit wordt op dat moment afgenomen van het net. Brandstofcellen op hoge temperaturen zoals SOFC's kunnen deze start/stopcycli niet verdragen en zijn daarom ontworpen om continu te draaien. Ze bieden wel de mogelijkheid om in deellast te draaien om flexibiliteit te bieden.

Betrouwbaarheid en levensduur zijn nog een belangrijke hindernis waarop volop wordt ingezet door producenten. Bij de keuze van een bepaald type of merk brandstofcel-WKK zal dus de levensduur in relatie tot de investerings- en onderhoudskost een belangrijke parameter zijn.

Brandstofcellen nemen relatief weinig plaats in, zeker in verhouding met andere decentrale producenten van elektriciteit. In een woning nemen ze niet veel meer plaats in dan een klassieke ketel. Ook op grotere schaal kunnen brandstofcellen op kleinere ruimtes worden geplaatst, in dichtbevolkte gebieden zoals Vlaanderen kan dit een interessante oplossing zijn. De installatie werkt ook stiller dan andere WKK's.

Momenteel is de investeringskost voor een brandstofcel nog hoog. Daartegenover staat dat er een grote energiebesparing kan gerealiseerd worden. Uit een rekenvoorbeeld van een huishoudelijke SOFC blijkt dat om tot een aanvaardbare terugverdientijd van bijvoorbeeld 8 jaar te komen de investering met ongeveer de helft moet dalen. Interessant is dat in Japan investeringssubsidies voor brandstofcel-WKK's de verkoop zo hebben gestimuleerd dat de verkoopprijs na 5 jaar tot de helft was teruggebracht. Ondersteuning voor technologieën die op zich nog niet rendabel zijn kan dus een aanzienlijke impact kan hebben op het prijsverloop.

De voor- en nadelen van brandstofcel-WKK's hangen af van de doelgroep. De voornaamste voordelen voor de eindgebruiker (zowel huishoudelijk als voor bedrijven) zijn een besparing op de energiefactuur, een eenvoudige en kleine opstelling en een installatie met zeer weinig emissies of geluid. Doordat de systemen moduleerbaar zijn kunnen ze goed gedimensioneerd worden op de elektriciteits- en/of warmtevraag die ook kan wijzigen in de tijd; waardoor kostenefficiënt kan worden omgesprongen met de productie. Het voornaamste nadeel voor de eindgebruiker is de hoge investeringskost in relatie tot de relatief beperkte levensduur. Brandstofcellen bieden aan de netbeheerders het voordeel van een voorspelbare en continue elektriciteitsproductie. Ze kunnen hierin verder gaan en flexibel inspelen op elektriciteitsvraag en -aanbod. Momenteel worden deze voordelen van kleine installaties echter nog niet volledig erkend en dus ook niet vertaald naar een financieel

voordeel door de netbeheerders. Brandstofcel-WKK's bieden een aantal voordelen voor de maatschappij. Het belangrijkste voordeel is de realisatie van een belangrijke primaire-energiebesparing. Brandstofcellen hebben bovendien bijzonder lage emissies van broeikasgassen en fijn stof. Deze voordelen voor de maatschappij kunnen ten dele bijdragen aan beleidsdoelstellingen op het vlak van energie, klimaat of milieu van Vlaanderen, België of Europa, waardoor het zinvol is om de evoluties in de technologie op te volgen en te ondersteunen. Bovendien betekenen hightech ontwikkelingen bijkomende duurzame werkgelegenheid in een nieuw te ontwikkelen industrietaak, die gedomineerd wordt door de noodzaak van hoogtechnologische innovaties.

Hoewel wereldwijd de markt van de stationaire brandstofcellen sterk groeit, is Europa momenteel nog een kleine speler. De markt van de residentiële brandstofcel-WKK's heeft zich al zeer sterk ontwikkeld in Azië, waar de technologie al haar rendabiliteit en efficiëntie heeft bewezen. In Europa kwamen de eerste systemen op de markt begin jaren 90, maar hoewel we voorbij de R&D fase zijn, is het systeem nog niet volledig gecommercialiseerd. Daarom probeerde de Europese Commissie een initiatief op te starten met het ene.field project, dat door financiële ondersteuning de productie van Europese brandstofcellen wil promoten. Vanaf 2016 is het ook voor Belgische eindgebruikers mogelijk om in dit project te stappen. De technologie wordt nog maar sinds een tweetal jaren rechtstreeks verkocht op de Vlaamse markt. Vakbeurzen in het buitenland bewijzen dat er binnen 1-2 jaar nog diverse nieuwe types op de markt zullen komen.

Zowel binnen de industriële als de huishoudelijke warmtevraag (incl. KMO's) bestaat er een aanzienlijk potentieel voor stationaire brandstofcellen. Ze kunnen op die manier bijdragen aan een efficiënt energiegebruik. Om van een nichemarkt te evolueren naar een commercieel product moet men over een tussenperiode heen geraken, waarbij niet alleen inspanningen moeten geleverd worden door de industrie en de producenten, maar waarbij ook politieke en/of financiële ondersteuning noodzakelijk is.

Naast een vergroting van het productie-aantal zal de kost verder kunnen verlaagd worden door technische verbeteringen op verschillende terreinen. Dure componenten zoals platinum worden vervangen door goedkopere materialen, het systeem wordt vereenvoudigd met minder onderdelen en een daling van het gewicht, en algemeen worden een verhoging van de levensduur en efficiëntie nagestreefd. De productieketen in Europa is ook nog volop aan het evolueren. Een positief effect kan verwacht worden van ontwikkelingen in andere sectoren door overdracht van kennis en ervaring.

Zowel technologische als financiële evoluties worden aangedreven door overheden en producenten. Vlaanderen kan hier zeker een rol in gaan spelen. Daarom adviseren we om eerst aan kennisuitbreiding doen door het opzetten van demonstratieprojecten en het verhogen van de bewustwording. Zodra er in Vlaanderen genoeg kennis en bewustzijn zijn opgedaan, de technologie nog verder ontwikkeld is en de markt zich heeft verbreed, kan eventueel nagedacht worden aan mogelijke vormen van steun om de technologie verder te lanceren en om uit de nichemarkt te geraken, en om de initiële kostprijs te kunnen verlagen naar de toekomst.

2. Inleiding

Warmte-krachtkoppeling bewijst al lang haar verdienste op vlak van energie-efficiëntie in tal van sectoren. In vergelijking met de gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte is er voor de gelijktijdige energieopwekkingsmethode die WKK's hanteren minder primaire energie (brandstof) nodig. Waar er bij de klassieke grootschalige elektriciteitsopwekkingsmethode een groot deel van de gebruikte energie verloren gaat als afvalwarmte, en in een aparte verwarmingsketel niet efficiënt wordt omgesprongen met hoogwaardige (kwaliteitsvolle) energie, is dit bij WKK niet het geval. Doordat je de elektriciteit decentraal produceert, zijn er bovendien minder transportverliezen op het elektriciteitsnet. Dit alles maakt dat WKK een efficiënte methode is die kan leiden tot minder energieverliezen, lagere energiefacturen en een gereduceerde emissie van CO₂ of andere schadelijke stoffen. We verwijzen hiervoor graag naar onze andere publicaties.

Omwille van deze efficiëntie ondersteunt COGEN de kwalitatieve WKK, ongeacht de brandstof (zowel met fossiele brandstoffen als met hernieuwbare bronnen moet zo efficiënt mogelijk worden omgesprongen) en ongeacht de technologie. Klassiek kennen we natuurlijk de stoom- en gasturbine en de inwendige verbrandingsmotor, maar er zijn heel wat ontwikkelingen rond andere technologieën zoals stirlingmotors, micro-turbines, ORC-installaties.... Met de opkomst van nieuwe types (micro-)WKK zien we ook een uitbreiding in het toepassingsdomein.

Een technologie die meer en meer opmars maakt op de internationale en Europese markten is de brandstofcel. In plaats van zuivere verbranding van een energierijke brandstof, het klassieke WKK-principe, werken brandstofcellen via een elektrochemische reactie (zonder vlam) en daar waar de opgewekte energie bij een klassieke WKK aanvankelijk vrijkomt als warmte, komt ze bij een brandstofcel voor een deel onmiddellijk vrij als elektriciteit. Naast een hoge elektrische en totale efficiëntie hebben ze een aantal interessante kenmerken zoals zeer lage emissies, geen geluidsoverlast en een hogere kracht-warmteverhouding dan alle klassieke WKK-installaties. De relatief grote hoeveelheid elektriciteit t.o.v. de warmteproductie maakt dit type installaties bijvoorbeeld bijzonder geschikt voor lage-energiewoningen, waarbij het zwaartepunt van het energieverbruikspatroon in gebouwen verschuift van warmte- naar elektriciteitsvraag.

De brandstofcel-WKK zal dus voor een verdere verbreding van het toepassingsdomein van WKK zorgen, en dus voor een grotere energie-efficiëntie in Vlaanderen. Naast deze primaire energiebesparing zullen WKK-installaties een steeds belangrijkere rol spelen in het bieden van flexibiliteit op het elektriciteitsnet en het balanceren van intermitterende hernieuwbare bronnen. Ook hiervoor verwijzen we graag naar de COGEN-studie van 2015 (*Flexibele WKK in het energielandschap van de toekomst*). De mate van flexibiliteit die een WKK-installatie kan bieden hangt af van de toepassing en de technologie. Ook brandstofcellen kunnen hierin een rol spelen.

Deze nota geeft de huidige stand van zaken op het vlak van technologie, potentieel en marktontwikkeling voor de brandstofcel-WKK in Vlaanderen. Volgende methoden werden gebruikt:

- literatuurstudie aan de hand van recente documenten
- overleg met de producenten, sectororganisaties, onderzoeksinstituten en Europese projecten
- eigen metingen, simulaties en onderzoek
- deelname aan verschillende onderzoeksprojecten en thesen
- discussies met de stakeholders binnen de werkgroep micro-WKK.

Omdat de uitrol op de Vlaamse markt volop in evolutie is hopen we in de komende jaren nog een beter zicht te krijgen op de mogelijkheden en de ontwikkelingen, en we zullen de informatie daarom verder opvolgen en bijstellen.

3. Technologie

Een brandstofcel werkt op basis van een elektrochemische reactie, waarbij rechtstreeks warmte en elektriciteit vrijkomt. Hier gebeurt dus geen klassieke verbranding van een energierijke brandstof. Daarom zal de opbouw fundamenteel verschillen van bijvoorbeeld een verbrandingsmotor: de kern van de brandstofcel bestaat uit een stack waarin de reactie plaatsvindt. Dit basisprincipe kan in vele toepassingen worden gebruikt, zowel stationair als mobiel. Deze nota zal zich verder toespitsen op de stationaire brandstofcel-WKK en de voornaamste types die beschikbaar zijn.

3.1 Brandstofcel-technologie

Een brandstofcel is een systeem dat via een elektrochemisch proces waterstof en zuurstof omzet in elektrische energie zonder tussenstappen van verbranding en mechanische arbeid, met enkel water als bijproduct. De zuurstof wordt meestal uit de omgevingslucht gehaald. Door deze rechtstreekse omzetting behaalt de technologie zeer hoge elektrische rendementen.

De omzetting van chemische energie van een brandstof in elektrische energie d.m.v. een waterstof-zuurstofcel werd voor het eerst uitgevoerd door Sir William Grove in 1839. Systematisch onderzoek tijdens de laatste 40-50 jaar wierp zijn vruchten af en diverse technologieën werden ontwikkeld en geproduceerd. De productie gebeurde tot voor kort nog maar in beperkte hoeveelheden.

Er bestaan verschillende soorten brandstofcellen. Naargelang het type werken ze bij een andere bedrijfstemperatuur. In Tabel 1 worden de verschillende types brandstofcellen beschreven aan de hand van het type separator (elektrolyt of membraan) en de toepassingen.

Type	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	AFC	DMFC
	<i>Proton exchange membrane fuel cell</i>	<i>Phosphoric acid fuel cell</i>	<i>Molten carbonate fuel cell</i>	<i>Solid oxide fuel cell</i>	<i>Alkaline fuel cell</i>	<i>Direct methanol fuel cell</i>
Type separator	H ⁺ ionen (met anionen gebonden in polymeer membraan)	H ⁺ ionen (H ₃ PO ₄ oplossing)	CO ₃ ²⁻ ionen (bv gesmolten LiKaCO ₃)	O ²⁻ ionen (gestabiliseerde keramische matrix met vrije zuurstofionen)	OH ⁻ ionen (bv. KOH)	H ⁺ ionen
Toepassingen	<ul style="list-style-type: none"> - Noodstroom - Draagbare stroom - Decentrale opwekking - Vervoer - Speciale voertuigen 	<ul style="list-style-type: none"> - Hulpvermogen - Energiebedrijf - Decentrale opwekking 	<ul style="list-style-type: none"> - Hulpvermogen - Energiebedrijf - Decentrale opwekking 	<ul style="list-style-type: none"> - Hulpvermogen - Energiebedrijf - Decentrale opwekking 	<ul style="list-style-type: none"> - Noodstroom (Energiebedrijf) - Militair - Ruimtevaart 	<ul style="list-style-type: none"> - Noodstroom - Draagbare stroom - militair

Tabel 1: Overzicht brandstofcel-technologieën.

Brandstofcellen worden ontwikkeld voor een reeks stationaire, draagbare en transport-toepassingen, en de grootte varieert van individuele cellen van 100W tot energiecentrales van enkele MW, die volledige districten van energie voorzien. Er bestaat zelfs al een prototype brandstofcel voor GSM-toepassingen.

Sommige toepassingen zijn in de eerste plaats warmtegedreven, met elektriciteit als nuttig bijproduct, terwijl andere voor basislast elektriciteitsproductie zorgen. De meeste brandstofcellen worden als WKK-toepassing voorzien, met nuttig gebruik van de warmte.

De eerste vier types uit Tabel 1 kunnen worden gebruikt in stationaire WKK-toepassingen. De stationaire WKK-toepassingen kunnen gaan van residentiële installaties, tot commerciële en industriële toepassingen. We gaan later dieper in op de werking van PEM en SOFC, die momenteel het verst ontwikkeld werden.

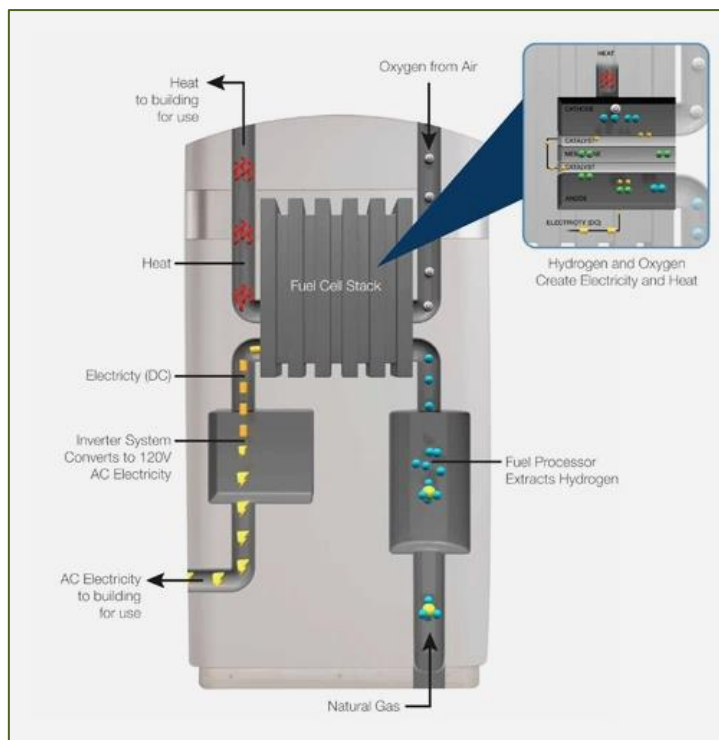
3.2 Opbouw van een stationaire brandstofcel-WKK

Verschiede soorten brandstofcellen kunnen een verschillende opbouw hebben. Figuur 1 toont een typische opbouw van een brandstofcel-WKK die werkt op basis van een brandstof zoals bijvoorbeeld aardgas. De voornaamste onderdelen zijn:

1. De hervormer die de brandstof omzet in waterstof.
2. De brandstofcel 'stack' die een elektrische stroom genereert.
3. Een vermogensomvormer die de elektrische energie omzet in een wisselstroom of gereguleerde gelijkstroom.
4. Hulpapparatuur.

De verschillende onderdelen worden eerst algemeen besproken en verder specifiek voor de voornaamste types (PEM FC en SOFC).

We wijzen erop dat we in deze studie naar het volledige systeem van de brandstofcel-WKK zullen kijken, dit is een totaalpakket dat gevoed wordt met aardgas (meestal) en warmte en elektriciteit genereert. In sommige artikels worden de brandstofcellen op zich of enkel de stack beschouwd en getest, veelal in labocondities en gevoed met waterstof. Dit kan niet vergeleken worden met het totaalsysteem in een reële toepassing.



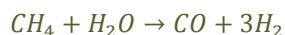
Figuur 1: Basisopbouw van een brandstofcel-WKK.

3.2.1 Brandstof hervormer

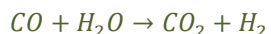
Stationaire brandstofcel-WKK's zoals hier besproken werken op een brandstof (meestal aardgas, maar dit kan ook LPG, biogas, industrieel afvalgas.... zijn) die door middel van *reforming* wordt omgezet in waterstof. De rol en de productie van waterstof worden verder in detail besproken het 'Addendum: De rol van waterstof'.

In het algemeen kunnen we bij het reforming-proces een 4-tal stappen onderscheiden:

- De zuivering van het aardgas. Vooraleer we methaan kunnen omzetten in waterstofgas moet het aardgas worden ontzwaveld. Zwavel kan verwijderd worden door een filter met actieve kool of door reactie met Zn. Ook de zwaardere componenten kunnen er eventueel uit verwijderd worden of verder gekraakt.
- De steam-reforming is de tweede stap en het hoofdproces, waarbij stoom van een hoge temperatuur reageert met het methaan tot waterstofgas en koolstofmonoxide. Dit gebeurt in aanwezigheid van een katalysator. Voor methaan is de reactie:



- Deze stap wordt steeds gevolgd door een water-gas shift reactie waarbij een deel van de koolstofmonoxide en stoom nog omgezet worden in waterstofgas en koolstofdioxide:



Merk dus op dat uit één methaanmolecule er vier waterstofmoleculen (H₂) worden gevormd!

- In een laatste stap wordt de uitgaande gasstroom gezuiverd van onzuiverheden, zodat alleen waterstofgas overblijft.

Reforming gebeurt op hoge temperaturen. Bij een lage-temperatuursbrandstofcel moet de brandstof dus eerst in een aparte reformer op hoge temperatuur worden gebracht (externe reforming). Deze externe reformer zit wel geïntegreerd in de systeemconfiguratie. Bij hoge-temperatuursbrandstofcellen zijn de condities geschikt voor een spontane interne reforming, waardoor er minder thermische verliezen optreden. In beide gevallen echter kan de vrijgekomen warmte nog nuttig gebruikt worden binnen de WKK, wat de globale brandstofbenutting ten goede komt.

Afhankelijk van het type brandstofcel zijn de eisen aan deze stappen verschillend. De anode van een SOFC is bijvoorbeeld gevoelig aan zwavel, vooral wanneer deze nikkel bevat. Hiervoor is de ontzwaveling dus zeer belangrijk. Langs de andere kant vormt CO voornamelijk een probleem voor het platinum in PEM's.

Om verliezen te beperken worden deze processen liefst zo min mogelijk in batch doorlopen, maar bij voorkeur continu wat thermische optimalisatie vergemakkelijkt. Omdat de reformer geïntegreerd zit in de systeemconfiguratie, zal het systeem als geheel steeds hoge temperaturen nodig hebben, en zullen ze meestal lange cycli draaien, ongeacht het type brandstofcel.

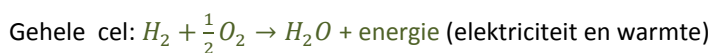
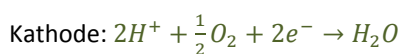
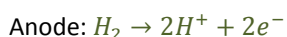
Hoewel bij het elektrochemische proces in de brandstofcel zelf geen CO₂ wordt gevormd (enkel water), gebeurt dit wél bij de brandstof-reforming.

3.2.2 Cel en stack

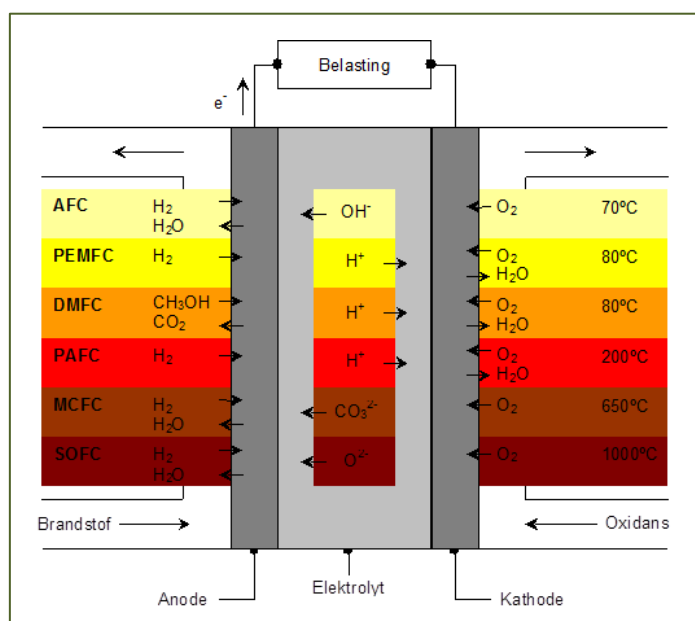
Bij de omzetting van waterstofgas en zuurstofgas in water(damp) komt veel energie vrij. Om deze omzetting te realiseren worden op atomair niveau elektronen uitgewisseld tussen de verschillende moleculen. Bij verbranding gebeurt dit chaotisch en zijn de verschillende tussenstappen in de reactie gelijktijdig aanwezig. In een brandstofcel worden de deelreacties fysisch gescheiden: ze vinden plaats op twee elektrodes die gescheiden worden door de separator. De brandstof (meestal waterstofgas) en zuurstof (meestal uit de omgevingslucht) worden elk aan een andere kant van de brandstofcel toegevoerd, respectievelijk de anode en kathode zijde. De elektrochemische reacties die elektriciteit produceren vinden plaats aan deze elektroden.

Elke cel bezit een separator (elektrolyt of membraan) die selectief geladen deeltjes (ionen) doorlaat van de ene naar de andere elektrode, maar ondoordringbaar is voor elektronen. Het is dit onderdeel dat in grote mate de levensduur van de stack zal beperken. Door vervuiling zal de separator op termijn minder ionen doorlaten en zal de elektrische efficiëntie verminderen. Bij wisselende belasting verouderd de stack nog sneller.

Bij de zure elektrolyten, die gebaseerd zijn op het transport van H^+ ionen, wordt water aan de kathode-zijde gevormd, bij de andere aan de anode-zijde (Figuur 2). Elke elektrode bevat tevens een katalysator die de reacties aan de elektrodes versnelt. De vrije elektronen worden via de anode over een extern circuit naar de kathode geleid onder invloed van een elektrochemisch potentieel over de elektrodes. Zodoende kunnen zij als nuttige elektrische stroom gebruikt worden. Men kan de werking vergelijken met een omgekeerde electrolyse van water. Samengevat zijn er twee reacties:



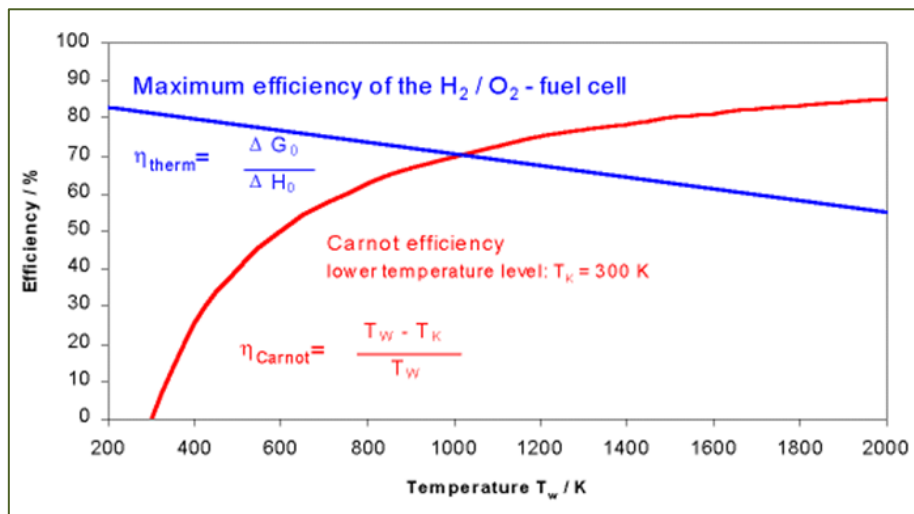
De reactie is exothermisch. De vrijgekomen warmte kan gebruikt worden in een thermisch proces.



Figuur 2: Werkingsprincipe en -temperatuur van de cel van de verschillende types brandstofcellen.

De maximale efficiëntie van een waterstof brandstofcel is in dit geval de verhouding van de Gibbs vrije energie en de verbrandingswaarde van de waterstof. Dit rendement kan theoretisch tot boven de 80% gaan. De Gibbs vrije energie is hoger is bij lage temperaturen; dus theoretisch hebben de lage-temperatuur brandstofcellen het grootste potentieel. Dit is net omgekeerd voor warmtegedreven processen.

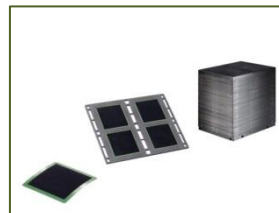
Uit één molecule methaan worden in de reformer (met toevoeging van stoom) vier waterstofmoleculen (H_2) gevormd, die in de brandstofcel worden omgezet in 4 watermoleculen. Hierbij kan men opmerken dat de condensatiewarmte in theorie tweemaal zo hoog als die bij een normale verbranding van aardgas, waarbij slechts 2 watermoleculen worden gevormd: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$.



Figuur 3: theoretische efficiëntie van een brandstofcel t.o.v. een klassieke WKK met Carnot-cyclus.

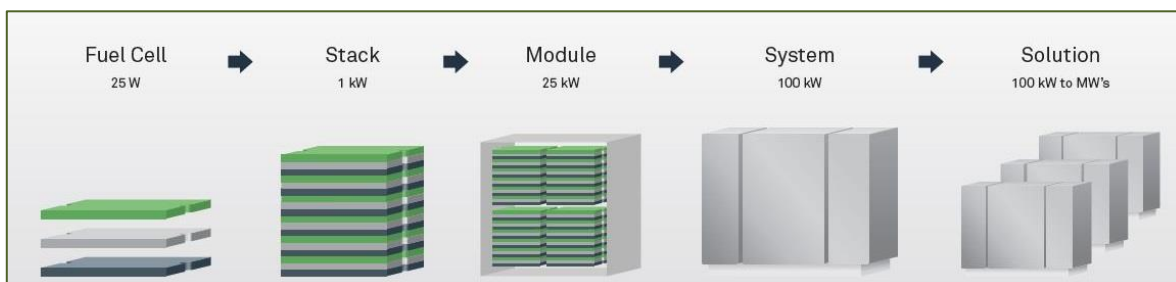
Een enkele cel produceert theoretisch 1,27 V; in de praktijk is dit 0,6-0,85 V. Het gepaste aantal cellen in serie produceert dan de vereiste spanning, terwijl met een parallelle opstelling het vereiste vermogen wordt geproduceerd (Figuur 4). De opeenstapeling van cellen vormt een stack.

Hierbij worden afzonderlijke cellen op elkaar gestapeld, waardoor de kathode van een cel wordt verbonden met de anode van de volgende cel. Tussen de verschillende cellen wordt er dan een bipolaire scheidingsplaat geplaatst. Deze plaat verzorgt de elektrische koppeling tussen de twee elektroden en houdt de zuurstof- en waterstoftoevoer gescheiden. Een ruggelingse opstelling zonder bipolaire plaat is ook mogelijk.



Figuur 4: Brandstofcel-stapel ('stack') bestaande uit individuele cellen.

Huishoudelijke brandstofcel-WKK's worden gemaakt met een enkele stack van ongeveer 1 kW. De hele opstelling is echter zeer modulair, zonder dat er veel aan de basisconfiguratie verandert. Dit maakt dat brandstofcellen gebruikt kunnen worden in een zeer breed gamma van vermogens, wat het eenvoudig maakt om eenheden te bouwen die een bepaald gewenst vermogen moeten leveren, en dus een potentieel economisch voordeel bij productie op grote schaal van identieke cellen. Hierdoor kunnen ze ook op de warmte- en elektriciteitsbehoefte van grotere gebouwen en bv. KMO's inspelen.



Figuur 5: Modules, systemen en totaaloplossingen.

3.2.3 De invertor

Over de stack staat een gelijkspanning evenredig met het aantal in serie geplaatste cellen. Een (doorgaans statische) invertor wordt dan gebruikt om die gelijkstroom om te zetten in wisselstroom met de gepaste spanning en frequentie (typische 20 à 40V voor een systeem van 1 kWe). De typische efficiëntie voor een invertor (< 10kW) is 85-95%. Bewaking van de stackspanning is belangrijk voor de levensduur.

Daarom is dit een belangrijke optimalisatieparameter in de ontwikkeling van brandstofcelgebaseerde WKK's.

3.2.4 Hulpapparatuur

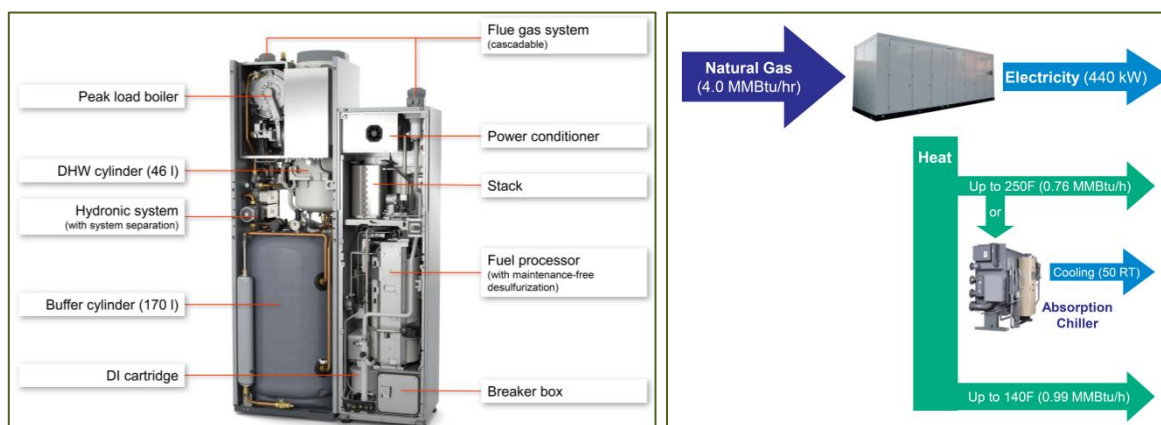
Het systeem bestaat verder nog uit een aantal types hulpapparatuur, zoals pompen, ventilatoren, warmtewisselaars, waterbeheerssystemen en meet- en controlesystemen. Deze hangen sterk af van het type brandstofcel (zie verder).

Deze systemen zijn nodig om de goede werking van het systeem te verzekeren en moeten net als de andere onderdelen goed aangepast zijn aan de noden van het systeem. Een efficiënte koeling is bijvoorbeeld nodig om de juiste werkingstemperatuur te behouden, maar ze mag ook niet te veel energie verbruiken, want dat kan de efficiëntie drastisch verlagen.

3.3 Systeemconfiguratie en inpassing

Naargelang de noden zullen nog onderdelen worden toegevoegd aan de stationaire brandstofcel-WKK om een totaalpakket te leveren.

Figuur 6 (a) geeft een voorbeeld van een stationaire brandstofcel-WKK die wordt toegepast in een woning. Een bijstookbrander kan hier bijkomende warmte genereren om aan een extra verwarmingsvraag in een woning te voldoen. Een buffertank kan het geheel in dat geval meer flexibel maken. Naargelang de grootte en de toepassing zullen andere configuraties worden opgesteld. In Figuur 6 (b) wordt een adsorptiekoeler gecombineerd met een brandstofcelmodule om koeling te bieden aan bijvoorbeeld een datacentrum.



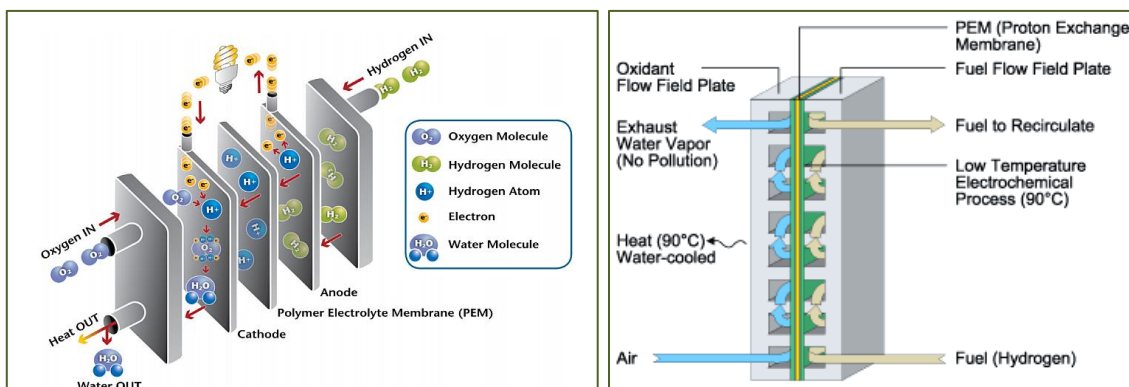
Figuur 6: Voorbeelden van een totaalstelsel (a) in een woning en (b) in een datacentrum.

3.4 De voornaamste types brandstofcel-WKK's

Vier van de types uit Tabel 1 worden gebruikt voor stationaire toepassingen, namelijk PEMFC, PAFC, MCFC en SOFC. We zien voor WKK-toepassingen momenteel vooral interessante ontwikkelingen in een systeem op lage temperatuur, namelijk de PEM FC (polymeer ionengeleidend-membraancel), en een systeem op hoge temperatuur, namelijk de SOFC (keramische brandstofcel). Daarom wordt de werking hier nader toegelicht.

3.4.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEM FC)

De PEM brandstofcel (Proton Exchange Membrane / Polymer Electrolyte Membrane) heeft een elektrolyt dat bestaat uit een vast membraan van polymeer, dat gespannen wordt tussen twee poreuze elektroden en dat alleen permeabel is voor protonen (Figuur 7). Met behulp van platinum als katalysator zal aan de anodezijde de waterstofmoleculen gesplitst worden in twee protonen en twee elektronen. De gevormde protonen migreren door het elektrolyt naar de kathode en recombineren hier met zuurstof en elektronen tot water.



Figuur 7: Werkingsprincipe van een PEMFC.

Het meest gebruikte systeem met de best ontwikkelde markt is de LT PEM (lage temperatuur) waarbij de werkingstemperatuur van de stack 70-110°C bedraagt en de werkdruk 1-8 atm. Ze hebben een bruto elektrische efficiëntie van de stack (niet van het totaalsysteem) van 30-50%.

Door de lagere temperaturen is externe brandstofreformatie nodig; de warmte die hierbij vrijkomt moet dus bij voorkeur nuttig gebruikt worden in een WKK-toepassing, om zo een hoog rendement te verzekeren. De warmte wordt meestal gewonnen uit de koelvloeistof die door de stack circuleert. Na verliezen door de warmtewisselaars heeft de vloeistof nog een geschikte temperatuur voor ruimteverwarming of productie van warm water. De warmte-krachtverhouding bedraagt ongeveer 0,7 – 1, dus gemiddeld hoger dan andere WKK's maar eens stuk lager dan een SOFC. Door deze relatief hoge warmteproductie (t.o.v. een SOFC) is dit type bijvoorbeeld voor verwarming in woningen (in combinatie met een bijstookbrander).

Het gebruikte platinum maakt het systeem duur en erg gevoelig voor CO. Een toevoer van zeer zuiver waterstof is dus nodig, wat een complexe reformer en zuivering vereist. Beide voegen kosten en complexiteit toe aan het systeem. Het membraan zelf is gevoelig voor metaalionen (soms afkomstig van corrosie in het systeem). Vanwege deze behoefte aan zeer zuiver waterstof zijn de PEM's optimaal voor kleine systemen. PEM FC eenheden met een vermogen tot 5 kW zijn verkrijgbaar op de markt.

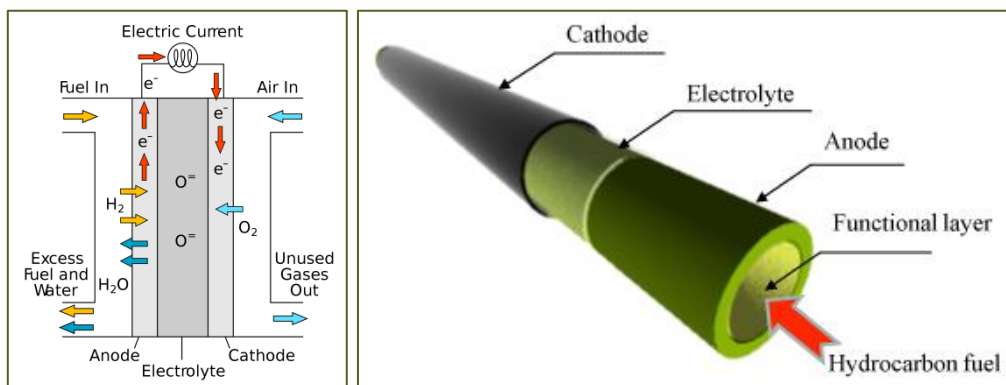
De regeling van de waterhuishouding is ook van groot belang omdat het membraan voldoende vochtig moet zijn om een goede protonengeleiding te verzekeren en zo een hoog rendement te garanderen. Er moet echter ook op toegezien worden dat het membraan niet te vochtig wordt, omdat dan de diffusie van waterstof en zuurstof door de elektroden belemmerd wordt. In beide gevallen zal het vermogen afnemen. Door vervuiling van het membraan zal de performantie afnemen, wat ook een effect heeft op de levensduur.

Door de lage werkingstemperatuur kunnen de brandstofcellen in principe snel opstarten, maar in de praktijk zal de opstartsnelheid vertraagd worden door het reformings-proces dat op temperatuur moet komen. De meeste systemen hebben dus ongeveer een uur opstarttijd nodig. Start-stops (bijvoorbeeld dag-nacht) zijn dus wel mogelijk maar vergen bijkomende energie, waardoor de efficiëntie zal verlagen t.o.v. de fabriekswaarden.

Er bestaan varianten van PEM brandstofcellen die op hogere temperaturen (160-180°C) werken (HT PEM). Het systeem is minder complex en minder duur, maar deze membranen gaan minder lang mee en zijn nog niet voldoende ontwikkeld.

3.4.2 Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)

De SOFC (solid oxide) brandstofcel is een systeem dat volledig in vaste toestand is, met een vast keramisch materiaal ($Y_2O_3ZrO_2$: yttrium-gedoteerde zirkoniumoxide) als elektrolyt. Het vaste materiaal heeft geen nood aan een strikt waterbeheer zoals bij PEM's. Het ionentransport vindt plaats met behulp van oxide-ionen, de katalysator voor de ionisatie van waterstof bestaat uit nikkel. Dit type werkt op hoge temperatuur, typisch tussen 500 en 1000°C.



Figuur 8: Opbouw van een SOFC brandstofcel

Omwille van de hoge temperaturen kunnen hoge reactiesnelheden bereikt worden zonder dure en zeldzame platina katalysators. Bovendien is interne reformatie mogelijk. Zonder platinum zijn ze minder gevoelig aan CO-vergiftiging. Omdat een verdere gasbehandeling dus niet nodig is, zijn deze systemen op dit vlak eenvoudiger en goedkoper in opbouw dan de PEM. De anode van een SOFC is wel gevoelig aan zwavel, vooral wanneer deze nikkel bevat (zoals in de meeste gevallen), de zwavel moet dus vooraf verwijderd worden.

De hogere temperatuur zorgt voor een langere opstartsnelheid en een complexer koelsysteem. Bovendien kunnen ze geen frequente start/stopcycli verdragen: een stack op hoge temperatuur die wordt afgezet riskeert te krimpen en te barsten. Ze zal dus ontworpen worden om continu te draaien; wel kan ze in deellast opereren.

SOFC's hebben een zeer hoge elektrische efficiëntie van 50-70% (bruto efficiëntie van de stack in labo-omstandigheden) en een kracht-warmteverhouding van meer dan 1. Daardoor leveren ze relatief veel elektriciteit in verhouding tot de warmte. De warmte komt voornamelijk van de luchtstroom die de kathode koelt en samen met de onverbrande brandstof de stack verlaat en in de naverbrander terecht komt. Deze warmte kan gebruikt worden in de pre-reformer of nuttig aangewend voor warm water of ruimteverwarming. De temperatuur van deze luchtstroom is een stuk hoger dan de vrijgekomen temperatuur bij een PEM FC.

Er zijn twee types SOFC's, de tubulaire en de planaire. Het tubulaire model bestaat het langst en werkt op hoge temperaturen (900-1000°C). Dit type heeft een redelijk hoge elektrische weerstand en dus een lage vermogensdichtheid, waardoor ze voornamelijk voor stationaire toepassingen worden gebruikt. Dit type brandstofcel staat nu het verst in de ontwikkeling en kent al verscheidene commerciële toepassingen voor

huishoudelijke brandstofcel-WKK's. Systemen tot 250 kW werden ontwikkeld met goede vooruitzichten voor de middelgrote en grote toepassingen in de industrie en de nutssector. Zo worden ze al veelvuldig gebruikt in datacentra.

Het planaire type werkt op 800°C of lager. De lagen hebben een lage elektrische weerstand, hierdoor bereiken ze een hogere efficiëntie en een hogere vermogensdichtheid. De lagere temperaturen stellen minder hoge eisen aan het materiaal waardoor goedkopere materialen kunnen gebruikt worden en waardoor celonderdelen minder snel degraderen. Het systeem kan ook sneller opwarmen en afkoelen. Wanneer dit type verder wordt ontwikkeld kent het een aanzienlijk potentieel voor stationaire opstellingen en transport. Systemen tot 25 kW worden al in testopstellingen gebruikt.

Nieuwe ontwikkelingen, zoals de dunne-film SOFC streven naar nog lagere temperaturen (350°C) zodat hogere opstartsnelheden en een betere regelbaarheid kunnen verkregen worden.

3.4.3 Overzicht

De keuze van het systeem zal natuurlijk van een heel aantal factoren afhangen. In Tabel 2 worden een aantal kenmerken opgesomd, deze worden nog verder in de nota besproken.

Tabel 2: Voornaamste technische en operationele kenmerken van een SOFC en PEM FC – WKK..

	SOFC	PEM FC
Type ionen en type elektrolyt	O ²⁻ ionen (gestabiliseerde keramische matrix met vrije zuurstofionen)	H ⁺ ionen (met anionen gebonden in polymeer membraan)
Katalysator	Nikkel	Platinum
Temperatuur	Stack op hoge temperatuur	Stack op lage temperatuur
Types	1. IT SOFC (intermediate temperature) 2. HT SOFC (high temperature)	1. LT PEM (low temperature) 2. HT PEM (high temperature)
Brandstof reformatie	Geen externe reformatie of zuivering nodig; aardgas kan direct gebruikt worden.	Brandstof reformatie nodig. Zeer zuiver waterstof nodig.
Bijkomende onderdelen	Complex koelsysteem. Ontzwaveling	Complex systeem voor reformatie en zuivering.
Onderhoud	Vervangen zwavelfilter.	Onderhoud filtersysteem is zeer belangrijk + stack moet sneller vervangen worden → hogere onderhoudskost.
Flexibiliteit	Langere opstartsnelheid + start-stops schadelijk voor de stack.	Relatief korte opstartsnelheid (opstartsnelheid van de reformer wordt belangrijker) + start-stops (bv. dag-nacht) mogelijk
Kost vs. levensduur	Gemiddeld goedkopere investeringskost maar snellere degradatie en sneller vermogensverlies.	Gemiddeld duurder maar stack gaat langer mee en verliest minder snel vermogen.
Kracht-warmteverhouding	Gemiddeld > 1 dus grote elektriciteitsproductie t.o.v. warmteproductie	Gemiddeld < 1
Bruto elektrische efficiëntie stack (HHV)	~50-70 %	~30-50 %
Netto elektrische efficiëntie totaalsysteem (HHV) ¹	~45-55 %	~25-35 %
Netto totale efficiëntie (HHV) ¹	~70-80 %	~60-75 %

¹ Gebaseerd op een brandstofcel-WKK's in reële toepassingen; geen labotesten.

4. Implementatie van brandstofcel als WKK

Nu we weten hoe een brandstofcel-WKK werkt, willen we een beeld krijgen van hoe deze technologie in Vlaanderen kan geïmplementeerd worden. Als COGEN zijn we in de eerste plaats geïnteresseerd hoe deze technologie zich verhoudt tot andere types WKK en hoe ze presteert op het vlak van elektriciteits- en warmteproductie, primaire energiebesparing en andere parameters die voor WKK's van belang zijn. Aan de hand van deze kenmerken gaan we in op een aantal praktische aspecten van de implementatie: voor welk soort toepassingen is de brandstofcel geschikt en met welke randvoorwaarden moeten we rekening houden om een project haalbaar te maken, bijvoorbeeld de juiste dimensionering, aansluitingen, kostprijs,...

4.1 Prestaties van brandstofcel-WKK's

WKK's hebben een belangrijke plaats in het energielandschap door enerzijds de primaire energiebesparing die ze realiseren door tegelijk warmte en elektriciteit te produceren, en anderzijds door het elektriciteitsnet te ontlasten en flexibiliteit te bieden in een energiesysteem met een toenemend aandeel hernieuwbare intermitterende bronnen. Op deze beide aspecten zal worden ingegaan i.f.v. brandstofcellen.

4.1.1 Productie van elektriciteit en elektrische efficiëntie

Hier moeten we duidelijk een onderscheid maken tussen de stack en het systeem. De efficiëntie van de **stack** is de elektrische output van de stack (DC) t.o.v. de verbrandingswaarde (onderste of bovenste) van de toegevoerde waterstof. Een klassieke elektriciteitscentrales (waarbij warmte wordt omgezet in elektriciteit), heeft een maximale waarde, die gelijk is aan het Carnotrendement. Deze limiet is bv. voor een rankinecyclus met een maximale stoomtemperatuur van 540°C en werkend op een omgevingstemperatuur van 25°C, gelijk aan 63,3%. Brandstofcellen daarentegen zetten de chemische energie van de brandstof rechtstreeks om in elektriciteit, zonder interventie van een vermogenscyclus. De maximale efficiëntie van een waterstof brandstofcel is in dit geval de verhouding van de Gibbs vrije energie en de verbrandingswaarde van de waterstof. Dit rendement kan theoretisch tot boven de 80% gaan en is hoger bij lage temperaturen (Figuur 3). In tegenstelling tot installaties op basis van warmtegedreven processen hebben de lage-temperatuur brandstofcellen dus het grootste potentieel. In de praktijk echter zorgen verschillende verliezen van de cel voor een verlies aan efficiëntie: weerstandsverliezen van zowel de ionen als de elektronen, activatieverliezen en diffusieverliezen. Deze verliezen zijn afhankelijk van de uitvoering van de cel, maar ook van de gasdruk en temperatuur. Hogere drukken en temperaturen zullen deze reduceren.

Daarnaast bekijken we het volledige **systeem** van de brandstofcel-WKK. De netto efficiëntie van het systeem is in dat geval gelijk aan de elektrische output van het systeem (AC) min het elektriciteitsverbruik van het systeem, t.o.v. de verbrandingswaarde van de brandstofinput (bv. aardgas). Door verschillende verliezen van het systeem, zoals de brandstofreformer, de invertor en de hulptoestellen, zal het globale systeemrendement een vijfde tot een derde verlagen. Daarom ligt het elektrisch rendement van een brandstofcel meestal rond de 30 à 55 % (HHV). Bij hogere temperaturen verlaagt de Gibbs vrije energie en dus het theoretisch maximum rendement, maar omdat bij deze temperaturen de verliezen minder zijn, zal de uiteindelijke efficiëntie van het brandstofcel-systeem stijgen bij hogere temperaturen.

Door degradatie van de stack zal de efficiëntie van een brandstofcel-WKK doorheen de tijd zakken (zie verder).

4.1.2 Productie en gebruik van warmte

Er zijn verschillende potentiële bronnen van bruikbare warmte in een brandstofcel en in een brandstofcel-WKK. Naargelang het type brandstofcel en de werking ervan zal de warmte aan een verschillende temperatuur beschikbaar zijn en kan die voor verschillende toepassingen gebruikt worden, zoals de productie van warm water voor sanitair of ruimteverwarming, stoom voor processen of sterilisatie in ziekenhuizen of directe toepassing van de warmte in processen zoals drogen.

De temperatuur van het systeem zal invloed hebben op de toepassing. Hoewel hogere temperaturen bij een SOFC beschikbaar zijn, moet men wel opletten dat de thermische output sterk zal afhangen van de watertemperatuur in het systeem voor warmterecuperatie: een lagere watertemperatuur zorgt voor een grotere warmtestroom door de warmtewisselaar en dus een hogere thermische output. In de praktijk merken we dat deze systemen vaak sterk gericht zijn op elektriciteitsproductie, en dat de warmteproductie als bijproduct wordt bekeken, en dat hier dus ook weinig optimalisatie naar gebeurt. Daardoor wordt de maximale thermische efficiëntie zelden bereikt (zie gemeten thermische efficiëntie in Kader 4 en ook energiebalans in Kader 1). Bijkomende opvolging en onderzoek is hier dus zeker op zijn plaats.

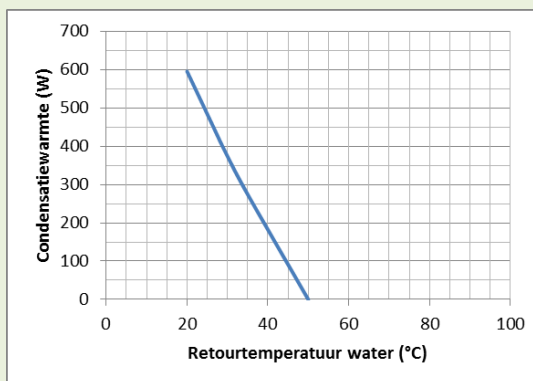
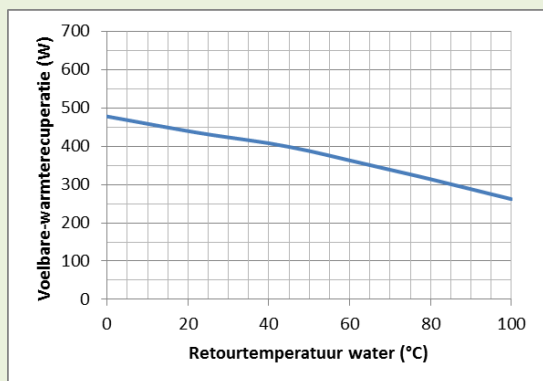
Kader 1 - Praktijkvoorbeeld: Opgemeten Energiebalans SOFC -WKK

Verschillende metingen werden doorgevoerd op een SOFC brandstofcel WKK (Bluegen, 1 kW), enerzijds door COGEN Vlaanderen, en anderzijds door EnTranCe aan de Hanze University of Applied Sciences in Groningen en in het Laboratory for heating technologies aan de Keulense Cologne University Applied Sciences. COGEN Vlaanderen maakte op basis hiervan volgende analyse van de energiebalans. We beschouwen hier in essentie de werkingpunten waarbij de elektriciteitsproductie 1500W is.

De toegevoegde energie wordt getransformeerd in elektrische energie en warmte, namelijk:

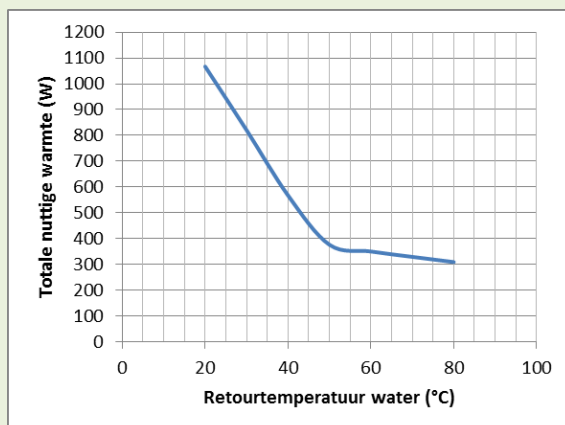
- 1) nuttige warmteproductie aan de uitgaande stromen van de brandstofcel (komt daar op ongeveer 200°C beschikbaar) die wordt overgedragen over een lucht/water warmtewisselaar aan een warm-watercircuit;
- 2) restwarmte (na de warmtewisselaar) naar de schouw;
- 3) warmte in de afvoer van het eventuele condensaat aan de warmtewisselaar (afhankelijk van het temperatuurniveau van het warm water circuit);
- 4) stralingswarmte van het toestel.

Uit metingen bij een retourtemperatuur voor het warm water in range van 24 tot 80°C kan de nuttige warmteproductie onderzocht worden die enerzijds bestaat uit de voelbare warmte van de uitlaatgassen en anderzijds de condensatiewarmte van de watercomponent in deze uitlaatgassen (zie onderstaande figuren).



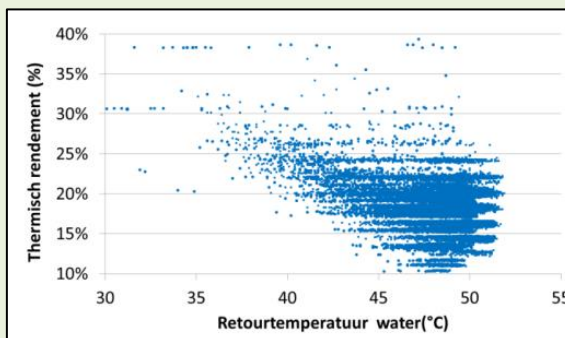
Hierbij kan men opmerken dat de condensatiewarmte in theorie tweemaal zo hoog als die bij een normale verbranding van aardgas. De totale recuperatie van warmte in het warmwatercircuit is de som van de voelbare warmte en de condensatiewarmte en wordt voorgesteld in onderstaande figuur. Hierbij werd een debiet van het warm water aangehouden van 2l/min (standaardinstelling van deze installatie).

Omdat de exacte samenstelling van het aardgas in het net varieert kan de exacte ligging van de figuur wijzigen naargelang de plaats van de installatie. Hier is de warmte in het condensaat ongeveer 0,5W/°C van de retourtemperatuur van het warmwatercircuit.



We concluderen dus dat de beschikbare warmte voor de warm-waterproductie zeer gevoelig is aan de temperatuur van het warm-watercircuit, meer nog dan bij een gewone verbranding vanwege de hogere condensatiewarmte. Vandaar dat een efficiënt gebruik van deze technologie thermisch gezien **best gekoppeld is aan lage-temperatuuroepassing** (bijvoorbeeld vloerverwarming).

Helaas merken we dat in veel opstellingen warmte op hogere temperaturen wordt gebruikt. In het voorbeeld uit Kader 4 werd bij een gemiddelde retourtemperatuur van 48°C slechts een gemiddeld thermisch rendement van 17% gehaald (LHV). In de figuur hieronder zien we dat dit komt omdat het toestel in deze opstelling een hoge retourtemperatuur heeft. Bij retourtemperaturen rond de 35°C wordt een thermisch rendement van 30% gerealiseerd en bij gelijkaardige metingen zag men dat de thermische efficiëntie bij een retourtemperatuur van 24°C opliep tot 40% (onder vollast dus bij een productie van 1500W elektriciteit). Een hogere thermische output is mogelijk bij nog lagere temperaturen maar deze zijn onrealistisch wanneer het systeem wordt ingepast als verwarming of voor warm water. Het gedrag onder deellast wordt verder besproken.



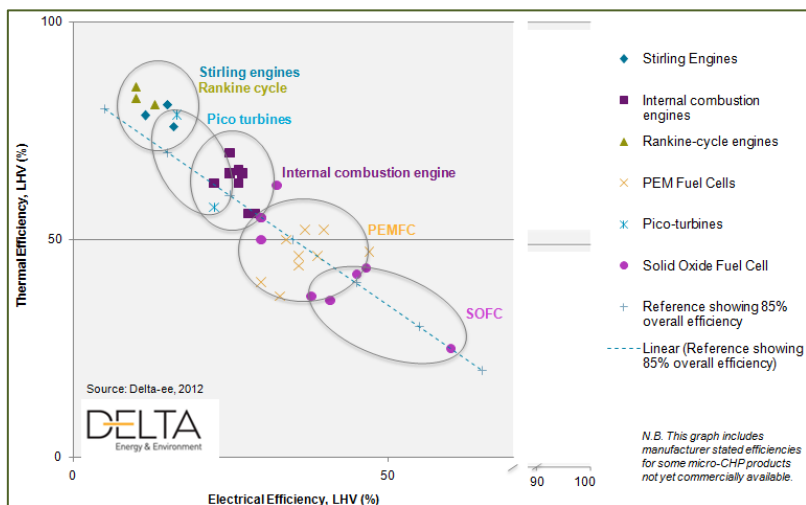
De stralingswarmte van de unit is beschouwd als de sluitterm in de energiebalans. Hierop werden tot nog toe geen metingen gedaan.

4.1.3 Warmte-krachtverhouding

Figuur 9 geeft de in de praktijk gerealiseerde thermische en elektrische efficiëntie weer voor verschillende types micro-WKK, waaronder de PEM en SOFC brandstofcel. T.o.v. andere technologieën produceren de brandstofcellen in verhouding meer elektriciteit dan warmte. De kracht-warmteverhouding zal voor een PEMFC rond de 0,7 – 1,0 liggen; voor de SOFC ligt deze ver boven de 1.

Dit verschil bepaalt niet enkel de keuze van de toepassing maar ook de bedrijfsvoering. Klassieke WKK-installaties werden steeds gedimensioneerd op de warmtevraag, waardoor ze beperkt werden in toepassingsmogelijkheden door een te lage warmtevraag of een te grote warmteproductie. In dat geval konden onvoldoende elektriciteit produceren en dus niet rendabel draaien, noch voldoende CO₂ besparen.

Brandstofcellen met een grote kracht-warmteverhouding zullen niet enkel meer geschikt zijn voor een toepassing met lage warmtevraag (zoals een nieuwbouwwoning), maar ze zullen ook minder afhankelijk zijn van fluctuaties in deze warmtevraag, zowel economisch als naar CO₂-energiebesparing.



Figuur 9: Rendementen van verschillende types micro-WKK.

4.1.4 Primaire-energiebesparing

De totale brandstofbenuttingsgraad van brandstofcel-WKK's bereikt typisch 80-90% (hoger bij een lagere retourtemperatuur, zie Kader 1). In ons rekenvoorbeeld met een SOFC leidt dit tot een warmte-krachtbesparing (WKB) die tot meer dan 34% kan oplopen. Dit is echter niet realistisch in een normale WKK-opstelling. Daarom wordt in Figuur 10 een rekenvoorbeeld van een SOFC met gemiddelde retourtemperatuur (57% elektrische efficiëntie, 23% thermische efficiëntie) verder uitgewerkt. De warmte-krachtbesparing bedraagt dan 28%.

Testen op PEM FC WKK's in Japan in reële woningsituaties tonen daar een primaire energiebesparing aan van ~20-25% en een CO₂-besparing van 30-40%

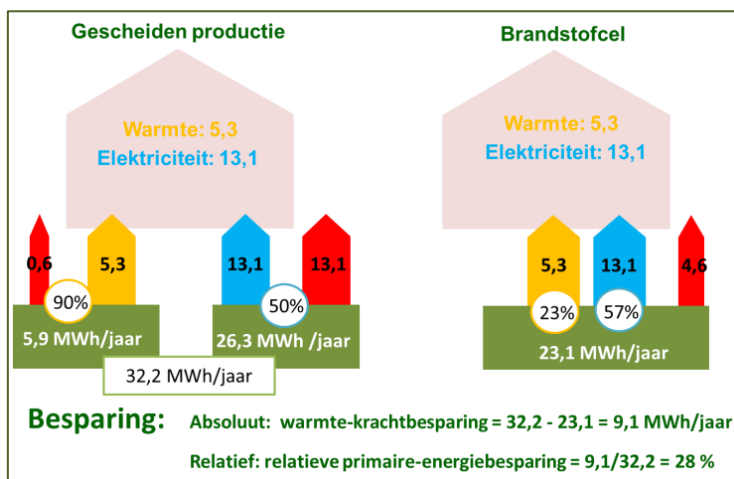
De berekende energiebesparing hangt af van de aannames van de efficiëntie van de brandstofcel maar ook van de gekozen referentiewaarden voor gescheiden productie van elektriciteit en warmte.

Let op: in dit geval bedraagt de totale brandstofbenutting 80% (ook wel de totale efficiëntie genoemd). Hoewel deze lager dan bij sommige klassieke WKK's of condenserende boilers, zal in veel gevallen de primaire energiebesparing hoger zijn. Ze is zeer hoog omwille van de relatief hoge elektriciteitsproductie t.o.v. een klassieke WKK.

Kader 2: Praktijkvoorbeeld

Meetcampagne SOFC-WKK 1,5 kW

	Bij retourtemperatuur van 48°C	Bij retourtemperatuur van 25°C
Totale brandstofbenuttingsgraad	71%	> 90%
Kracht-warmteverhouding	3,2	1,4
WKB	21%	> 34%



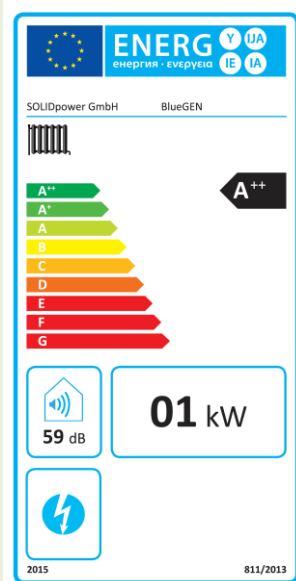
Figuur 10: Warmte-krachtbesparing van brandstofcel.

Merk tenslotte nog op dat indien de warmte van de brandstofcel helemaal niét nuttig gebruikt zou worden (wat overigens natuurlijk niet aan te raden is), dit t.o.v. de klassieke elektriciteitsopwekking toch nog een primaire energiebesparing van 12% oplevert.

Met dergelijke rendementen is de toepassing van brandstofcellen als decentrale energiebron vergelijkbaar met de toepassing van een zeer efficiënte STEG-centrale in combinatie met een duurzame/hernieuwbare bron van warmte-opwekking

Kader 3: Praktijkvoorbeeld: Efficiëntie en Energielabel

Sinds 26 september 2015 zijn alle ruimte- en combinatie-verwarmingstoestellen, dus ook kleine WKK's (< 50 kWel) onderhevig aan de 'Ecodesign en Energy Labelling' regelgeving. Ze moeten hierbij een minimale efficiëntie behalen, in een latere fase komen hier nog emissienormen voor stikstofoxides bij. Als vuistregel wordt aangenomen dat conventionele ketels waaronder condenserende ketels binnen categorie A tot G vallen. **Alle brandstofcellen voor ruimteverwarming die momenteel in Vlaanderen beschikbaar zijn krijgen de maximale score van A⁺⁺.**



4.1.5 Degradatie en levensduur

Vergelijken we brandstofcel-WKK's met ander (micro)-WKK's dan moeten betrouwbaarheid en levensduur zeker bekeken worden. Deze twee kenmerken zijn ook een voorname hindernis in de doorbraak van brandstofcelgebaseerde micro-WKK's. Een belangrijk kenmerk van brandstofcellen is immers dat het elektrolyt of membraan minder doorlatend wordt door vervuiling, waardoor de stack degradeert en de efficiëntie zakt. Verminderde katalytische activiteit vermindert ook de performantie. Zowel PEM FC's als SOFC's verliezen hun vermogen, tegen 0 à 5% per 1000 uur. Bij wisselende belasting degradeert de stack sneller.

Uit de metingen van COGEN Vlaanderen in de praktijk (zie Kader 4) blijkt dat een SOFC brandstofcel aanvankelijk 57% elektrisch rendement behaalt (LHV).

Door degradatie van de stack daalt de elektrische efficiëntie na bijna 1 jaar tot 51%. Omdat de hoeveelheid gas verhoogd moet worden om dezelfde hoeveelheid elektriciteit te produceren zal het thermisch rendement toenemen. Het totaalrendement daalt licht maar de RPE daalt sterk.

Door deze degradatie zakt de efficiëntie waardoor ze op een bepaald moment vervangen moet worden, maar mechanische slijtage van de cellen is gewoonlijk de beperkende factor.

Daardoor is de levensduur van de meeste toestellen nog beperkt en slechts verzekerd gedurende het servicecontract dat momenteel typisch 8 à 10 jaar loopt. Dit servicecontract omvat vaak het eenmalig vervangen van de stack.

Bij de keuze van een bepaald type of merk brandstofcel-WKK zal dus de levensduur in relatie tot de investerings- en onderhoudskosten een belangrijke parameter zijn.

Duurzaamheid en levensduur in relatie tot de kostprijs zijn voorname aspecten waarop lopend onderzoek zich inzet en hiervan wordt nog aanzienlijke vooruitgang verwacht.

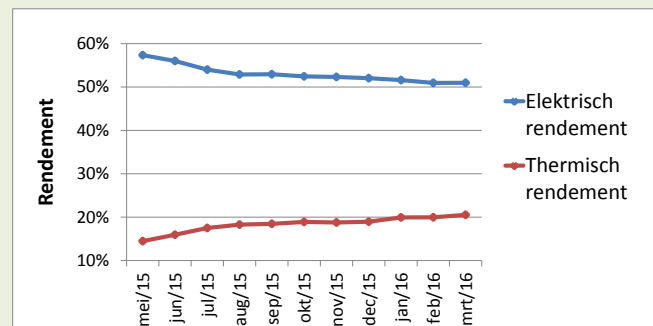
4.1.6 Flexibiliteit van brandstofcel-WKK's

Naast primaire energiebesparing is een van de grote voordelen van WKK het leveren van flexibiliteit. In het *Addendum: De rol van waterstof* wordt dieper ingegaan op de rol van waterstof als energiedrager en haar bijdrage aan een flexibel energiesysteem. Maar los van de waterstof is elke WKK intrinsiek stuurbaar en regelbaar en kan op die manier op- en afregelen, snel reageren op een vraag in de markt en bovendien gedurende lange periodes elektriciteit leveren wanneer er een tekort is. Voor de technische aspecten van de meest gangbare WKK-technologieën verwijzen we graag verder naar COGEN-studie van 2015 (*Flexibele WKK in het energielandschap van de toekomst*).

Hieruit blijkt dat de mate waarin het bieden van flexibiliteit mogelijk is sterk afhangt van enerzijds de technologie en anderzijds de toepassing waarvoor de WKK wordt gebruikt. Daarom zijn we ook sterk geïnteresseerd in de mogelijkheden van brandstofcellen.

De modulaire opbouw, de mogelijkheid van sommige types om te op- en af te schakelen en de mogelijkheid tot werken in deellast bieden perspectieven voor het aanbieden van flexibiliteit. Het lijkt ook logisch dat types die ook in de transportsector gebruikt worden over dergelijke eigenschappen beschikken. De werkelijke prestaties in deze condities zullen afhangen van de inpassing, de grootte en het type.

Kader 4 - Praktijkvoorbeeld: Meetcampagne SOFC 1,5 kW



Elektrisch en thermisch rendement van 1 gemeten SOFC brandstofcel (op basis van de calorische onderwaarde).

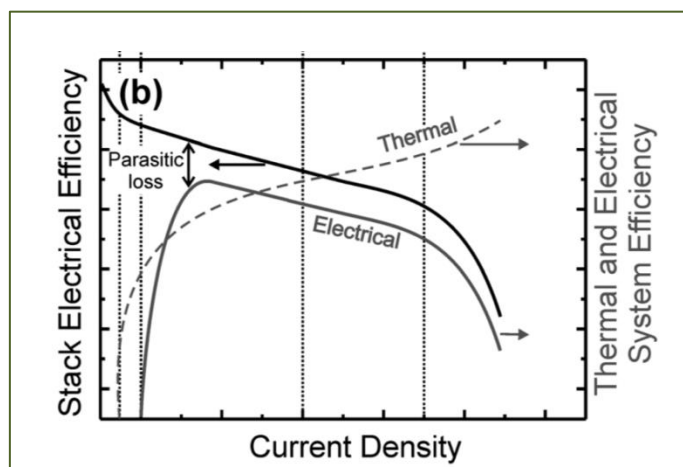
1) Op-en afschakelen

Frequent op- en afschakelen van brandstofcel-WKK's is enkel mogelijk bij systemen die werken op lagere temperaturen en dus snel kunnen opwarmen en afkoelen, bijvoorbeeld PEM's. Voor het proces van reforming zijn er echter toch hoge temperaturen nodig; zelfs indien de brandstofcel zelf op lage temperatuur functioneert. De tijd die nodig is om de reformer op temperatuur te brengen is in dat geval de bottleneck: een men moet een uur tijd voorzien. Bovendien zorgt de bijkomende energie die nodig is voor een opstart voor een lagere efficiëntie. Daardoor zullen de systemen bij voorkeur toch langere cycli draaien, ongeacht het type brandstofcel, en zullen zeer frequente start-stops vermeden worden.

In het Japanse ene.farm project draaien de PEM brandstofcellen tijdens de dag, wanneer er een grote vraag is naar elektriciteit. Op dat moment wordt warm water opgeslagen. De toestellen staan 's nachts af, wanneer er weinig vraag is naar warmte en elektriciteit. Elektriciteit wordt op dat moment afgenomen van het net.

Brandstofcellen op hoge temperaturen kunnen deze start/stopcycli niet verdragen. Bijvoorbeeld als een SOFC op hoge temperatuur wordt afgezet, kan de stack krimpen en barsten. Dit zorgt voor risico's op het lekken van waterstof en is dus onaanvaardbaar. Opstarten of afkoelen duren 12 tot 24 uur, daarom is een dergelijke brandstofcel ontworpen om continu te draaien en kan deze niet aan- of afgezet worden. Ze bieden wel de mogelijkheid om in deellast te draaien om flexibiliteit te bieden.

2) Performantie bij deellast

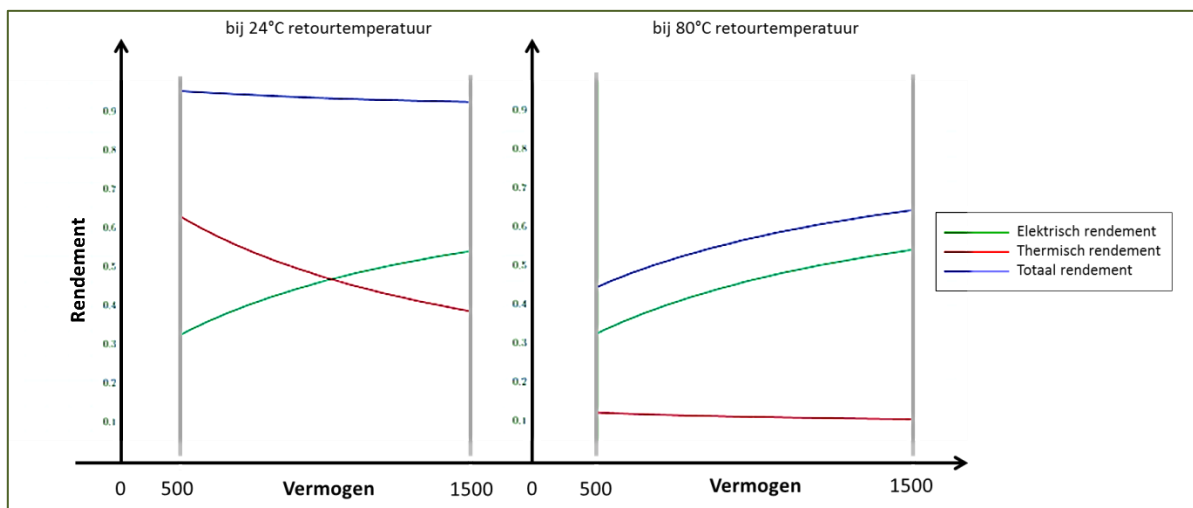


Figuur 11: Thermische en elektrische efficiëntie van de stack en van de brandstofcel (niet van de brandstofcel-WKK) bij wisselende lading.

Een brandstofcel-WKK als geheel vertoont een variërende elektrische en thermische efficiëntie bij een variërende elektrische belasting.

Afname van de elektrische belasting **van de stack** resulteert in een hogere elektrische efficiëntie (Figuur 11). Omdat er echter bepaalde componenten van het systeem een vaste hoeveelheid elektriciteit verbruiken, ongeacht de belasting, zal onder een bepaalde belasting de elektrische efficiëntie terug afnemen en op een bepaald punt (typisch 20% van het nominale vermogen) zelfs helemaal tot nul herleid worden. De thermische efficiëntie neemt toe met een toenemende belasting. Toch kan men er niet van uitgaan dat brandstofcel-WKK's beter opereren in deellast. Wanneer we namelijk het **totaalsysteem** bekijken, zorgt de trage respons van de brandstofreformer voor een dip in de brandstofbenutting, waardoor het deellastrendement van veel commerciële systemen veelal lager ligt dan bij vollast. Door verbetering van de reactie van de brandstofprocessor kan het systeem dus nog verder geoptimaliseerd worden.

De elektrische eigenschappen van een SOFC type Bluegen werden in een project onderzocht onder verschillende condities. Hieruit blijkt dat de maximale elektrische efficiëntie van 60% bereikt wordt bij vollast (1500W). Bij 500W wordt slechts 36% elektrische efficiëntie bekomen. Figuur 12 toont aan dat de afname in thermische efficiëntie wordt gecompenseerd door een toename in elektrische efficiëntie wanneer de elektrische output toeneemt. Als de temperatuur van het retourwater echter boven de 50° stijgt, zullen zowel thermische als elektrische efficiëntie een stuk lager zijn. De elektrische energie wordt dan het voornaamste dus de totale efficiëntie zal sterk afnemen in deellast.



Figuur 12: Veranderingen in rendement tussen vollast (1500W) en deellast (500W) van een SOFC.

Voor de dimensionering van een brandstofcel en de modus van opereren zal dus steeds een afweging moeten gemaakt worden tussen de nodige warmte-krachtverhouding, de efficiëntie (brandstofkost) en de grootte van de eenheid (investeringskost), in combinatie met de snelheid van degradatie die gelinkt is aan de elektrische belasting. We zien nog veel opportuniteiten om bestaande systemen verder te optimaliseren.

Voor de toepassing van bovenstaande figuur werd bijvoorbeeld geconcludeerd dat men bij toepassingen op lage temperaturen moet kiezen tussen de laagst mogelijke belasting (hoogste thermische efficiëntie) of de hoogst mogelijke belasting (hoogste elektrische efficiëntie), terwijl men bij hoge temperaturen zowizo moet kiezen voor vollast.

3) Snelheid van reageren

In principe is de elektrische respons van een stack bijna instantaan, hoewel de thermische respons zeker bij grotere stacks langer duurt. Er zal vooral een vertraging optreden omwille van de hulpapparatuur, vooral de brandstofprocessor. In bovenstaande proefopstelling werd ook gekeken naar de reactiesnelheid om in te spelen op een wisselende elektriciteitsvraag. Hierbij kan de BlueGen zijn vermogen verhogen met maximum 133 W per minuut (dit is zo intern geprogrammeerd). Men behoudt ook best een interval van 10 minuten tussen wijzigingen in het vermogen. Zeker wanneer het vermogen snel toeneemt, zal de gasstroom achterop lopen waardoor de goede werking van de brandstofcel in het gedrang komt.

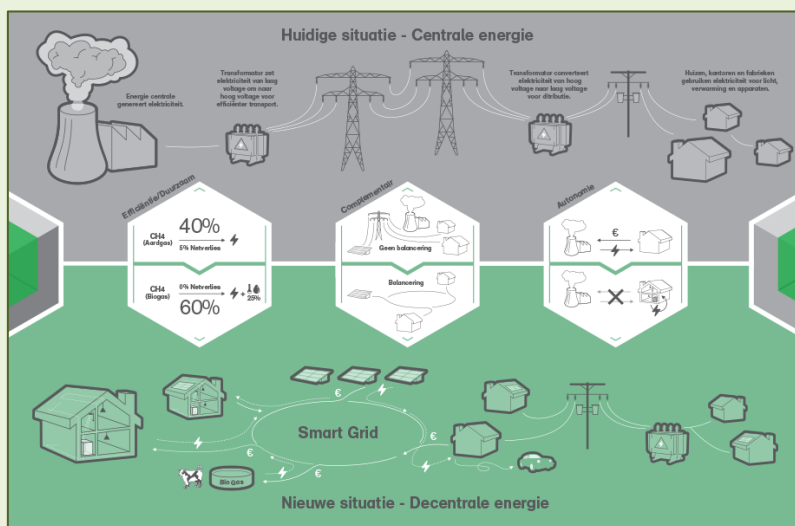
Om flexibiliteit te bieden is direct reageren met de brandstofcel op de wisselende elektriciteitsvraag van één huishouden over een dag niet realistisch zonder bijkomende opslagmogelijkheden. Momenteel wordt er in Nederland onderzoek gedaan naar het opvangen van pieken en dalen binnen één huishouden d.m.v. brandstofcellen met accu's en snelle elco's (condensatoren). Ook is het mogelijk om de flexibiliteit te vergroten door gebruik te maken van thermische buffering.

Een andere oplossing bestaat erin om brandstofcellen te laten inspelen op de noden van een wijk, met typisch een vlakker gebruikspatroon dan één enkel huishouden. Een testsite op kleine schaal wordt momenteel uitgebreid naar het project ‘Slimme Stroom Ameland’. Recent onderzoek in het kader van het ene.field project onderzocht de mogelijkheid van brandstofcellen in een slim net. Hierbij wordt opgemerkt dat het meest interessante model voor de netbeheerder er een zal zijn van vele geaggregeerde toestellen binnen bijvoorbeeld een Virtual Power Plant.

Het flexibel regelen van het gevraagde vermogen dient met de nodige aandacht te gebeuren. We verwachten dat deze mogelijkheden nog verder verbeterd en ontwikkeld zullen worden. Ook zal men moeten kiezen om regeltechnisch ofwel de elektriciteit ofwel de warmte bepalend te laten zijn.

Kader 5: Voorbeeldproject: Slimme Stroom Ameland

Het project Slimme Stroom Ameland zet zich in op decentrale netwerken waarin vraag en aanbod zo goed mogelijk op elkaar afgestemd worden. De brandstofcel generator (SOFC) maakt deze visie mogelijk en is een grote stap in de transitie naar duurzame decentrale energie. Door de hoge efficiëntie van de brandstofcel is het mogelijk om heel zuinig met gas om te gaan en zo met een grote CO₂-besparing lokaal energie en warmte te produceren op het moment dat andere duurzame bronnen dat niet kunnen (als het 's nachts niet waait – noch zon noch wind – en er wel energie nodig is). De brandstofcel technologie is daardoor complementair aan zonne- en windenergie en kan met zeer hoge efficiëntie en dynamisch regelbaar energie opwekken op de momenten dat dit nodig is en zo precies de lufte op het energienet aanvullen. Als de brandstofcel op biogas draait is de hele opstelling klimaatneutraal.



4.1.7 Emissies van brandstofcel-WKK's

Door de primaire energiebesparing zorgen WKK's per definitie voor een verlaging van schadelijke emissies. Brandstofcel-WKK's zorgen daarenboven voor nog minder emissies dan andere technologieën omdat er in het eigenlijke proces geen verbranding plaatsvindt. Dit genereert alleen maar water.

De eventuele emissies zijn afkomstig van het reformingsysteem dat de brandstof omzet in waterstof. De temperaturen van dit subsysteem zijn laag genoeg om vorming van NO_x te voorkomen, en hoog genoeg om CO en VOCs te oxideren. SO_x wordt bij voorbaat uit het systeem gefilterd omdat deze anders voor vervuiling van de katalysator kan zorgen. Wel wordt CO₂ gevormd bij de vorming van waterstof maar de uitstoot is lager omwille van het hoger elektrisch rendement.

Er wordt nagenoeg geen fijn stof gevormd; wat ook erg belangrijk is in de nabije omgeving van de installaties, bijvoorbeeld in een stedelijke omgeving.

Emissiewaarden van het systeem bedragen (< 2 ppmv CO, <1 ppmv NO_x en SO_x verwaarloosbaar – gemeten met 15% O₂, droge basis) (Figuur 13).

Emissions Characteristics	System 1	System 2	System 3	System 4	System 5
Fuel Cell Type	PEMFC	SOFC	MCFC	PAFC	MCFC
Nominal Electricity Capacity (kW)	0.7	1.5	300	400	1,400
NO _x (lb/MWh)	Negligible	Negligible	0.01	0.01	0.01
SO _x (lb/MWh)	Negligible	Negligible	0.0001	Negligible	0.0001
CO (lb/MWh)	Negligible	Negligible	Negligible	0.02	Negligible
VOC (lb/MWh)	Negligible	Negligible	Negligible	0.02	Negligible
CO ₂ (lb/MWh)	1,131	734	980	1,049	980
CO ₂ with heat recovery (lb/MWh)	415	555	520-680	495	520

Figuur 13: Gemeten emissiewaarden zonder bijkomende controlesystemen (IFC, 2015)

4.2 Dimensionering en haalbaarheid

4.2.1 Mogelijke toepassingen

De stationaire WKK-toepassingen kunnen gaan van residentiële installaties, tot commerciële, tertiaire en industriële toepassingen. Industriële toepassingen kunnen gaan van typische WKK-toepassingen (farmacie, chemie), bio-WKK in brouwerijen en afvalwaterzuivering tot het leveren van primair vermogen in datacentra.

Bij industriële toepassingen zal de elektriciteits- en warmtevraag voornamelijk worden bepaald door het industriële proces en vereist dus een projectspecifieke aanpak. Binnen de woningsector worden al langer micro-WKK toepassingen gebruikt (zie ook Figuur 9). Dat de brandstofcel t.o.v. andere WKK-technieken voor gebouwen een relatief hogere hoeveelheid elektriciteit produceert t.o.v. een relatief beperkte hoeveelheid warmte, maakt hem geschikt om ingepast te worden in nieuwbouwwoningen met een lage warmtevraag, eventueel enkel voor sanitair warm water. In dit segment van de woningen bestaat nog een aanzienlijk potentieel (zie verder). Verder zijn brandstofcel-WKK's geschikt voor een heel aantal gebouwen met zowel een warmte- als een elektriciteitsvraag, zoals in de commerciële sector, KMO's, appartementen, scholen, ziekenhuizen, zwembaden...

Kader 6: Praktijkvoorbeelden van energetische dimensionering huishoudelijke brandstofcel-WKK

Een familie (4 personen) met een recent gerenoveerde woning (goed geïsoleerd) zoekt een oplossing voor verwarming én sanitair warm water (start-stops moeten mogelijk zijn) en om haar elektriciteitsverbruik te verminderen. Daarom kiezen ze voor een LT PEM van **1 kW** met ingebouwde boiler (type Baxi Innotech Gamma) die 4000 uur per jaar zal draaien; wanneer er warmtebehoefte is (sanitair heel het jaar; verwarming enkel in de winter). De PEM in dit model levert 4.000 kWh elektriciteit op (dit dekt de behoefte) en 6.625 kWh warmte. De bijkomende warmtebehoefte wordt gedekt door de ingebouwde bijstook.

Een particulier heeft een goed geïsoleerde woning en een groot elektriciteitsverbruik omwille van een doorgedreven elektrificatie (18.000 kWh). Hij wil zijn stroomvoorziening vergroenen. Op dit moment boden zonnepanelen geen volledige oplossing (omwille van de terugdraaiende teller was het vermogen beperkt tot 10 kWp, onvoldoende om zijn behoefte te dekken). Hij koos voor een SOFC van **1,5 kW** met hoog elektrisch rendement die continu draaide (type Bluegen). Deze installatie levert continu elektriciteit aan een zeer hoog rendement: ~13.000 kWh per jaar. Een deel van de geproduceerde warmte (~5.000 kWh) kon hij gebruiken voor het sanitair warm water. Let ook op: het zogenaamde 'prosumentarief' (geldig bij alle installaties met terugdraaiende teller) bedraagt om en bij de 70-80 €/kW. Voor de installatie van 10 kWp aan zonnepanelen is dit dus 700-800 € per jaar. Met de bovenstaande brandstofcel van 1,5 kW is dit maar 100-120 € per jaar.

Een familie met een gemiddelde woning kiest voor een interessant product, namelijk een SOFC van **700W** (type Logapower FC10). De SOFC kan niet afgezet worden, men wil hem eventueel op sommige momenten terugmoduleren. Als hij echter op vol vermogen draait produceert hij ~5.500 kWh warmte (bijkomende vraag zal geleverd worden door de interne bijstook) en ~6.000 kWh elektriciteit. Voor zijn situatie zou hij misschien beter kiezen voor een PEM (meer warmte dan elektriciteit) maar hij besluit om de meeropbrengst aan elektriciteit (die zeer continu en voorspelbaar is) te gebruiken om 's nachts een elektrische wagen op te laden. Met slechts een kleine batterij zou het ook eenvoudig zijn om een groter overschot aan elektriciteit op te slaan; zo kan men slechts met een kleine batterij de volledige eigen behoefte dekken. Voor installaties die niet continu of voorspelbaar elektriciteit produceren is het niet mogelijk dit te doen; en zelfs om de eigen behoefte grotendeels te dekken vereist dit een veelvoud aan batterijen.²

² www.lemcko.be/d3o/

4.2.2 Modus van opereren + dimensioneren

Naargelang het type en de toepassing zal een brandstofcel eerder op de warmte- dan wel op de elektriciteitsbehoefte worden gedimensioneerd.

Om te voldoen aan een warmtevraag zal men een dergelijk toestel plaatsen ter vervanging of aanvulling van bestaande verwarmingstoestellen. Voor huishoudelijke toepassingen wordt deze markt aangedreven door de bouwmarkt en de keuze aan verwarmingssystemen. In de verdere ontwikkeling van deze markt zullen bestaande producenten en leveranciers van verwarmingstoestellen een belangrijke rol spelen.

Alternatief worden ze in de eerste plaats geplaatst als decentrale elektriciteitsopwekking. Hier wordt de markt gedreven door het maken van een winstgevende business case, vergelijkbaar met bijvoorbeeld PV. We merken op dat bij dergelijke installaties die gericht zijn op elektriciteitsproductie, de warmteproductie soms zelfs volledig als bijkomstig wordt gezien. Ze worden dan ook soms verkocht als mini-elektriciteitscentrales en geen WKK's. In sommige gevallen wordt de geproduceerde warmte niet, of niet volledig, nuttig aangewend. Enerzijds is dit jammer, want deze warmte is beschikbaar en zou beter gebruikt worden, om op die manier het totaal rendement te verhogen. Anderzijds worden bij deze toestellen elektrische rendementen gehaald die hoger zijn dan de gemiddelde centrale elektriciteitsproductie, dus zelfs indien ze de warmte niet nuttig gebruiken wordt er toch primaire energie bespaard t.o.v. de klassieke productie.

In Kader 6 geven we enkel praktijkvoorbeelden van keuzes naar type en dimensionering die voor huishoudelijke toepassingen gemaakt werden.

4.2.3 Ruimte

Brandstofcellen nemen relatief weinig plaats in, zeker in verhouding met andere decentrale producenten van elektriciteit. In een woning nemen ze niet veel meer plaats in dan een klassieke ketel. Waar geen PV-installatie of windturbine kan geplaatst worden omwille van bouwtechnische of ruimtelijke voorwaarden kan een brandstofcel toch een schone decentrale energiebron zijn.



Figuur 14: Een huishoudelijke brandstofcel-WKK in de kelder.

Ook op grotere schaal kunnen brandstofcellen op kleinere ruimtes worden geplaatst, zo werd berekend dat voor een zelfde vermogen er 3 keer meer ha nodig zijn voor PV en 7 keer meer voor windmolens dan voor brandstofcellen.

In dichtbevolkte gebieden zoals Vlaanderen kan dit een interessante oplossing zijn.



Figuur 15: De grootste brandstofcel-WKK centrale staat in Zuid-Korea op slechts 2 ha en levert warmte voor een warmtenet en 59 MW elektriciteit.

4.2.4 Installatie, aansluiting en onderhoud

In principe is een brandstofcel voor huishoudelijke of commerciële toepassingen eenvoudig aan te sluiten op het bestaande elektriciteits- en verwarmingssysteem van een gebouw. Ten opzichte van andere WKK-systemen wordt er meer elektriciteit dan warmte geproduceerd; en zal de elektrische aansluiting kritischer worden. De huidige beschikbare systemen moeten verbonden worden met het elektriciteitsnet om te kunnen opereren. De mogelijkheid bestaat echter om m.b.v. een extra batterij off-grid te werken.

Afhankelijk van het type brandstofcel, kunnen diverse koolwaterstoffen gebruikt worden als brandstof (diesel, benzine, aardgas, biogas...). De meest gebruikte types voor woningen werken echter op aardgas en vereisen dus een gasaansluiting. Dit is een opportuniteit in een land als België waar reeds een uitgebreid bestaand gasnetwerk ligt; zeker wanneer op lange termijn een vergroening van het gasnet voor een verdere koolstofreductie kan zorgen.

De eisen aan de kwaliteit van de brandstof evenals het benodigde onderhoud zullen afhangen van het type toestel. Zoals in Tabel 2 besproken zal bij een SOFC regelmatig de zwavelfilter moeten vervangen worden, terwijl een PEM een zuivere brandstof en dus een goed werkend filtersysteem nodig heeft.

Bij de meeste toestellen is een onderhoud om de 2 jaar voldoende, net zoals bij een klassieke gasketel.

4.2.5 Geluid

De stack zelf maakt geen geluid. De ventilatoren, pompen, verbranders etc. zullen wel geluid produceren, vergelijkbaar met dat van een condenserende boiler. Maar vergeleken met WKK's op basis van verbrandingsmotoren zullen brandstofcellen duidelijk stiller werken: 0-55 dB vergeleken met 70-80 dB.

Het lage geluidsniveau maken brandstofcellen zeer geschikt voor toepassingen in de residentiële en tertiaire sector (huizen, kantoor, hospitalen, hotels, etc.).

4.2.6 Financieel

Momenteel is de investeringskost voor een brandstofcel nog hoog. Daartegenover staat dat er een grote energiebesparing kan gerealiseerd worden.

Grote installaties moeten geval per geval bekeken worden; daarom geven we een mogelijk rekenvoorbeeld van een huishoudelijke SOFC installatie met de warmtekrachtbesparing die we berekenden in Figuur 10 (dus t.o.v. van een ketel met een seizoenrendement van 90% op onderwaarde), en kostprijs ~25.000€. Deze installatie zou ongeveer 1800 € per jaar opleveren wanneer we louter naar de energiekost kijken vergeleken met gescheiden

opwekking. Brengen we alle kosten en baten in rekening volgens een aantal veronderstellingen³ dan heeft deze installatie een terugverdientijd van 17 jaar.

Om tot een aanvaardbare terugverdientijd van bijvoorbeeld 8 jaar te komen zou de investering met ongeveer de helft moeten dalen naar 12.500 €.

Interessant is dat in Japan investeringssubsidies voor brandstofcel-WKK's de verkoop zo hebben gestimuleerd dat de verkoopprijs na 5 jaar tot de helft was teruggebracht (Figuur 23).

Om echter één en ander in perspectief te plaatsen maken we ook graag de vergelijking met de PV-ontwikkeling. Voor eenzelfde PE-besparing als een Bluegen die het jaar door draait heb je een PV-installatie van 4 kW nodig. Die kostte in 2009 eveneens ca. 25.000 euro. De steun die hiervoor gegeven werd was:

- 40% belastingsaftrek (federaal): 10.000 (gespreid over 3 jaar)
- certificaten: 1.830 euro per jaar gedurende 20 jaar of aan 5% verdiscontering een NCW van 22.800 euro, of 14.100 indien we enkel naar de eerste 10 jaar kijken.

Wij pleiten uiteraard niet voor een gelijkaardige aanpak als PV, maar willen hiermee wel onderbouwen dat ondersteuning voor technologieën die op zich nog niet rendabel zijn gerechtvaardigd kan zijn en een impact kan hebben op het prijsverloop. De ondersteuning moet dan uiteraard wel hoog en uitgebreid genoeg zijn om de markt wat in beweging te zetten (zie verder §5.3.2: Evolutes in kostprijs).

4.2.7 Brandstofcel-WKK in de EPB-berekening

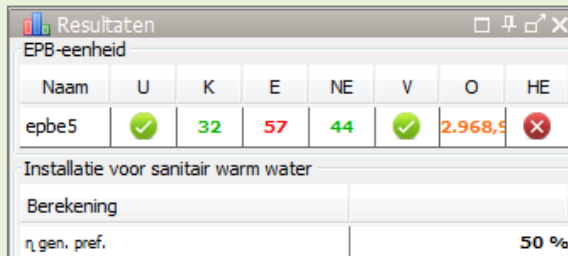
Er is binnen de huidige EPB-rekenmethode geen aparte rekenmethodiek voorzien voor brandstofceltechnologieën. Er zijn voor gebouwgebonden WKK-toestellen twee mogelijke categorieën: 'interne verbrandingsmotor' en 'anderen'. Brandstofcellen vallen daarbij uiteraard onder de tweede, generieke categorie. In ieder geval dienen voor een WKK-toepassing enkel thermisch en elektrisch vermogen opgegeven te worden, en kunnen er geen rendementen opgegeven worden. Wellicht werkt dit in veel gevallen in het nadeel van de brandstofcel, die een beduidend hoger elektrisch rendement heeft dan de overige technologieën (bijvoorbeeld de stirlingmotor). In 2016 zal COGEN een studie maken over 'WKK in de EPB-berekening', om de precieze berekingswijze in nader detail te bekijken.

Ondertussen hebben we de bestaande software gebruikt om de waarde van een brandstofcel-WKK in de EPB-berekening in te schatten. De impact van een brandstofcel op het resultaat hangt in de huidige rekenmethodiek sterk af van de toepassing. Wij zullen hieronder kijken naar de situatie waar enkel sanitair warm water (SWW) wordt bereid a.h.v. een SOFC-installaties. Daarnaast kijken we naar een PEM-installatie die zowel verwarming als SWW voorziet.

³ verondersteld: investeringskost 25.000 €; draait volcontinu; vermeden elektriciteitsprijs 200€/MWh; brandstofkost 50 €/MWh; prijs certificaten 31€; onderhoudskost 500 €/jaar (incl. vervangen stack); prosumentarief 100 €/jaar; geen meerproductie elektriciteit op jaarbasis.

Kader 7: Voorbeeld van een EPB-berekening

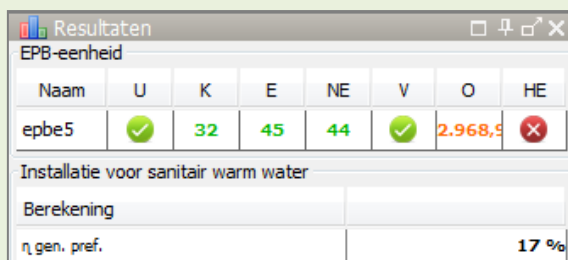
We gebruiken hiervoor de EPB-software versie 7.0.2., en vertrekken van een standaardwoning met K-peil 32, die op basis van een standaard condenserende gasketel op een E-peil van 57 uitkomt, en een netto-energiebehoefte voor verwarming van 44 kWh/m² (Figuur 16). Het primaire-energieverbruik voor verwarming bedraagt 58 808 MJ/jaar, voor SWW bedraagt dit 23 434 MJ/jaar.



Resultaten							
EPB-eenheid							
Naam	U	K	E	NE	V	O	HE
epbe5	✓	32	57	44	✓	2.968,5	✗
Installatie voor sanitair warm water							
Berekening							
η gen. pref.							50 %

Figuur 16: Resultaten van de EPB-berekening vóór inpassing van brandstofcel-WKK

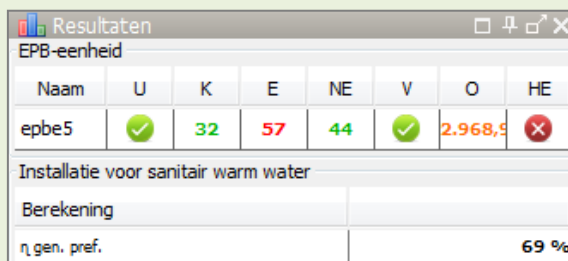
Wanneer voor de bereiding van SWW een brandstofcel wordt ingegeven (Figuur 17), dient enkel een thermisch en elektrisch vermogen ingegeven te worden (hier respectievelijk 0,6 kW en 1,5 kW). Daarnaast wordt aangeduid dat er warmteopslag aanwezig is. Dit heeft een sterk positieve impact op het E-peil: het daalt naar 45. Het primaire-energieverbruik voor verwarming blijft op 58.808 MJ/jaar, voor SWW stijgt dit naar 68.925 MJ, maar daartegenover staat een primaire-energiebesparing door WKK van 68.235 MJ. Het energieverbruik voor de productie van SWW wordt in de rekenmethode dus bijna volledig gecompenseerd door de primaire-energiebesparing van de installatie. Dit klopt overigens ook met de werkelijke situatie: het elektrisch rendement van de installatie is even hoog als dat van de referentie-centrale voor elektriciteitsopwekking – de STEG – waardoor de warmte die benut wordt zo goed als geen extra primaire-energieverbruik betekent.



Resultaten							
EPB-eenheid							
Naam	U	K	E	NE	V	O	HE
epbe5	✓	32	45	44	✓	2.968,5	✗
Installatie voor sanitair warm water							
Berekening							
η gen. pref.							17 %

Figuur 17: Resultaten van de EPB-berekening met brandstofcel voor productie SWW

Indien we een toestel gebruiken voor zowel de verwarming als de productie van SWW (Figuur 18), is het resultaat binnen de bestaande rekenmethodiek beduidend minder positief. Allereerst botsen we op een beperking van de huidige berekeningsmethodiek voor dit type van installaties: de klassieke aanpak van een WKK –installatie is de combinatie van de WKK met een aparte piek-ketel die piekbelastingen (of zeer lage belastingen) opvangt. Deze twee eenheden worden in de software apart ingegeven. De nieuwe brandstofceltoepassingen die ook voor verwarming ingezet kunnen worden, combineren echter beide functies in één toestel⁴. In principe dient dus het gehele toestel als één WKK-toestel ingegeven worden, met het totale thermisch vermogen en het elektrisch vermogen van de installatie als kenmerken (20 kW en 0,75 kW respectievelijk). Indien we dit als dusdanig ingeven, zien we dat er netto een licht negatief effect is op het E-peil: E 57. Het primaire-energieverbruik voor verwarming stijgt tot 69.781 MJ/jaar, dat voor SWW bedraagt 16.928 MJ/jaar en de primaire-energiebesparing door WKK bedraagt 4.343 MJ/jaar.



Resultaten							
EPB-eenheid							
Naam	U	K	E	NE	V	O	HE
epbe5	✓	32	57	44	✓	2.968,5	✗
Installatie voor sanitair warm water							
Berekening							
η gen. pref.							69 %

Figuur 18: Resultaten van de EPB-berekening met brandstofcel voor verwarming en productie SWW

Omwille van de rekenmethode wordt het rendement voor de opwekking van sanitair warm water hoger geschat dan bij de toepassing van aparte warm-watervoorziening. Wel wordt de primaire-energiebesparing die de installatie levert erg laag geschat. In combinatie met het toegenomen primaire-energieverbruik voor verwarming (aangezien een deel van de brandstof in elektriciteit wordt omgezet), levert dit netto een negatief effect op.

⁴ Dit geldt overigens ook voor de stirlingtoestellen die reeds op de markt zijn.

5. Analyse

5.1 Voornaamste voordelen en risico's

5.1.1 Voor de eindgebruiker

De voordelen voor de eindgebruiker (zowel huishoudelijk als voor bedrijven) zijn een besparing op de energiefactuur, een eenvoudige en kleine opstelling en een installatie met zeer weinig emissies of geluid. Bovendien is de installatie ervan eenvoudig en niet ingrijpend in de woningstructuur. Doordat de systemen modulerbaar zijn kunnen ze goed gedimensioneerd worden op de elektriciteits- en/of warmtevraag die ook kan wijzigen in de tijd; waardoor kostenefficiënt kan worden omgesprongen met de productie.

Uit onderzoek van DeltaEE (zie literatuur) blijkt dat potentiële eindgebruikers die een korte uitleg krijgen, meestal zijn aangetrokken tot de technologie (60-70% van de ondervraagden), en dat ze zelfs bereid zouden zijn om ongeveer 2000 € meer te betalen dan een condenserende gasketel, omwille van de voordelen.

Momenteel is de bewustwording echter laag.

Het voornaamste nadeel voor de eindgebruiker is de hoge investeringskost in relatie tot de relatief beperkte levensduur (zie verder paragraaf 5.3.2: Evoluties in kostprijs). Ook de verkoopkanalen werken voor brandstofcellen nog inefficiënt. Nu volgen ze dezelfde weg als gasboilers, maar omdat het een minder marktrijpe en een complexere technologie is verloopt dit nog niet vlot.

5.1.2 Voor het elektriciteitsnet

Brandstofcellen zullen in principe continu draaien (SOFC) of bijna continu (bijvoorbeeld een PEM die overdag draait en 's nachts afstaat). Dit zorgt voor een voorspelbare en continue elektriciteitsproductie. Dit is een groot voordeel voor het elektriciteitsnet; ten opzichte van minder voorspelbare intermitterende bronnen. Zoals eerder besproken kunnen brandstofcellen hierin verder gaan en flexibel inspelen op elektriciteitsvraag en -aanbod. Dit levert in combinatie met thermische buffering de mogelijkheid tot op- en afregeling.

Momenteel worden deze voordelen van kleine installaties echter nog niet volledig erkend en dus ook niet vertaald naar een financieel voordeel door de netbeheerders.

Men kan wel vele kleine installaties groeperen in slimme netten of 'virtual power plants' die, wanneer ze gecontroleerd aan- en afgeschakeld worden, kunnen participeren in bijna alle energiemarkten. De energie en flexibiliteit van producenten en gebruikers zou kunnen worden gegroepeerd en het afname- of feed-in-tarief kan dan wel gestuurd worden door commerciële impulsen.

Op dat moment moet men wel zoeken naar een juiste balans tussen de energievraag van de eindgebruiker, en de impulsen van het net.

Waterstof als energiedrager kan bovendien de flexibiliteit sterk verhogen en pieken van zon- en windenergie opvangen om later via brandstofcellen op het moment dat de vraag groot is elektriciteit te leveren (zie addendum). Het proces van elke brandstofcel kan in principe zelfs worden omgedraaid om waterstof te produceren bij overschotten aan elektriciteit. Zo kan men de waarde en inzet van duurzame elektriciteit maximaliseren.

5.1.3 Voor de maatschappij

Brandstofcel-WKK's bieden een aantal voordelen voor de maatschappij. Het belangrijkste voordeel is de realisatie van een belangrijke primaire-energiebesparing. Deze besparing gaat gepaard met een verhoogde leveringszekerheid: wanneer efficiënter wordt omgesprongen met primaire energie, dient minder energie geïmporteerd te worden. Brandstofcellen hebben bovendien bijzonder lage emissies van broeikasgassen en fijn stof, wat niet enkel lokaal of op stadsniveau (verbeteren van het leefmilieu, 'vermeden externe kosten') een voordeel biedt maar ook op klimaatschaal.

Ook de evolutie naar waterstof-gebaseerde toepassingen biedt perspectieven voor een milieuvriendelijkere energie-oplossing waardoor brandstofcel-WKK's voor een efficiënte productie van groene warmte en stroom kunnen zorgen.

5.1.4 Voor de overheid

Deze voordelen voor de maatschappij kunnen ten dele bijdragen aan beleidsdoelstellingen op het vlak van energie, klimaat of milieu van Vlaanderen, België of Europa, waardoor het zinvol is om de evoluties in de technologie op te volgen en te ondersteunen (Tabel 3).

Bovendien betekenen hightech ontwikkelingen bijkomende duurzame werkgelegenheid in een nieuw te ontwikkelen industrietak, die gedomineerd wordt door de noodzaak van hoogtechnologische innovaties.

Waterstofnet zegt hierover: de ontwikkeling van duurzame waterstof kan grotendeels met regionaal beschikbare technologie gerealiseerd worden. De huidige technisch-economische haalbaarheid dient nog verder verbeterd te worden (rendementen, levensduur, betrouwbaarheid, investeringskosten, exploitatiekosten), wat de basis kan zijn voor de definitie van innovatie- en demonstratieprojecten tussen regionale partners. Ze vermeldt hierbij ook de aanwezige technische kennis in onze regio, evenals het reeds bestaande waterstofnet en mogelijke perspectieven van een aantal processen in onze industrie waarbij waterstof als restproduct geproduceerd wordt.

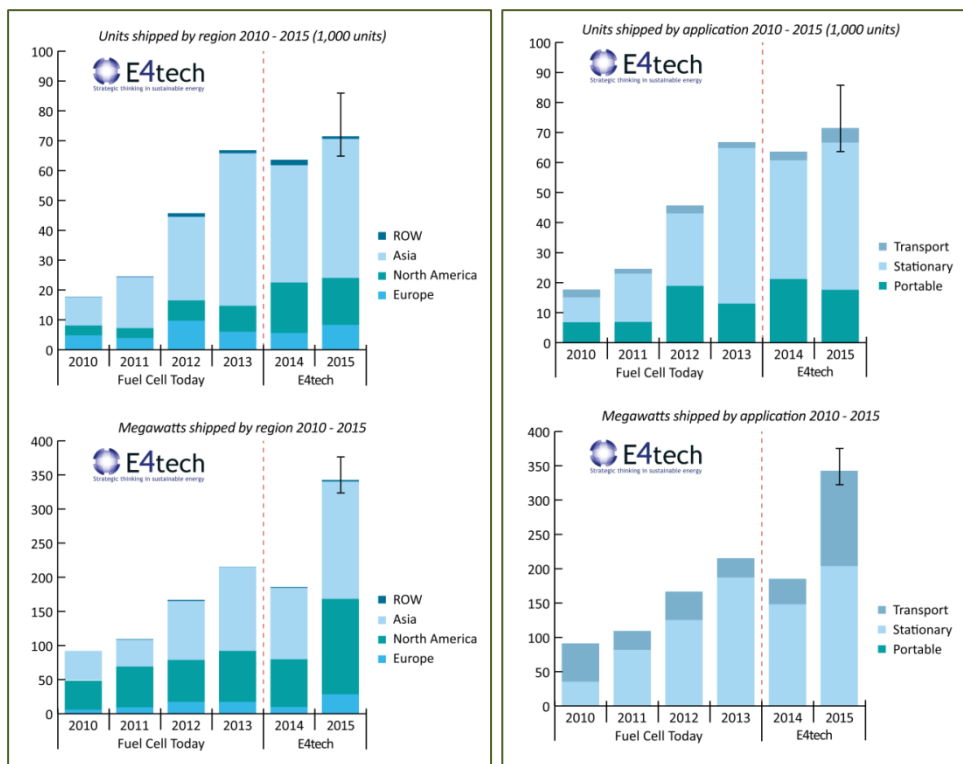
Naast evoluties op hoogtechnologisch niveau kan het ontwikkelen van deze technologie zorgen voor bijkomende ontwikkeling en werkgelegenheid bij KMO's, installateurs, studie bureaus, ...

Tabel 3: Relevante beleidsdomeinen milieu/energie/klimaat.

	Beleidskwestie en niveau	Relevante doelstellingen
Klimaat- energie doelstellingen	Europese Klimaat-Energiepakket voor 2013-2020	20% minder emissies en 20% primaire-energiebesparing (t.o.v. 1990)
	Europese 2030 doelstelling	40% minder emissies (t.o.v. 1990) (30% minder emissies voor niet ETS t.o.v.2005) 27% meer energie-efficiëntie (t.o.v. BAU)
	Vlaamse Regeerakkoord 2014-2019	Benadrukt de belangrijke rol die WKK inneemt bij primaire energiebesparing en bijdrage van WKK's in een energiesysteem met meer en meer variabele productie.
	Vlaamse Beleidsnota Energie	Het belang van WKK, zowel wat betreft het huidige park als het in te vullen potentieel, wordt hierin duidelijk onderstreept. Energie-efficiëntie wordt algemeen sterk beklemtoond. Volgens de nota moet het aandeel aan elektriciteit uit WKK toenemen. De marktomstandigheden zijn niet ideaal voor WKK, bijgevolg kan al dan niet financiële ondersteuning voorzien worden om bijkomende WKK's te ontwikkelen.
	Visie 2050: een langetermijnstrategie voor Vlaanderen (2.4.3 Een koolstofarme samenleving)	Vlaanderen zet in op de transitie naar een koolstofarm energiesysteem d.m.v. een realistische energiemix en een maximale energie-efficiëntie in alle sectoren. Vlaanderen moet minder afhankelijk worden van energie-invoer, waarbij men o.a. het potentieel van WKK maximaal wil aanboren. Efficiënte energieproductie zal het energiesysteem koolstofarm maken, maar dit vereist aanpassingen bij het energie-aanbod. Hiervoor zijn innovatieve doorbraken nodig.
Emissies	NEC-richtlijn (National Emission Ceiling) & Gothenburg-protocol	Absolute emissieplafonds voor NOx, SO2, NMVOS, NH3 voor de lidstaten (bij ons voor Vlaanderen); wordt momenteel herzien (doelstellingen voor PM2,5 en CH4 toegevoegd).
	WHO richtwaarden (wereldgezondheidsorganisatie)	Strengere richtwaarde voor pollutanten met als doel de gezondheid van de mens te beschermen.
Energie/ efficiëntie	Europese Energie-efficiëntie richtlijn (EED)	Legt bindende maatregelen op aan de lidstaten om tegen 2020 de energie-efficiëntiedoelstelling van 20% te halen. Artikel 14 verwijst specifiek naar micro-WKK in de potentieelstudie voor WKK van de lidstaten, ook veel andere artikels leggen verplichtingen op die relevant zijn voor micro-WKK, bijvoorbeeld het creëren van bewustwording, het invoeren van energie-audits, het verhogen van technische kennis bij installateurs, wegnemen van barrières in combinatie met informatieverspreiding en promotie van systemen voor energie-efficiëntie, verbeteren van energieservices in het energiesysteem, financieren van onderzoek, demonstratie en versnelde introductie van de technologie en verbetering van de efficiëntie van het elektriciteitsnet.
	Europese Resolutie micro-opwekking	In deze resolutie over de kleinschalige opwekking van elektriciteit en warmte wordt benadrukt dat de EED ambitieus moet worden toegepast voor micro-WKK.
	Federale/Vlaamse implementatie EED	Lidstaten moeten zelf indicatieve doelstellingen opstellen en om de 3 jaar een actieplan voor energie-efficiëntie voorstellen om deze doelstellingen te bereiken. Omdat de richtlijn veel flexibiliteit toestaat aan de lidstaten is een goede implementatie van groot belang.
	Europese Ecodesign Richtlijn voor energiegerelateerde producten en Richtlijn energie-etikettering	Richtlijnen die energie-efficiëntie-eisen en verplichte etikettering opleggen aan producenten voor energie-gerelateerde producten. Micro-WKK valt onder Lot 1 (verwarming). Implementatie gebeurt rechtstreeks in de lidstaten. Binnen deze klasse behalen de huidige brandstofcellen die op de markt zijn de hoogst mogelijke score (zie Kader 2).
Elektriciteit	Europese 'electricity market design'	De consultatietekst stelt o.a. dat er correcte marktgedreven prijsignalen moeten komen, voor het prijsniveau van de elektriciteit (ook op de retailmarkt) evenals voor nieuwe investeringen (bv. in flexibele capaciteit). Dit zal bijdragen tot het verhogen van de bevoorradingszekerheid.
Verwarming	Europese 'heating and cooling strategy'	De communicatie benadrukt de belangrijke rol van verwarming en koeling in de energietransitie naar een koolstofarme maatschappij. Benadrukt het belang van WKK in een koolstofarm systeem en het belang van flexibele WKK voor netondersteuning.
Woningen/gebouwen	Europese Richtlijn energieprestatie gebouwen (EPBD)	Nieuwe gebouwen moeten voldoen aan minimumeisen voor energieprestatie. Lidstaten moeten ervoor zorgen dat de haalbaarheid van alternatieve systemen waaronder WKK wordt overwogen.
	Vlaamse EPB-regelgeving	De Vlaamse EPB-regelgeving heeft een belangrijke impact op technologieën die in nieuwbouw (en ingrijpende renovatie) worden toegepast. De huidige rekenmethode is niet optimaal voor de inrekening van brandstofceltoepassingen.
	Renovatiepact Vlaanderen	In 2050 moet iedere woning energetisch grondig opgewaardeerd zijn. Micro-WKK zal bijdragen aan de verbetering van het e-peil. Brandstofcellen met hoge kracht/warmteverhouding zijn uitermate geschikt voor deze lage-energie woningen.

5.2 Stand van zaken

5.2.1 Groeiende wereldwijde markt



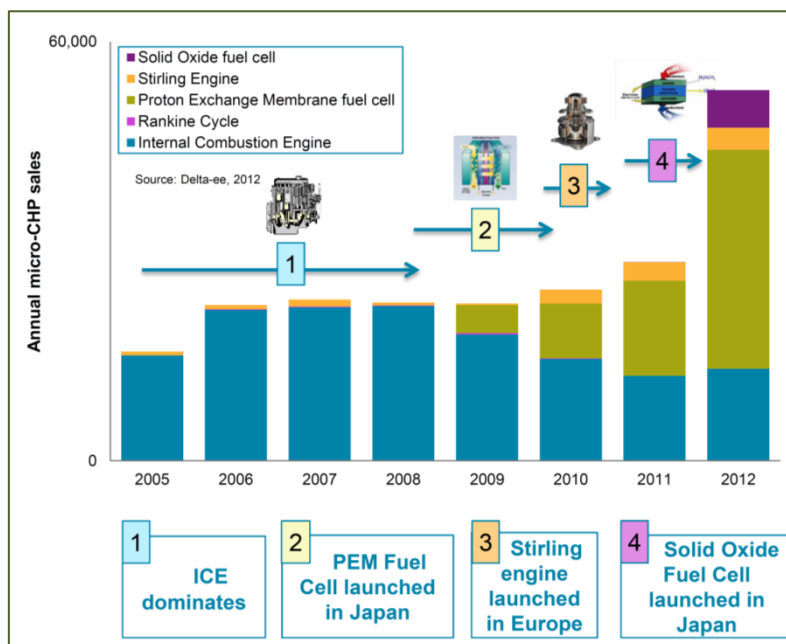
Figuur 19: Wereldwijde productievolumes per regio en per brandstofcel-toepassing.

Uit Figuur 19 blijkt dat het grote merendeel van alle verkochte brandstofcellen stationaire toepassingen zijn (niet enkel brandstofcel-WKK's). Het aantal verkochte stationaire installaties per jaar is ook erg toegenomen wat in 2015 leidt tot een verhoging van het vermogen met 203 MW wereldwijd. Europa is een kleine speler op de wereldmarkt, met slechts 10% van de productievolumes, wat te wijten is aan de zeer lage subsidiëring in vergelijking met de grote spelers.

Grote producenten van stationaire brandstofcellen zijn o.a. Panasonic, Toshiba en Aisin (bij de kleinere) en Doosan Fuelcell America, FuelCell Energy (FCE) en Bloom Energy bij de grote installaties.

5.2.2 Opkomst van residentiële brandstofcel-WKK

De markt heeft zich al zeer sterk ontwikkeld in Azië, waar de technologie al haar rendabiliteit en efficiëntie heeft bewezen. Het totaal aantal residentiële brandstofcel-WKK's dat in Japan alleen al werd verkocht bedraagt in 2015 meer dan 140.000. Dit succes was voornamelijk te danken aan het ene.farm project, een financieel ondersteuningsprogramma van de overheid. Hier werden vooral PEM's verkocht, hoewel SOFC's ook aan een opmars bezig zijn. Momenteel worden er op wereldschaal zelfs meer BC- μ WKK's verkocht worden dan micro-WKK's met een interne verbrandingsmotor of stirlingmotor (Figuur 20). Door dit succes zijn de prijzen in Japan zeer sterk gedaald.



Figuur 20: Wereldwijde jaarlijkse verkoop van micro-WKK's ≤ 5 kW.

Het succes van ene.farm in Japan kan echter niet zomaar herhaald worden. Andere factoren dan de financiële steun spelen immers ook mee, bijvoorbeeld de elektriciteitsprijs, het bewustzijn van de bevolking (denk maar aan Fukushima), ...

In Europa kwamen de eerste systemen op de markt begin jaren 90, maar hoewel we voorbij de R&D fase zijn, is het systeem nog niet volledig gecommmercialiseerd.

Daarom probeerde de Europese Commissie een gelijkaardig initiatief op te starten met het ene.field project in Europa, dat door financiële ondersteuning de productie van Europese brandstofcellen wil promoten. Ook eindgebruikers in verschillende landen kunnen onder het ene.field project brandstofcellen aankopen van verschillende producenten tegen verminderde prijzen. Vanaf 2016 is het ook voor Belgische eindgebruikers mogelijk om in dit project te stappen. Men mikt op 1000 installaties in totaal, waarvan er momenteel reeds een derde geplaatst is. Het project loopt af eind 2017 maar een nieuwe aanvraag voor een verlenging zit in de pijplijn.

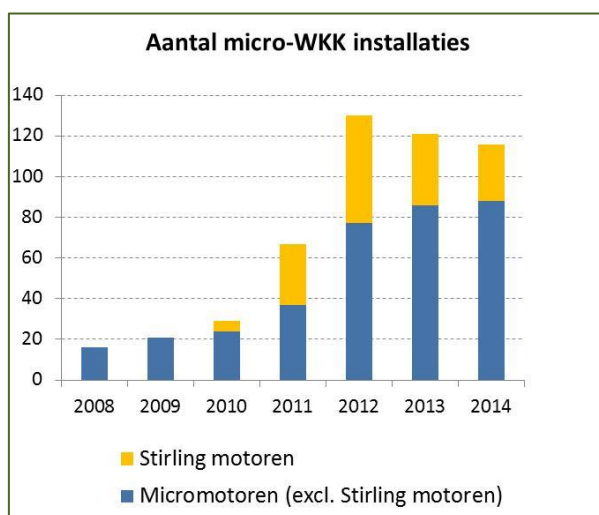
Een studie van Roland Berger toont aan dat verdere Europese demonstratieprogramma's nodig zijn om deze systemen succesvol ingang te laten vinden in residentiële toepassingen. De grootste impulsen in de markt zien we momenteel dan ook in de landen waar bijkomend steun wordt toegekend, zoals Duitsland en de UK.

Kader 8: Praktijkvoorbeeld: Duitsland en Callux

De Duitse overheid steunde R&D in brandstofcellen in het zogenaamde Callux demonstratieprogramma, omdat ze het belang erkende van de technologie. Onder dit project werden 500 installaties geplaatst. Voor een verdere uitrol werden zowel op nationaal niveau als in sommige deelstaten bijkomende subsidies gegeven. Nu de technologie volwassen is geworden wil men een echte marktintroductie stimuleren en in mei 2015 werd het licht op groen gezet voor een nieuw brandstofcel-WKK ondersteuningsprogramma, dat in de loop van 2016 van start gaat. Hiermee wil men de uitrol van duizenden eenheden per jaar stimuleren.

5.2.3 Stand van zaken in Vlaanderen

De technologie wordt nog maar sinds een tweetal jaren rechtstreeks verkocht op de Vlaamse markt. Momenteel zijn er een 15-tal stuks geplaatst. Als men weet dat er in heel Vlaanderen minder dan 120 micro-WKK's operationeel waren in 2014 (toen geen enkele brandstofcel), dan kan dit een aanzienlijke boost voor de micro-WKK markt betekenen. Producenten verwachten dat er volgend jaar minstens dubbel zo veel toestellen zouden staan.



Figuur 21: aantal micro-WKK installaties in Vlaanderen in 2014 (geen brandstofcel-WKK's).

Tabel 4 toont de producenten die momenteel actief zijn op de Europese en Belgische markt. Bovendien bewijzen de vakbeurzen in buitenland (VSK en ISH) dat er binnen 1-2 jaar nog diverse nieuwe types op de markt zullen komen.

Firma	Model	Type	Beschikbaar
Solid power	Bluegen (1,5 kW)	SOFC	Wordt sinds 2 jaar verkocht in België. Ook onder ene.field
Viessmann/Panasonic	VitoValor 300P (0,75 kW)	PEM	Wordt vanaf 2016 verkocht in België. Ook onder ene.field
Baxi Innotech	Gamma 1.0 (1 kW)	LT PEM	Verkocht onder ene.field
Dantherm Power	Dantherm (0,5-2 kW)	LT PEM	Verkocht onder ene.field
Hexis	Galileo (1 kW)	SOFC	Verkocht onder ene.field
Elcore	Elcore 2400 (300 W)	HT PEM	Verkocht onder ene.field
RBZ	Inhouse (5 kW)	LT PEM	Verkocht onder ene.field
Bosch/Junker	Cerapower (700W)	SOFC	Verkocht onder ene.field
Vaillant	Eco Power (1 kW)	SOFC	Verkocht onder ene.field
Solid Power	Engen (2,5 kW- 20 kW)	SOFC	Verkocht onder ene.field
Buderus	Logapower FC10 (700W)	SOFC	Verkocht onder ene.field
IE-CHP	1 kW, 10 kW	PEM	
IRD	1,5 kW	PEM	
Fuel Cell Energy Solutions GmbH (FCES)	MW's	MCFC	Actief in Duitsland
Ballard Clear Gen	MW's	PEM	Actief in Frankrijk
Nedstack	MW's	PEM	Actief in Nederland
AFC Energy	~250 kW	AFC	Actief in UK

Tabel 4: Beschikbare modellen brandstofcel-WKK's.

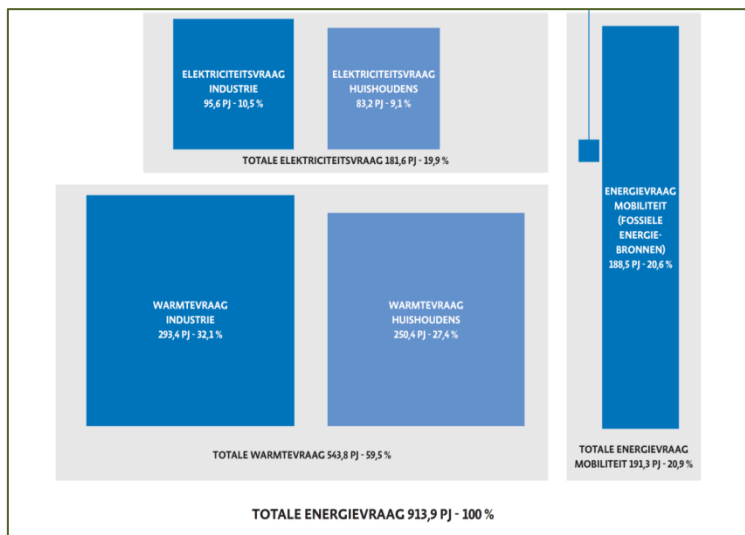
Momenteel vallen zowel de Bluegen als de Vitovalor onder het ene.field project en kunnen onder bepaalde voorwaarden met steun van het project geplaatst worden. Verdere subsidies beperken zich echter tot het bestaande certificatiesysteem, wat voor een 1,5 kW installatie slechts een 300 € per jaar oplevert.

5.3 Potentieel en evoluties

5.3.1 Inschatting van het technisch potentieel

Potentieelstudies voor WKK zullen zich baseren op de warmtevraag in Vlaanderen. Uit Figuur 22 blijkt dat de warmtevraag veruit het grootste deel van het finale energieverbruik in Vlaanderen opeist (60%), terwijl elektriciteitsverbruik en mobiliteit (elektriciteit niet meegerekend) elk ongeveer 20% van het energieverbruik voor zich nemen. Het aandeel groene stroom bedraagt 7,5% van het totale elektriciteitsverbruik (ofwel 14 PJ), dat van groene warmte 2,6% van het totale energieverbruik voor warmte/koeling (ofwel 14PJ). Bovendien is biomassa de dominantie groene stroombron (45% van de productie, gevolgd door fotovoltaïsche energie met 22%). Groene warmte wordt voor 100% uit biomassa geproduceerd, terwijl ook de hernieuwbare energie voor mobiliteit bijna integraal van biomassa afkomstig is (98% tegenover 2% groene stroom; vanwege de verplichte bijmenging van biobrandstoffen).

Zowel binnen de industriële als de huishoudelijke warmtevraag bestaat er een aanzienlijk potentieel voor stationaire brandstofcellen (brandstofcellen voor mobiliteit vallen buiten deze studie). Ze kunnen op die manier bijdragen aan een efficiënt energiegebruik van zowel fossiele bronnen als biomassa.



Figuur 22: Totale energievraag in Vlaanderen (uit ARGUS rapport, 2014)

De invulling van het potentieel binnen de industrie zal door de specifieke temperatuur niveaus tot een erg projectspecifieke aanpak leiden. Onze aandacht gaat bijzonder uit naar het potentieel binnen woningen en KMO's. Binnen de woningen zijn er zowel types van toepassing binnen de nieuwbouw als binnen de renovatiemarkt. Bij kleine bedrijven zijn vooral sectoren interessant met een warmtevraag, zoals bedrijven in de voedingssector (chocolatiers), car-washes, hotels, ...

Een potentieel inschatten is momenteel moeilijk, maar we gebruiken een aantal aannames om een zicht te krijgen op wat een potentiële uitrol van brandstofcel-WKK's kan betekenen naar primaire energiebesparing. In het CODE2 project van COGEN Europe werd voor België een inschatting gemaakt van de ketelmarkt en de jaarlijkse verkoop van ketels bij huishoudens en KMO's. Een voorzichtig potentieel voor de verkoop van micro-WKK in 2030 werd hiervan afgeleid, gebaseerd op de beschikbare alternatieven (zoals warmtepompen), de economische situatie, het huidige wetgevende kader, de mate van bewustwording bij de belangengroepen en de koopkracht. Dit potentieel wordt geleidelijk opgebouwd tegen 2030. Als we aannemen dat de helft van dit potentieel wordt ingevuld door brandstofcellen, dan betekent dit enkel in de gebouwensector (huishoudens en kleine KMO's) een primaire-energiebesparing voor België van 14 PJ/jaar.

België	Bij huishoudens (~0.5-5 kW)	Bij KMO's (~5-50 kW)
Bestaande ketels (2013)	2.200.000	450.000
Jaarlijkse verkoop (2013)	174.000/jaar	35.000/jaar
Potentieel micro-WKK (als % van de verkoop nieuwe installaties in 2030)	~40% van de jaarlijkse verkoop in 2030	~30% van de jaarlijkse verkoop in 2030
Potentieel brandstofcellen (als % van de verkoop nieuwe installaties in 2030)	~20% van de jaarlijkse verkoop in 2030.	~15% van de jaarlijkse verkoop in 2030.
Potentieel brandstofcellen (totaal aantal) in 2030	~180.000 eenheden	~35.000 eenheden
PEB	28% = 9 MWh / jaar per eenheid (cfr. Figuur 10) = ~6 PJ/jaar (in 2030)	28% = 61 MWh/jaar per eenheid (gebaseerd op 10 kW installatie) = ~8 PJ/jaar (in 2030)

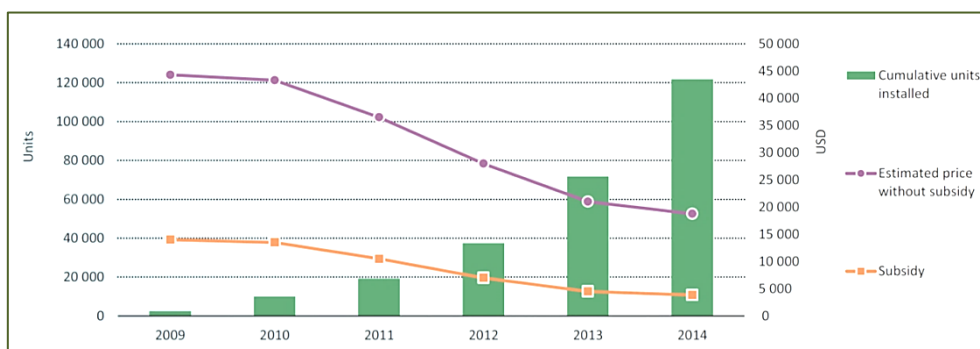
Tabel 5: Inschatting potentieel brandstofcellen 2030 (aan de hand van CODE2 studie).

5.3.2 Evoluties in kostprijs

Momenteel worden brandstofcellen in Vlaanderen reeds verkocht in een nichemarkt aan particulieren die overtuigd zijn van de voordelen. Nochtans is de investeringskost van deze nieuwe technologie nog zeer hoog, en kan er nog geen financieel voordeel gerealiseerd worden door de eigenaar. Deze hoge prijs is het gevolg van de lage productievolumes en de kost van materialen en onderdelen. Niet alleen de investeringskost is hoog maar ook de onderhoudskost. Hoewel we sterke verbeteringen opmerken, moet een stack om de 5 à 10 jaar vervangen worden, wat verweven zit in een (hoge) jaarlijkse onderhoudskost. Ook nevenapparatuur moet, naargelang het type, regelmatig vervangen worden, zoals filters tegen zwavel.

Zoals bij veel nieuwe technologieën zal de investeringskost dalen zodra de productie in omvang toeneemt; zoals men reeds heeft ondervonden bij condenserende boilers en PV-installaties, die dankzij een initiële steunmaatregel massaal zijn toegepast. Bij PV-installaties is hierdoor de prijs zo sterk gedaald dat ze op korte tijd rendabel zijn geworden zonder steun. Vaak wordt door producenten aangenomen dat de productiecost daalt met 15 à 20% zodra de productie verdubbelt.

Zo hebben investeringsubsidies voor brandstofcellen in Japan geleid tot een verkoop van meer dan 140.000 eenheden (2015) binnen het Ene-farm project (Figuur 23). Op deze figuur zien we ook duidelijk dat onder deze impuls de totale investeringskost met meer dan 50% is gedaald.

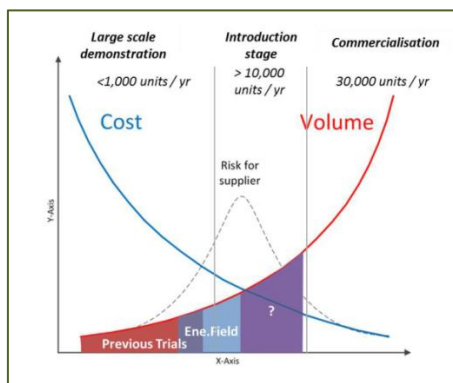


Figuur 23: Aantal verkochte installaties, investeringskost en hoeveelheid steun binnen het Ene-farm project

In Japan ging de kost merkkelijk omlaag zodra er 20.000 eenheden geïnstalleerd waren. In Europa verwacht men dat er 1.000 eenheden per producent moeten verkocht worden om een kostprijsverlaging van 10 tot 20% te bereiken.

Het is echter weinig realistisch dat dergelijke productieniveaus de komende 5 jaar in Europa gaan gerealiseerd worden. Producenten rekenen momenteel op de productie van 500 eenheden per jaar. Om dus van een nichemarkt te evolueren naar een commercieel product moet men over een tussenperiode heen geraken (Figuur 24), waarbij niet alleen inspanningen moeten geleverd worden door de industrie en de producenten, maar waarbij ook politieke en/of financiële ondersteuning noodzakelijk is.

Zodra een kostreductie is bereikt kunnen steunsystemen uitdoven, kan de industrie verder de Europese markt aanspreken en kunnen nieuwe financieringsmodellen worden opgesteld. Optimaal worden huishoudelijke brandstofcel-WKK's veelvuldig toegepast en gaan ze het potentieel van alle gas-verwarmde gebouwen kunnen aansnijden. Toch leren we ook uit het ene.farm project in Japan dat subsidiesystemen daar nog steeds niet helemaal zijn uitgedoofd. Met een doelstelling van 1,4 miljoen eenheden tegen 2020 kiest men momenteel om het steunstelsel nog niet stop te zetten, zoals aanvankelijk gepland.



Figuur 24: Verwachte daling in kostprijs van brandstofcellen in Europa (in het kader van het ene.field project).

5.3.3 Evoluties in materialen en technieken

Naast een vergroting van het productie-aantal zal de kost verder kunnen verlaagd worden door technische verbeteringen op verschillende terreinen. De stack draagt sterk bij tot de kost van het totaalsysteem, en zeldzame componenten zoals platinum, zirkoon en nikkel vormen nog een knelpunt. Meer en meer worden echter nieuwere goedkope materialen of technieken gevonden om deze te vervangen. Platinum wordt bijvoorbeeld momenteel al vervangen door de zogenaamde 'FlowCath' technologie, die veel goedkoper en bovendien duurzamer is. Ook andere onderdelen van het systeem kunnen beter en goedkoper; bijvoorbeeld een ontzwavel- systeem kost ongeveer 500 € en moet elke 4 jaar vervangen worden. Er worden echter alternatieve manieren onderzocht om te ontzwellen.

Veel fabrikanten hebben de laatste jaren sterk ingezet op het verbeteren van de technologie, bijvoorbeeld de PEM van Panasonic van 2015 zou t.o.v. die van 2013 een betere stack en een eenvoudiger systeem hebben, 15% minder onderdelen, minder gebruik van platinum, een daling van het gewicht van 90 naar 77 kg, terwijl de levensduur van 60.000 naar 70.000 uur gaat en een efficiëntie van 95% behouden blijft. Analog heeft Toshiba in 2014 een verbeterd systeem op de markt gebracht met hoger brandstofefficiëntie en dus hogere koolstofreductie, kleinere dimensies en een lagere kost. Dit model van de derde generatie is immers al 50% goedkoper dan de eerste generatie, door technische ontwikkelingen en een verhoging van het productievolume.

5.3.4 Evoluties in de productieketen

Door het grote succes van brandstofcellen in Japan lijkt het eenvoudig om deze goed ontwikkelde en sterk in prijs gezakte technologie over te brengen naar Europa. De verkoop van PEM-brandstofcellen in Japan was voornamelijk gericht op alleenstaande huizen, waarbij het vermogen werd aangepast om het gebruik in dergelijke woningen te optimaliseren. Niet alleen zijn elektriciteits- en warmtebehoefte in Europa of Vlaanderen anders, waardoor deze systemen niet op dezelfde manier kunnen ingepast worden in onze kontreien, ook verschillen in gaskwaliteit en gassamenstelling vereisen technologische aanpassingen aan de eenheden. Daarom kunnen deze technologieën uit Japan niet eenvoudig gekopieerd worden.

Hierover werd in 2015 onderzoek uitgevoerd door een stagiair bij COGEN Vlaanderen. Hij concludeerde dat een aantal toestellen uit de wereldwijde markt (vnl. Zuid-Korea en Japan) naar technische kenmerken en toepassingsmogelijkheden wel geschikt zouden zijn om te introduceren op de Vlaamse markt. De fabrikant zal dan het toestel meestal niet rechtstreeks importeren, maar een samenwerkingsakkoord opstellen met een Europese fabrikant om de brandstoftechnologie te implementeren in een Europees toestel, met de nodige afstellingen voor de Europese markt. Zo zien we inderdaad dat Panasonic samenwerkt met Viessmann, Toshiba met BDR Thermea (Senertec) en Aisin met Bosch (Buderus en Junkers).

In principe bestaat een productieketen van een brandstofcel uit twee belangrijke spelers: de producenten van verschillende deelcomponenten (bv. de reformers) en de finale assembleerder die de subonderdelen samenvoegt en het finale product levert.

In Japan wordt het produceren van onderdelen veelal uitbesteed (zoals bij ons bv. in de auto-industrie), maar worden er wel standaarden opgelegd waaraan de onderdelen moeten voldoen. Zo komen er meer spelers op de markt waardoor de markt van onderdelen kan groeien en verbeteren en waardoor competitie de kost kan drukken. In Europa wordt het maken van de onderdelen nog niet altijd uitbesteed, en is het moeilijk om te standaardiseren omwille van de zeer verschillende toegepaste technologieën en de eigen prioriteiten in onderzoek en ontwikkeling van de verschillende producenten. Ook het aantal finale producenten is nog eerder beperkt, want bij voorkeur is er een groot aantal producenten actief, zodat aan de vraag kan voldaan worden en competitie kan optreden. Toch zien we dit positief evolueren.

Ontwikkelingen in andere sectoren kunnen een meerwaarde blijken te zijn door overdracht van kennis en ervaring. We zien als voorbeeld de stacks van het merk Ballard, die gebruikt werden in zowel micro-WKK toepassingen (Dantherm) als transporttoepassingen (Vanhool bussen). Anderzijds zijn er ook synergiën met andere sectoren, vooral de verwarmingssector. Veel grote spelers in dit segment zijn nu betrokken bij de ontwikkeling en verdeling van brandstofcellen, bv. Vaillant, Viessmann, Bosch.... Ze kunnen zowel hun technische kennis van systeemintegratie gebruiken, als hun ervaring in marketing en verkoop.

In sommige gevallen kan ook een negatief effect optreden. Zo worden PEM's ontwikkeld voor zowel kleine stationaire toepassingen als voor elektrische voertuigen. De vereisten voor de twee toepassingen verschillen echter zo veel dat competitie optreedt tussen beide leveringsketens. Zo zullen de beperkte toeleveranciers van specifieke componenten hun inspanningen naar onderzoek en optimalisatie moeten verdelen. Bijvoorbeeld voor micro-WKK moet de stack in de eerste plaats een lange levensduur hebben en niet te snel degraderen en zal de toepassing in de grootteorde van 0.3 tot 5 kW liggen, terwijl voor voertuigen 50 tot 100 kW nodig is en de nadruk zal liggen op vermogensdensiteit.

6. Addendum: De rol van waterstof⁵

6.1.1 Kenmerken

De meeste brandstofcellen gebruiken waterstof als brandstof (hoewel er ook types bestaan op basis van methanol of ethanol). Hoewel de kleine stationaire systemen die nu commercieel op de markt komen allemaal vertrekken van aardgas, dat intern wordt omgezet in H₂, is het wel zinvol om even stil te staan bij waterstof als energiedrager en de manier waarop deze gebruikt wordt, of kan worden.

Waterstof (H₂) is in normale omgevingscondities een kleurloos, reukloos, niet-corrosief, niet-oxiderend, niet-radioactief, niet-kankerverwekkend en niet-toxisch gas. Waterstofgas is meer dan 14 maal lichter dan lucht, waardoor het bij vrijkomen zeer snel stijgt, wat voordelen heeft op vlak van veiligheid. De problematiek van LPG, dat in gasvorm zwaarder is dan lucht waardoor het gas tegen de grond blijft hangen, is daarom bij H₂ niet aanwezig. Net zoals bij aardgas ligt het kookpunt laag, waardoor er om het in vloeibare vorm te krijgen erg veel inspanningen (lees energie) toegevoerd moeten worden en dat het 'vloeibaar' houden van waterstof een aantal technische maatregelen vereist.

Waterstof heeft de reputatie een erg gevaarlijk gas te zijn in vergelijking met bijvoorbeeld aardgas. De combinatie van lage ontstekingsenergie en breed ontvlambaar gebied resulteert in een aantal specifieke eisen bij de selectie van elektrische en mechanische componenten in installaties waarin waterstof wordt gebruikt. Anderzijds is de temperatuur nodig voor een spontane zelfontbranding van een waterstofluchtmengsel zeer hoog: 585 °C.

6.1.2 Productie en opslag

Waterstofgas (H₂) komt in vrije vorm niet voor en moet dus actief worden geproduceerd. Het overgrote gedeelte (> 95%) van de waterstof wordt geproduceerd uit koolwaterstoffen via verschillende reformingstechnieken. Deze worden behandeld met stoom ('steam reforming'), zuurstof ('partial oxidation') of een combinatie van beide ('autothermal reforming'). Het waterstofrijke gasmengsel dat ontstaat bevat naast CO₂ ook CO dat bij toepassing in laagtemperatuurs-brandstofcellen nadelig is voor de levensduur van de anodekatalysator. Door enkele bijkomende chemische processtappen (water-gas-shift-reactie) wordt de CO verwijderd zodat het waterstofgehalte verhoogt.

Waterstof kan ook worden gevormd door elektrolyse, waarbij water door toevoer van elektrische energie bij een elektrische spanning hoger dan 1,23 V gesplitst wordt in waterstof en zuurstof. Dit proces is zeer eenvoudig en erg goed gekend, maar energie-intensief. Een belangrijk voordeel van elektrolyse is dat de geproduceerde waterstof en zuurstof een zeer hoge zuiverheid hebben. Voor de toepassing in brandstofcellen lijkt het op het eerste gezicht vreemd (elektriciteit toevoegen om waterstof te vormen, die terug wordt omgezet in elektriciteit). Dit wordt wel zinvol in een flexibel totaalsysteem, waarbij hernieuwbare energie op momenten van overschotten (zon en wind) wordt omgezet in waterstof, die dan op het moment dat er een elektriciteitstekort is via een brandstofcel kan gebruikt worden.

Waterstof wordt verder gevormd in de chemie als bijproduct van chloor. Nieuwe types zoals microbiologische brandstofcellen, of modellen op basis van vergassing van biomassa zijn nog in ontwikkeling.

⁵ Achtergrondinformatie afkomstig van [waterstofnet](http://waterstofnet.be).

Waterstof kan vervolgens worden opgeslagen, bijvoorbeeld in waterstof-tankstations, onder vloeibare of gasvormige toestand. Opslag en transport zorgen echter voor bijkomende moeilijkheden en energieverliezen. Daarom wordt het omzettings-proces tot waterstof in veel stationaire WKK-toepassingen geïntegreerd in de systeemconfiguratie.

Toch wijzen we erop dat België deel uitmaakt van één van de grootste leidingnetwerken voor waterstof ter wereld, dankzij de chemische industrie. Deze waterstof wordt voornamelijk gebruikt als chemische grondstof, maar indien waterstof als energiedrager doorbreekt, kan dit wel perspectieven openen.

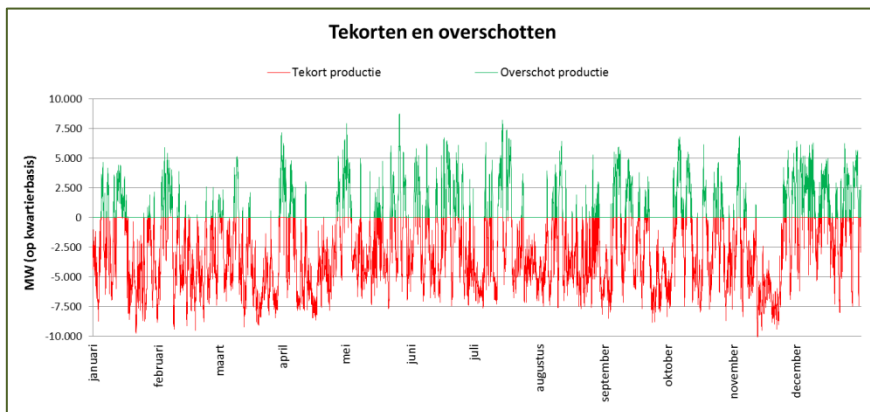


Figuur 25: Ondergrondse leidingen van o.a. waterstof (rood) van AirLiquide.

6.1.3 Waterstof in een flexibel energiesysteem

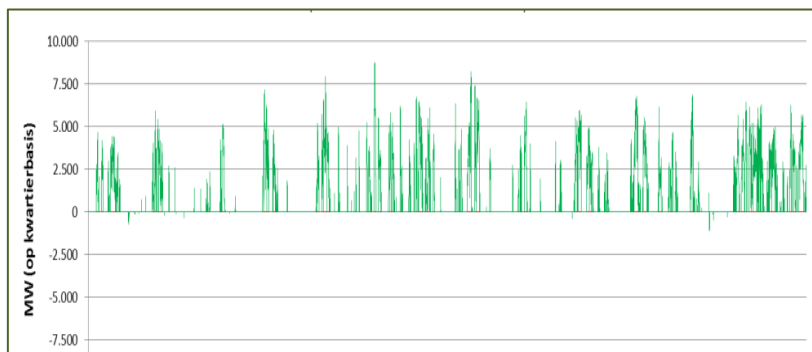
Met elektriciteit uit hernieuwbare bronnen zoals wind en zon energie kan waterstof worden gemaakt door elektrolyse van water. Deze productie- en opslagmethode van waterstof voor de energievoorziening is nu reeds van belang voor locaties waar de aanvoer van brandstoffen erg duur is en waar geen goede gas- en elektriciteitsnetten beschikbaar zijn. Ze wordt echter ook steeds belangrijker als onderdeel van een duurzame energievoorziening.

COGEN berekende de hoeveelheid tekorten en overschotten aan elektriciteit in real time benadering (dus op kwartierbasis) als men het high-scenario van de scenariostudie van VITO (2014) met een aandeel van 30% hernieuwbare energie in 2030 zou toepassen. Wanneer we enkel de must-run installaties bekijken (Hernieuwbare bronnen en het deel van de klassieke eenheden die om wettelijke of technische redenen niet afgeschakeld kunnen worden), dan zien we dat ze frequent meer produceren dan de afname, wat problemen kan opleveren voor de stabiliteit van het net.



Figuur 26: De overschotten en tekorten aan elektriciteit binnen het high-scenario voor hernieuwbare energie voor 2030.

Als men maximaal inzet op flexibele centrales, demand side management en import, kan men in principe belangrijke tekorten wel wegwerken, maar zit men nog steeds met grote overschotten die het net verstoren (Figuur 27).



Figuur 27: Overschotten en tekorten aan elektriciteit volgens het high scenario in 2030 met maximale inzet van flexibiliteit.

Een oplossing kan geboden worden door de ontwikkeling van power-to-gas, waarbij overschotten aan groene stroom gebruikt worden om waterstof te produceren, die als buffering van energie kan dienen. De geproduceerde waterstof kan in periodes van lagere elektriciteitsproductie met brandstofcellen terug naar elektriciteit en warmte omgezet worden. Alternatief kan dit ook worden geïnjecteerd in het bestaande aardgasnet (of waterstofnet) of omgezet worden in 'groen' synthetisch methaan voor toepassing in bijvoorbeeld een WKK.

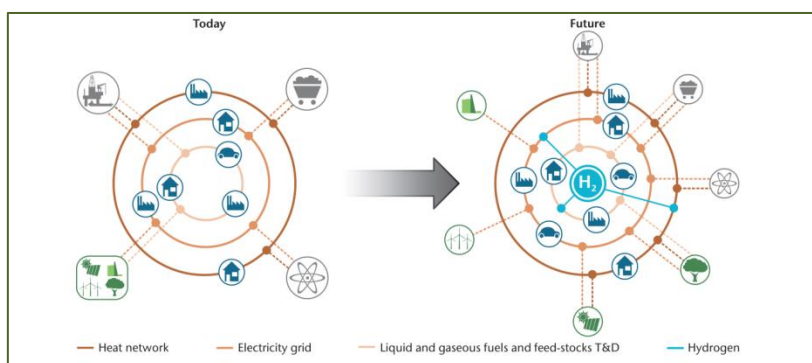
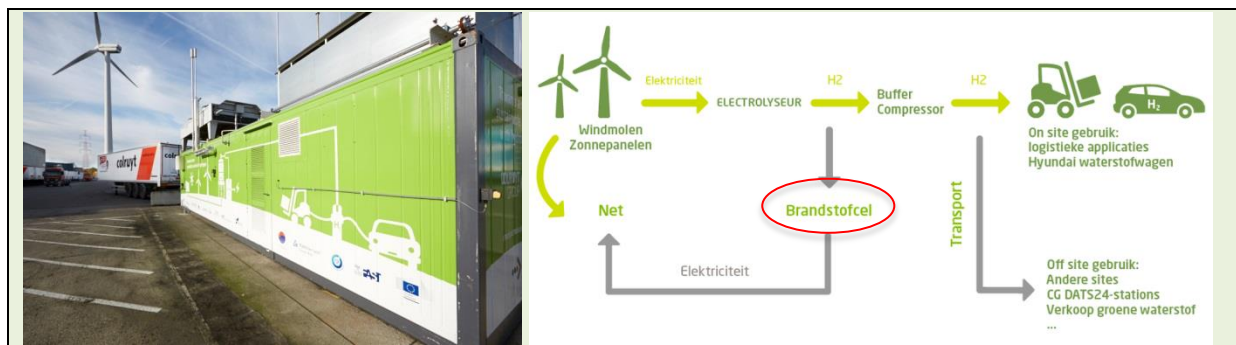
Dergelijke toepassingen hebben momenteel nog een hoge investeringskost, wat het gebruik voor enkel piekmomenten (dus weinig vollasturen) nog niet helemaal rechtvaardigt. Wat dan weer wel interessant kan zijn is het feit dat het proces van elke brandstofcel in principe kan worden omgedraaid⁶ en worden gebruikt om waterstof te produceren bij een overschot aan (hernieuwbare) elektriciteit, zonder een bijzonder grote meerkost. Momenteel worden dergelijke omkeerbare brandstofcellen verder ontwikkeld zodat de efficiëntie van de omzetting in de twee richtingen hoog blijft.

Kader 9: Praktijkvoorbeeld: Colruyt

Colruyt produceert in Halle zelf 100% groene waterstof met hernieuwbare energie afkomstig van windturbines en zonnepanelen op de site. Het waterstoftankstation kan 2,7 kg waterstof per uur aanmaken en tot 85 kg opslaan. Waterstof wordt hier gebruikt als transportbrandstof voor heftrucks, transpaletten en auto's met brandstofcellen, aangedreven door een elektromotor.

Op de site werden bovendien een PEM elektrolyser en een PEM brandstofcel van 120 kW geplaatst. De toepassingen van power-to-gas in een flexibel energiesysteem worden momenteel onderzocht.

⁶ Voorbeeld: [reversibele SOFC van Boeing](#).



Figuur 28: Waterstof als link tussen verschillende bestaande energiesectoren en -netwerken om de operationele flexibiliteit te doen toenemen.

6.1.4 Waterstof of elektriciteit

Zowel waterstof als elektriciteit zijn energiedragers, die beide een plaats hebben in het toekomstig energiesysteem, zowel voor energie-opslag als in de transportsector. Bij gebruik van klassieke batterijen voor de energieopslag worden de functies van opslag (energie uitgedrukt in kWh) en omzetter (vermogen, uitgedrukt in kW) direct aan elkaar gekoppeld. M.a.w. batterijen biedt maar voor een bepaalde tijd een oplossing voor bijvoorbeeld het wegvallen van zon en wind in het energiesysteem; daarna moeten ze weer opgeladen worden. Langere periodes van stroomtekort kunnen hiermee niet worden opgevangen.

Deze ont koppeling is wel mogelijk bij een bijkomende energiedrager als waterstof. Daardoor zijn brandstofcellen operationeel gezien een stuk tijdsefficiënter en flexibeler dan klassieke batterijen. Momenteel zijn er ook batterijen met vloeibaar elektrolyt (flow batteries) die deze ont koppeling toelaten.

Wat betreft de infrastructuur heeft elektriciteit het voordeel dat een uitgebreid, betrouwbaar elektriciteitsnet aanwezig is; anderzijds blijkt dat nu al extra maatregelen genomen moeten worden om de bestaande netten ‘intelligenter’ te maken. Door op een slimme wijze een gedeelte van de elektriciteit op bepaalde tijdstippen op te slaan in waterstof kan waterstof een belangrijke rol spelen in de ontlasting van de toekomstige intelligente elektriciteitsnetten.

7. Aanbevelingen/beleidsscenario's

Aan de hand van de gegevens verzameld in dit document, en discussies met stakeholders uit de sector, trekt COGEN Vlaanderen volgende conclusies. De brandstofcel-WKK is een waardevolle technologische innovatie die aanzienlijke voordelen biedt naar energiebesparing en vermindering van emissies. Hoewel de technologie nog aan het evolueren is en we nog verbeteringen verwachten op het niveau van o.a. materiaalgebruik, efficiëntie en levensduur, geven de reeds geïnstalleerde toestellen geen problemen bij de installatie of de werking en realiseren ze al een aanzienlijke **primaire energiebesparing**. Dit is voor COGEN een belangrijke voorwaarde, omdat we geen technologie willen ondersteunen die slecht functioneert, terug uit de markt genomen moet worden en zo een negatief imago voor WKK in het algemeen creëert.

Zowel binnen de industriële als de huishoudelijke warmtevraag in Vlaanderen bestaat er een aanzienlijk **potentieel** voor stationaire brandstofcellen die zo kunnen bijdragen aan een efficiënt energiegebruik. De invulling van het potentieel binnen de industrie zal door de verschillende temperatuurniveaus tot een erg projectspecifieke aanpak leiden. Onze aandacht gaat bijzonder uit naar het potentieel binnen woningen en KMO's. Binnen de woningen zijn er zowel types van toepassing binnen de nieuwbouw als binnen de renovatiemarkt. Door de grote kracht-warmteverhouding (t.o.v. andere huishoudelijke WKK-toepassingen zoals de stirling) is de brandstofcel-WKK zeer geschikt voor een lage-energiewoning. Bij kleine bedrijven zijn vooral sectoren interessant met een warmtevraag, zoals bedrijven in de voedingssector (chocolatiers), car-washes, hotels, ... Moesten we bijvoorbeeld de verkoop stimuleren en toegroeien naar een marktaandeel van bijvoorbeeld 20% van alle verkochte ketels in woningen in 2030 en 15% bij KMO's, dan zou dit tot een primaire energiebesparing leiden van 7 PJ/jaar in Vlaanderen.

De voornaamste **risico's** situeren zich in de levensduur (in relatie tot de kostprijs). Bijvoorbeeld de huidige huishoudelijke toepassingen garanderen slechts een levensduur rond de 10 jaar, waarbij vaak het inwendige gedeelte (de stack) nog eens moet vervangen worden. Dit zit meestal inbegrepen in het onderhoudscontract van de installatie, dus op zich is er voor de eindgebruiker geen groot risico, maar het zorgt wel voor extra besommeringen t.o.v. een andere installatie die langer meegaat zonder al te veel onderhoud; zeker voor kleine ondernemingen is dit van belang.

We zien dat de technologie nog op veel vlakken aan het verder ontwikkelen is: elke nieuwe generatie van de toestellen die we opvolgen heeft een langere levensduur van de stack, een betere werking... Uit de literatuur blijkt ook dat er nog veel **technologische ontwikkelingen** bezig zijn om de hoeveelheid zeldzame materialen te verminderen, de kostprijs te verlagen, de onderdelen te vereenvoudigen... Deze evoluties zijn gaande bij alle producenten en het is voor ons van groot belang om dit goed op te volgen.

Hoewel in 2015 in Vlaanderen slechts één type verkocht werd, verwachten we dat er vanuit het buitenland binnen enkele jaren verschillende andere modellen op de markt zullen komen, wat zal leiden tot een **verbreding van het marktaanbod**. Ook dit is van belang voor een verdere ontwikkeling.

In het buitenland (Duitsland, Europa, Japan...) worden grote inspanningen geleverd om d.m.v. een tijdelijke investeringssteun de hoge **investeringskost te verlagen**. Het rekenvoorbeeld voor een huishoudelijke installatie toonde aan dat een halvering van de huidige investeringskost zou leiden tot een redelijke terugverdientijd van 8 jaar. Zelfs met de momenteel beperkte levensduur van 10 jaar heeft men op die manier energie en kosten bespaard en op een duurzame manier warmte en elektriciteit geproduceerd. In Japan is men tot een halvering van de kostprijs kunnen komen na slechts 5 jaar investeringssubsidies die tot een grote verkoop van het aantal installaties hebben geleid. Eenzelfde fenomeen hebben we gekend bij de PV-sector in Vlaanderen, waarbij de uitgereikte subsidies de investeringskost bijna volledig dekten. Door een dergelijk steunpakket is de kostprijs

van PV-installaties in Europa aanzienlijk gedaald. Hiermee wordt bewezen dat ondersteuning voor technologieën die op zich nog niet rendabel zijn gerechtvaardigd kan zijn en een impact kan hebben op het prijsverloop.

Beide evoluties, zowel op technologisch vlak als op financieel vlak, worden momenteel in Europa en op wereldschaal aangedreven door overheden en producenten. Algemeen roept men op om met **meer spelers** **meer inspanningen** te doen, om de moeilijke 'hurdle', het overbruggen van de stap van nicheproduct tot een concurrentieel marktproduct, te overwinnen. Vlaanderen kan hier zeker een rol in gaan spelen.

We gaan zelfs verder; op basis van dit document verwachten we dat de brandstofcel-technologie zich verder ZAL ontwikkelen, dus als Vlaanderen hier niet van het begin bij betrokken is, is dit een **gemiste kans**. Het van op een afstand volgen van de ontwikkelingen in het buitenland is in dit geval onvoldoende. Vlaanderen moet op zijn minst de technologische en marktevoluties opvolgen via onderzoeksinstituten en kenniscentra en zo haar kennis uitbreiden. We merken (zie praktijkvoorbeelden in de kaders) dat het concreet opvolgen van bestaande installaties in eigen land tot een veel beter inzicht leidt en tot een betere toepassing, denk maar aan de specifieke warmtevraag in onze woningen (in het kader van het renovatiepact) en de specifieke eigenschappen van onze elektriciteits- en gasmarkt, de netten en zelfs in de toekomst mogelijkerwijs het waterstofnetwerk. We willen er ook op wijzen dat waar mogelijk, in deze beginfase, Vlaamse bedrijven moeten betrokken geraken zodat de boot niet gemist wordt door Vlaanderen.

Daarom adviseren we eerst aan kennisuitbreiding doen om dan te evalueren welke stappen zinvol zijn in het verder ondersteunen van de technologie. We pleiten ervoor een aantal **demonstratieprojecten** op te starten en te ondersteunen. Verder zouden brandstofcellen veel meer aanwezig moeten zijn in aanverwante projecten, rond energiezuinig wonen, slimme netten, toepassingen van waterstof, energiebesparingsprojecten bij steden en gemeenten, projecten in specifieke sectoren, interregionale projecten, onderzoek naar flexibele energievoorziening, toekomstvisies voor netbeheer... We vragen dan ook om voldoende steun bij het uitwerken van dergelijke projecten. Op deze manier wordt de kennis op verschillende niveaus verbreed en kan ze specifiek toegepast worden op de situatie van Vlaanderen.

Een tweede aspect van kennisverspreiding is het **verhogen van de bewustwording**, op alle niveaus. COGEN Vlaanderen heeft hierover in het voorbije jaar gesprekken gehad met (lokale) overheden, politici en netbeheerders en merkt dat er nog steeds misverstanden blijven bestaan over WKK in het algemeen en dat er zeker onvoldoende geweten is over de mogelijkheden van brandstofcellen. Het feit dat er een WKK-toepassing bestaat die uitermate geschikt is voor lage-energiewoningen is bijvoorbeeld zeer weinig geweten. Ook de omvang van piekvraag- en aanbod op het elektriciteitsnet in een toekomst met een hoger aandeel hernieuwbare energiebronnen en hoe WKK in combinatie met waterstof hier een oplossing aan kan bieden is weinig gekend. Ten slotte is er nog weinig kennis bij eindgebruikers en bij hun voornaamste bronnen van informatie, namelijk leveranciers en installateurs. We streven daarom naar een grote mate van inzet op het verhogen van de bewustwording bij alle actoren: regionale en lokale overheden, netbeheerders, mensen uit de bouw- en verwarmingssector en eindgebruikers.

Dit kan gebeuren door actief campagne te voeren, kennis te verschaffen (via opleidingen of een informatieloket) en adviescampagnes, maar ook door bestaande hindernissen weg te nemen (bijvoorbeeld een voldoende positieve inrekening in EPB-regelgeving).

Zodra er in Vlaanderen genoeg kennis en bewustzijn is opgedaan, de technologie nog verder ontwikkeld is en de markt zich heeft verbreed, kan eventueel nagedacht worden aan mogelijke vormen van steun, hierbij denken we in de eerste plaats aan een doordachte **investeringssteun** om de technologie verder te lanceren en om uit de nichemarkt te geraken, en om de initiële kostprijs te kunnen verlagen naar de toekomst..

Literatuur

[COGEN Europe, Delta EE, 2015. The benefits of micro-CHP in the EU.](#)

[COGEN Europe, 2014. CODE2: Micro CHP roadmaps](#)

[Delta EE, 2014. How much are householders really willing to pay for micro-CHP in Europe?](#)

[E4tech, 2015. The Fuel Cell Industry Review.](#)

[Ene.field, 2014. European supply chain analysis report. Element energy.](#)

[Ene.field, 2015. Capabilities of fuel cell micro-CHPs in a smart grid perspective.](#)

[Fuel cell today, 2013. The Fuel Cell Industry Review.](#)

Hawkes, A., Staffell, I., Brett, D., Brandon, N., 2009. Fuel cells for micro-combined heat and power generation. Review. Energy & Environmental Science 2009-2, p. 729-744.

[ICF International & EPA, 2015. Catalog of CHP technologies. Section 6: technology characterization – Fuel cells.](#)

I-Balance, 2014. SOFC typicals.

[IEA, 2015. Technology Roadmap; Hydrogen and Fuel Cells.](#)

[Roland Berger & FCH JU, 2015. Advancing Europe's energy systems: Stationary fuel cells in distributed generation.](#)

Staffell, I, 2009. A review of small stationary fuel cell performance. University of Birmingham, UK.

Van Eeghem Jasper, 2015. Analyse van de wereldwijde markt van micro-WKK's voor residentieel gebruik en hun toepasbaarheid op een reëel Vlaams verbruikersprofiel. KULeuven.

Verhaert Ivan, 2013. UGent. Model Based Evaluation of an Alkaline Fuel Cell System as Micro-Cogeneration for Building Applications.

VITO, 2014. Potentieel studie hernieuwbare energie 2030 in Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van het VEA: 2014/TEM/R/36