

# Analyse van de wereldwijde markt van micro-WKK's voor residentieel gebruik en hun toepasbaarheid op een reëel Vlaams verbruikersprofiel

**Jasper VAN EEGHEM**

Promotoren: Peter D'hulster

Co-promotor: Daan Curvers

Masterproef ingediend tot het behalen van  
de graad van master of Science in de  
industriële wetenschappen:  
energie hernieuwbare energie

Academiejaar 2014 - 2015

---

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot KU Leuven Technologicampus Oostende, Zeedijk 101, B-8400 Oostende, +32-59- 569000 of via e-mail [iiw.kulab.oostende@kuleuven.be](mailto:iiw.kulab.oostende@kuleuven.be).

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

## **Mededeling**

Deze eindverhandeling was een examen. De tijdens de verdediging geformuleerde opmerkingen werden niet opgenomen.

## Woord vooraf

De basis van deze masterproef werd gelegd tijdens een stage in de maanden februari en maart bij Cogen Vlaanderen. Het doel van de stage was om een eerste praktische ervaring op te doen in een reële werkomgeving en terwijl nog meer kennis op te steken over het algemene WKK-gebeuren. Dat doel is meer dan bereikt geweest en ik wil dan ook alle medewerkers van Cogen Vlaanderen bedanken voor de aangename periode die ik bij hen heb mogen meemaken. Iedereen stond me altijd bij wanneer ik vragen had en via de vele studiedagen en werkgroepen kon ik al een eerste keer contact leggen met verschillende bedrijven in de sector.

Specifiek wil ik mijn externe promotor Daan Curvers bedanken voor de hulp en vlotte samenwerking die hij mij geboden heeft gedurende het hele jaar.

Verder is een dankwoord voor mijn interne promotor Peter D'hulster zeker op zijn plaats. Het was in zijn cursus WKK dat mijn interesse voor dit vakdomein opgewekt werd en ik ben dan ook zeer dankbaar dat hij mij dit onderwerp kon aanreiken voor mijn thesis. Tijdens de regelmatige contactmomenten leerde ik een kritische houding aannemen en knopen doorhakken, een vaardigheid die ik in mijn latere (werk)leven ook nog zal kunnen gebruiken.

Als laatste wil ik mijn familie bedanken omdat ze me telkens in staat stellen om mezelf te ontplooien. Deze, toch al tweede, thesis leverde net zoals de eerste soms wat stresserende momenten op maar hun steun en motivatie bracht me telkens weer op krachten.

## Abstract

In de overgang naar een wereld waar hernieuwbare energie de hoofdbrok uitmaakt van de elektrische productiecapaciteit kan warmte-krachtkoppeling dienen als overgangstechnologie. Grote installaties zijn momenteel al in werking in België maar de technologie voor de residentiële markt raakt moeilijk ingeburgerd. Wereldwijd zijn bepaalde landen er echter wel al in geslaagd om deze residentiële markt te ontwikkelen voor (micro-)WKK.

In deze thesis worden de wereldwijd beschikbare micro-WKK's dan ook opgezocht en worden voor de gevonden toestellen aan de hand van opgemeten verbruiken van 3 gezinnen theoretische cash flows opgesteld. Op die manier worden de pijnpunten blootgelegd van de technologie alsook van het ondersteuningsmechanisme en worden mogelijke oplossingen aangereikt.

Uit de simulaties komt naar voor dat de hoge aankoopprijs het grootste struikelblok is. Het huidige Vlaamse ondersteuningssysteem geeft enkel een productiesteun die de jaarlijkse cash flow moet vergroten. Deze is echter in veel gevallen nog altijd te klein om de grote meerkost van de micro-WKK's te compenseren. In de buurlanden waar micro-WKK wel al doorgebroken is, wordt wel een investeringssteun gegeven. Het Brusselse gewest past dit systeem ook toe in combinatie met een productiesteun waardoor uit de simulaties blijkt dat micro-WKK hier wel interessant blijkt te worden.

Eenzijds bevestigt deze thesis de perceptie dat zonder subsidies micro-WKK te duur is in vergelijking met een nieuwe condensatieketel en anderzijds dat bepaalde toestellen die te koop zijn in het buitenland ook in Vlaanderen zeker zouden passen mits een verhoogde investeringssteun.

*In the transition to a world where renewable energy constitutes the main part of the electrical production capacity, cogeneration could serve as a transition technology. Large installations are already in operation in Belgium, but the technology for the residential market has its difficulties breaking through. Globally, some countries already have succeeded in introducing the residential market to (micro-) CHP.*

*In this thesis, the globally available micro-CHP systems are tracked down after which theoretical cash flows are calculated for these devices based on the energy consumption of 3 families. In doing so the biggest obstacles for the introduction of micro-CHP are revealed.*

*The simulations reveal that the high purchase price is the biggest obstacle to overcome. The current Flemish support system only provides a production subsidy designed to increase annual cash flow. These cash flows, however, are still too small in many cases to offset the considerable additional cost of the micro-CHP's. In the neighboring countries where micro-CHP is already being installed in large numbers an investment subsidy is given. The Brussels region also applies this system in conjunction with a production aid in which case the simulations show that micro-CHP turns out to be interesting.*

*On the one hand this thesis confirmed the perception that without subsidies micro-CHP is too expensive in comparison to a new condensing boiler and also that certain devices which are sold abroad would certainly fit in Flanders provided that increased investment support is given by the government.*

# Inhoudstafel

## Inhoud

Mededeling

Woord vooraf

Abstract .....	5
Inhoudstafel .....	6
Figuren-en tabellenlijst.....	8
Alfabetische lijst met symbolen en afkortingen.....	10
1. Inleiding.....	11
1.1. Energieproblematiek.....	11
1.2. 20-20-20 doelstelling.....	13
1.3 Rol van (micro-)WKK binnen de doelstelling.....	13
1.4. (Micro-)WKK in Vlaanderen: de cijfers.....	16
1.5. Wetgeving voor WKK in Vlaanderen .....	17
1.5.1. Vanuit Europa.....	17
1.5.2. Vanuit België.....	18
1.5.3. Vanuit Vlaanderen.....	18
1.6. Technologieën gebruikt in micro-WKK's .....	20
1.6.1. Verbrandingsmotoren in micro-WKK toepassingen.....	20
1.6.2. Brandstofcellen in micro WKK toepassingen .....	26
1.6.3. Stirling technologie voor micro-WKK toepassingen.....	34
1.6.4. Organische Rankine Cyclus.....	37
2. Technische analyse van de gevonden micro-WKK's.....	38
2.1. Methodiek .....	38
2.1.1. Opbouw matrices .....	38
2.1.2. Korte beschrijving micro-WKK's .....	42
2.2. Technische parameters .....	47
2.2.1. Prijs.....	47
2.2.2. Commercialiseerbaarheid .....	50
2.2.3. Betrouwbaarheid.....	57
2.2.4. Comfort .....	62
2.2.5. Milieu-impact .....	70
2.3. Besluit technische analyse.....	80

3. Economische analyse micro-WKK's .....	84
3.1. Methodiek .....	84
3.1.2. Gegevens opgevolgde gezinnen .....	85
3.2. Aannames.....	86
3.2.1. Aankoopprijs stroom en gas .....	86
3.2.2. Prijsstijging stroom en gas.....	88
3.2.3. Disconteringsvoet.....	90
3.2.4. Prijs warmtekrachtcertificaten.....	91
3.3. Cashflowberekening van de micro-WKK's.....	92
3.3.1. Vereenvoudigde cashflowberekening.....	92
3.3.2. Gedetailleerde simulatie .....	94
3.3.2.2. Cashflowberekening gedetailleerde berekening.....	94
3.3.3. Resultaten simulaties .....	95
3.4. Voorstellen om tot kortere SPB-termijnen te komen .....	101
3.4.1. Brusselse systeem voor certificaten overnemen .....	101
3.4.2. Vaste investeringssteun toekennen .....	104
3.4.3. Overtollige stroom laten opkopen door leveranciers .....	105
3.4.4. Alternatieve financieringsmogelijkheden .....	106
Algemeen besluit.....	110
Referentielijst .....	112
Bijlagen .....	116

## Figuren-en tabellenlijst

FIGUUR 1: OPWARMING AARDE 1901-2012.....	11
FIGUUR 2: OPWARMING AARDE TOT 2081-2100.....	12
FIGUUR 3: TRIAS ENERGETICA .....	13
FIGUUR 4: PRIMAIRE ENERGIEBESPARING WKK .....	15
FIGUUR 5: AANTAL INSTALLATIES NAAR VERMOGENSKLASSE.....	16
FIGUUR 6: OPGESTELD VERMOGEN PER SECTOR .....	17
FIGUUR 7: VERSCHILLENDE SLAGEN IN DE CYCLUS .....	22
FIGUUR 8 : IDEALE OTTO CYCLUS                      FIGUUR 9 : REËLE CYCLUS IN DE MOTOR.....	22
FIGUUR 10 INLAATSLAG IS KLEINER      FIGUUR 11 : HET GAS WORDT GECOMPRIMEERD .....	23
FIGUUR 12: HET GAS WORDT ONTSTOKEN      FIGUUR 13 : DE EXPANSIESLAG IS GROTER.....	23
FIGUUR 14 : DE ATKINSON CYCLUS      FIGUUR 15 : KRUKAS SYSTEEM.....	23
FIGUUR 16 : ONTSTAAN VAN ZIJDELINGSE KRACHTEN .....	24
FIGUUR 17 : OPBOUW WKK GEBASEERD OP EXLINK MOTOR .....	24
FIGUUR 18 : KOELING UITLAATGASSEN      FIGUUR 19 : VERBINDING MOTOR MET GENERATOR.....	25
FIGUUR 20: FUEL REFORMING .....	28
FIGUUR 21 : PEMFC WERKING .....	29
FIGUUR 22 : SYSTEEMSCHEMA PEMFC .....	30
FIGUUR 23: ONDERDELEN PEMFC SYSTEEM.....	31
FIGUUR 24: SOFC WERKING.....	32
FIGUUR 25: WERKINGSFIGUUR VAN EEN SOFC .....	33
FIGUUR 26 : START CYCLUS      FIGUUR 27 : HET GAS EXPANDEERT      FIGUUR 28 : HET GAS BEREIKT MAXIMAAL VOLUME .....	35
FIGUUR 29: COMPRESSIE RODE ZUIGER      FIGUUR 30 ALLE GAS IN BLAUWE CILINDER      FIGUUR 31: NIEUWE CYCLUS.....	35
FIGUUR 32: THERMODYNAMISCHE STIRLING-CYCLUS .....	35
FIGUUR 33 : MOTOR VAN STIRLING 3      FIGUUR 34 : MOTOR VAN STIRLING 4      FIGUUR 35 :MOTOR VAN STIRLING 1 .....	36
FIGUUR 36: WERKING VRIJBEWEGENDE ZUIGER STIRLINGMOTOR .....	36
FIGUUR 37 :IDEALE CARNOTCYCLUS      FIGUUR 38: RANKINECYCLUS WATER .....	37
FIGUUR 39 :ORGANISCHE RANKINE CYCLUS.....	37
FIGUUR 40 :OPGEMETEN VLAAMS ELEKTRICITEITSVERBRUIK.....	54
FIGUUR 41 : EUROPESE RICHTCIJFERS ELEKTRICITEITSVERBRUIK .....	54
FIGUUR 44 : ISOLATIE IN DE VLAAMSE HUIZEN .....	55
FIGUUR 45 : VERWARMINGSINSTALLATIES IN VLAAMSE HUIZEN .....	55
FIGUUR 42 : OPGEMETEN VLAAMS AARDGASVERBRUIK .....	55
FIGUUR 43 : EUROPESE RICHTCIJFERS AARDGASVERBRUIK .....	55
FIGUUR 46: GEMIDDELDE MAANDTEMPERATUREN 2014/2015.....	84
FIGUUR 47: VRIJSTAANDE WONING GEZIN 1.....	85
FIGUUR 48 : HALFOPEN BEBOUWING GEZIN 2 .....	85
FIGUUR 49: VRIJSTAANDE WONING GEZIN 3.....	86
FIGUUR 50 : GEMIDDELDE ELEKTRICITEITSPRIJS PER KWH (VREG).....	87
FIGUUR 51 : GEMIDDELDE AARDGASPRIJS PER KWH (VREG) .....	87
FIGUUR 52: GEMIDDELDE PRIJS VAN ELEKTRICITEIT PER GEBRUIKERSINTERVAL IN EUROCENT PER KWH.....	88
FIGUUR 53: GEMIDDELDE PRIJSSTIJGING VAN ELEKTRICITEIT PER JAAR PER GEBRUIKERSINTERVAL TUSSEN 2007 EN 2014 .....	88
FIGUUR 54 : TOTALE PRIJSSTIJGING IN DE TOEKOMST.....	88
FIGUUR 55 : PRIJS COMPONENTEN ELEKTRICITEIT IN EUROCENT PER KWH .....	89
FIGUUR 56: GEMIDDELDE PRIJS VOOR AARDGAS PER GEBRUIKERSINTERVAL IN 2014 IN EUROCENT PER KWH .....	89
FIGUUR 57: PRIJSSTIJGING VAN AARDGAS PER GE BRUIKERSINTERVAL PER JAAR TUSSEN 2007 EN 2014 .....	89
FIGUUR 58: PRIJSSTIJGING VAN AARDGAS IN DE TOEKOMST .....	90
FIGUUR 59 : VOORBEELD VEREENVOUDIGDE METHODE STIRLING 1.....	92



FIGUUR 60 : VOORBEELD VEREENVOUDIGDE CASHFLOW STIRLING 1 .....	93
FIGUUR 61 : VOORBEELD GEDETAILLEERDE CASHFLOW STIRLING 1 .....	94
FIGUUR 62: VERBRUIKEN GEZINNEN UITGEZET .....	96
FIGUUR 63: KEY FACTS FLOW FINANCE.....	106
TABEL 1: KESSELRINGMATRIX MET ALS DOEL EEN KORTE SPB .....	39
TABEL 2: KESSELRINGMATRIX VOOR BESTE MILIEU-IMPACT .....	40
TABEL 3: AANKOOPPRIJS MICRO-WKK'S    TABEL 4 : SCORE AANKOOPPRIJS .....	48
TABEL 5: IMPORTTAKS MICRO-WKK'S    TABEL 6 : SCORE IMPORTTAKS .....	49
TABEL 7: SERVICEMOGELIJKHEDEN MICRO-WKK'S    TABEL 8: SCORE SERVICEMOGELIJKHEDEN .....	50
TABEL 9: GAMMA MICRO-WKK'S    TABEL 10 : SCORE GAMMA .....	51
TABEL 11: KANT EN KLAARHEID MICRO-WKK'S    TABEL 12: SCORE KANT EN KLAARHEID .....	52
TABEL 13: AANSLUITINGEN MICRO-WKK'S    TABEL 14: SCORE AANSLUITINGEN .....	53
TABEL 15: PHR MICRO-WKK'S    TABEL 16: SCORE PHR.....	56
TABEL 17:LEVENSDUUR MICRO-WKK'S    TABEL 18: SCORE LEVENSDUUR .....	57
TABEL 19: GEPRODUCEERDE EENHEDEN MICRO-WKK'S    TABEL 20: SCORE GEPRODUCEERDE EENHEDEN .....	59
TABEL 21: ONDERHOUDSINTERVAL MICRO-WKK'S    TABEL 22: SCORE ONDERHOUDSINTERVAL .....	60
TABEL 23: GEMIDDELDE VOLUME CONDENSATIEKETELS .....	63
TABEL 24: SCORE INGENOMEN VOLUME .....	64
TABEL 25: GELUIDSNIVEAU MICRO-WKK'S    TABEL 26: SCORE GELUIDSNIVEAU .....	65
TABEL 27: OPSTARTTIJD MICRO-WKK'S    TABEL 28: SCORE OPSTARTTIJD .....	67
TABEL 29: GROOTTE BUFFERVAT MICRO-WKK'S    TABEL 30 : SCORE GROOTTE BUFFERVAT .....	69
TABEL 31: BRANDSTOFFLEXIBILITEIT MICRO-WKK'S    TABEL 32 : SCORE BRANDSTOFFLEXIBILITEIT.....	70
TABEL 33: CO <sub>2</sub> -TERUGVERDIENTERMIJN MICRO-WKK'S    TABEL 34: SCORE CO <sub>2</sub> -TERUGVERDIENTERMIJN .....	71
TABEL 35: FESR MICRO-WKK'S    TABEL 36 :SCORE FESR.....	74
TABEL 37: RESTPRODUCTEN MICRO-WKK'S    TABEL 38: SCORE RESTPRODUCTEN.....	75
TABEL 39: TRANSPORTVERVUILING MICRO-WKK'S    TABEL 40: SCORE TRANSPORTVERVUILING .....	77
TABEL 41: EXERGIEBEHOUD MICRO-WKK'S    TABEL 42: SCORE EXERGIEBEHOUD .....	78
TABEL 43: TOP 5 VOOR KORTE SPB    TABEL 44: TOP 5 VOOR BESTE MILIEU-IMPACT .....	80
TABEL 45: TOP 5 VOOR KORTE SPB ZONDER ONBEKENDE SCORES.....	74
TABEL 46 : TOP 5 VOOR BESTE MILIEU-IMPACT ZONDER ONBEKENDE SCORES.....	81
TABEL 47: VOLLEDIG EXCELTABLET MET WEEGFACTOREN VOOR KORTE SPB .....	82
TABEL 48: VOLLEDIGE EXCELTABLET MET WEEGFACTOREN VOOR BESTE MILIEU-IMPACT.....	83
TABEL 49: CASHFLOWS IN VLAAMS WKC-SYSTEEM.....	95
TABEL 50: SIMPLE PAYBACK TIME IN HET HUIDIGE SYSTEEM .....	97
TABEL 51: NPV OVER 10 JAAR IN HET HUIDIGE SYSTEEM .....	99
TABEL 52: CASHFLOWS IN BRUSSELS WKC-SYSTEEM .....	101
TABEL 53 : TOENAME CASHFLOW BRUSSEL T.O.V. VLAANDEREN .....	102
TABEL 54: NPV NA 10 JAAR IN HET BRUSSELSE SYSTEEM.....	103
TABEL 55: SIMPLE PAYBACK TIME MET INVESTERINGSSTEUN VAN 2000 EURO .....	104
TABEL 56: TOENAME CASHFLOW DOOR OPKOPEN OVERTOLLIGE STROOM .....	105

## Alfabetische lijst met symbolen en afkortingen

CH<sub>4</sub>: Methaan  
CO : Koolstofmonoxide  
CREG : Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas  
CV : Centrale verwarming  
EC : Europese Commissie  
ETS-sectoren : Sectoren waarvoor een begrenzing van de uit te stoten broeikasgassen geldt  
EU : Europese Unie  
FESR : Fuel energy savings ratio  
GSC : Groenstroomcertificaat  
GW : Gigawatt  
ICE : Internal combustion engine  
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change  
JKP : Jaarlijkse kosten percentage  
LCA : Life cycle assessment  
LPG : Liquefied Petroleum Gas / Liquefied Propane Gas  
Micro-WKK : Micro warmte-krachtkoppeling  
MW : Megawatt  
MWh : Megawattuur  
NG : Natural gas  
NO<sub>x</sub> : Stikstofoxiden  
NPV : Nett present value  
ORC : Organic rankine cycle  
PEMFC : Proton exchange membrane fuel cells / polymer electrolyte membrane fuel cells  
PHR : Power to heat ratio  
RCP 8.5 : scenario dat de broeikasgasconcentraties beperkt tot 1400 ppmv in 2100  
RCP 2.6 : scenario dat de broeikasgasconcentraties beperkt tot 450 ppmv in 2100  
RPE : Relatieve primaire energiebesparing  
SOFC : solid oxide fuel cell  
SO<sub>x</sub> : Zwaveloxiden  
SPB : Simple pay back  
STEG-centrale : Stoom-en gascentrale  
VITO : Vlaams Instituut voor Technologisch Onderzoek  
VN : Verenigde naties  
WKC : Warmtekrachtcertificaat  
WKK : Warmte-krachtkoppeling  
WMO : World Meteorological Organization

# 1. Inleiding

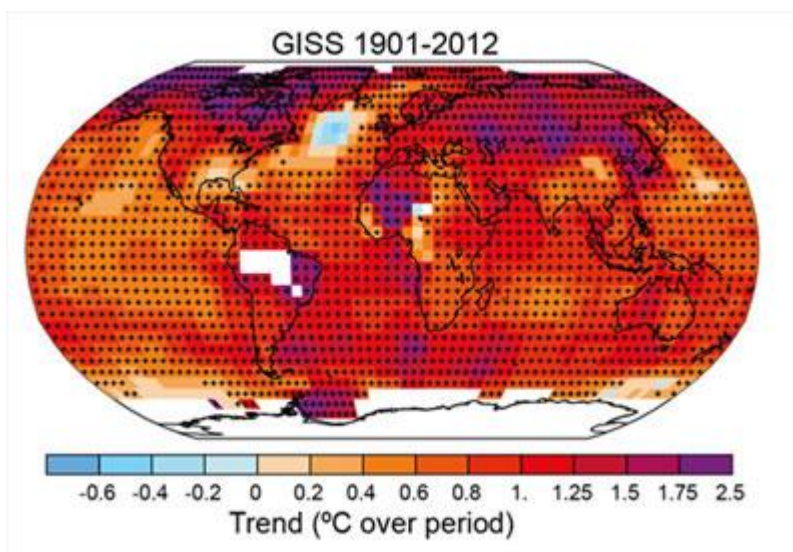
## 1.1. Energieproblematiek

Enorme ijsmassa's breken af van de Perito Moreno-gletsjer in Argentinië (2012) en van de Petermann-gletsjer in Groenland (2010). Er is extreme droogte in de Hoorn van Afrika waarbij de Verenigde Naties (VN) spreekt van de ergste droogte sinds 60 jaar en grote gebieden in Ethiopië, Somalië, Djibouti en Kenia worden uitgeroepen tot crisiszones (2011). Maleisië maakt de zwaarste overstromingen mee in jaren waarbij meer dan honderdduizend mensen op de vlucht zijn (2014).

In het eerste decennium van de 21<sup>ste</sup> eeuw waren er volgens de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO) van de VN sprake van 3496 natuurrampen zoals overstromingen, stormen, droogtes en hittegolven. In vergelijking met de 743 gerapporteerde catastrofes tijdens de jaren '70, zijn er tijdens de periode 2000-2010 dus 5 keer zoveel natuurrampen voorgekomen. Al die rampen werden op de één of andere manier beïnvloed door de klimaatverandering. Zo ontstaan orkanen bijvoorbeeld enkel boven water van 27° en gezien de stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde komen steeds meer plaatsen in aanmerking om orkanen op te wekken.

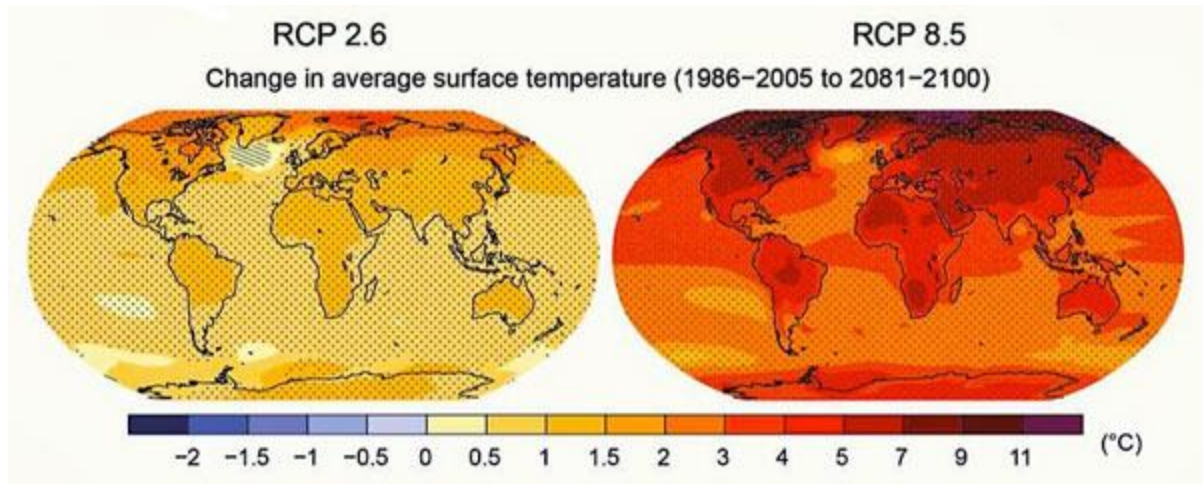
In het laatste rapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wordt uitgegaan van een stijging van de zeespiegel tussen 1,6 en 1,9 millimeter per jaar voor de twintigste eeuw, en voor de periode 2081-2100 wordt in totaal tussen de 26 centimeter en 82 centimeter stijging voorspeld, afhankelijk van hoeveel broeikasgassen er deze eeuw nog uitgestoten worden.

De gemiddelde temperatuur van het aard- en oceaanooppervlak is volgens de wetenschappers van het IPCC tussen 1880 en 2012 gestegen met 0,85 °C (*The Intergovernmental Panel On Climate Change, 2015*). Bijna overal ter wereld is de temperatuur gestegen ten opzichte van 1880 wat tot gevolg heeft dat er steeds meer ijsmassa smelt. In combinatie met het uitzetten van het water t.o.v. zijn vorige ijstoestand zorgt dit ervoor dat de zeespiegel stijgt (zie Figuur 1).



Figuur 1: Opwarming aarde 1901-2012

Het IPCC, dat de VN bijstaat op wetenschappelijk vlak, verwacht tot 2100 een gemiddelde temperatuurstijging op aarde van 0,3 tot 1,7 °C ten opzichte van de periode 1986-2005 (zie Figuur 2) Deze 'beperkte' stijging komt enkel voor in het meest gunstige scenario RCP2.6 maar loopt op tot 2,6 à 4,8 °C bij het business as usual scenario RCP 8.5. (*The Intergovernmental Panel On Climate Change, 2015*)



*Figuur 2: Opwarming aarde tot 2081-2100*

RCP 2,6 is het enige scenario waarmee de wereldwijde opwarming in 2100 onder de 1°C kan worden gehouden, maar daarvoor is op relatief korte termijn wel een aanzienlijke verlaging van de antropogene uitstoot van broeikasgassen nodig:

- in 2050: 40 tot 70 % minder uitstoot dan in 2010
- in 2100: uitstoot gelijk aan nul

Verschillende verdragen werden al afgesloten om op wereldvlak de CO<sub>2</sub>-emissies te beperken.

Met het Kyoto-verdrag zijn industrielanden overeengekomen om de uitstoot van broeikasgassen in de periode van 2008 tot 2012 (inmiddels al verlengd tot 2020) met gemiddeld 5,2% te verminderen t.o.v. het niveau in 1990. De reductiepercentages verschillen van land tot land, naargelang de economische mogelijkheden en huidige uitstoot. De Verenigde Staten moet 7% inboeten, Japan 6% en ook de Europese Unie (EU)8%. (*UNFCCC, 2008*)

De EU heeft vervolgens in overleg met zijn lidstaten de emissiereducties land bepaald. De percentages liggen ver uiteen. Zo moet Luxemburg zijn uitstoot met 28% verminderen terwijl Portugal zijn uitstoot met 27% mag laten stijgen. Dichter bij huis moet Nederland moet 6% minder uitstoten en in België 7,5%. In het Kyoto-protocol werd vastgelegd dat de deelnemende landen ook een deel van hun reductie mogen omzetten in maatregelen in het buitenland, sommige milieugunstige maatregelen zijn daar namelijk goedkoper te realiseren dan in eigen land. De bossen in eigen land mag men ook laten meetellen als reductie. Als noodmaatregel mogen landen emissierechten van andere landen opkopen, om zo hun eigen reductietekorten te compenseren. (Bollen, Van Humbeek, & Lamote, 2011)

Op 16 februari 2005 om 05:00 GMT (90 dagen na de ondertekening door Rusland) is het Kyoto-protocol officieel in werking getreden. Aanvankelijk weigerde Rusland namelijk het verdrag te ondertekenen.

## 1.2. 20-20-20 doelstelling

De EU spant zich zowel op Europees als op internationaal niveau in om klimaatverandering tegen te gaan. In januari 2008 presenteerde de Europese Commissie (EC) haar voorstel tot klimaatplan. 'Een historisch plan', zo luidden de persmededelingen, 'dat goed is voor de planeet, de economie en de burgers'. Vijf jaar later in 2013 trad het klimaatplan uiteindelijk in werking.

Met het plan wil de EU het energieverbruik verminderen zodat ze minder afhankelijk wordt van energie-import. Daarnaast wil ze haar positie aan de wereldtop op vlak van energietechnologie versterken en wil ze vooruitlopen op een nieuw wereldwijd milieupact want in 2012 liep het Kyoto-protocol immers af. In december 2008 werkte de Europese Raad het voorstel van de Commissie verder uit en enkele dagen later keurde het Europees Parlement het goed.

Het 20-20-20-plan legt Europa 3 ambitieuze doelstellingen op.

- De EU moet het energieverbruik met 20% doen dalen
- Het aandeel hernieuwbare energie in het bruto eindverbruik moet tot 20% opgetrokken worden en bovendien zou 10% van de brandstof van de transportsector uit biobrandstof moeten bestaan.
- Tegen 2020 moet de uitstoot van CO<sub>2</sub> met 20% teruggedrongen worden ten opzichte van het niveau in 1990.

Die 20%-maatregelen zijn een Europees gemiddelde en de inspanningen worden verder nationaal verdeeld.

Zo moet voor België 13% van het bruto energie-eindverbruik uit hernieuwbare energiebronnen komen tegen 2020 en moet voor de niet-ETS sectoren de uitstoot van broeikasgassen dalen met 15 procent t.o.v. 2005. (Publicatieblad van de Europese Unie, 2009)

## 1.3 Rol van (micro-)WKK binnen de doelstelling

Om tot een samenleving te komen die verantwoordelijk met energie omspringt, wordt vaak de trias energetica (zie Figuur 3) aangehaald. Dit is een stappenplan dat teruggevonden kan worden in de 20-20-20 doelstellingen. In een eerste stap moet de energievraag beperkt worden, zoals in de eerste doelstelling van het 20-20-20 plan. De leuze 'de meest duurzame energie is de energie die niet verbruikt wordt' is hier van toepassing.

In een tweede stap moet er duurzame energie gebruikt worden waar mogelijk. Dit uit zich in de doelstelling voor 20% hernieuwbare energie in het bruto eind energieverbruik.



Figuur 3: Trias Energetica

Bij de laatste stap moeten de fossiele brandstoffen die toch nog gebruikt worden als aanvulling op de hernieuwbare energiebronnen, op een zo efficiënt mogelijke manier omgezet worden. Het is hier dat warmte-krachtkoppeling een belangrijke rol kan spelen.

Warmte-krachtkoppeling wordt soms ook verwoord als cogeneratie. "*Cogeneratie is het thermodynamisch tegelijkertijd produceren van twee of meer nuttige energievormen uitgaande van één enkele primaire energiebron.*" (Cogen Vlaanderen, 2015)

Een andere definitie van warmte-krachtkoppeling brengt meer verduidelijking. "*Warmte-krachtkoppeling is de gecombineerde productie van elektrische (of mechanische) en nuttige thermische energie, uitgaande van dezelfde primaire energiebron.*" (Cogen Vlaanderen, 2015)

In België wordt in bijna alle gevallen elektriciteit van het centrale net gekocht en wordt voor de benodigde warmte een vorm van brandstof verstoekt in een verwarmingsketel of stoomketel. Bij warmte-krachtkoppeling wordt echter uitgegaan van één primaire energiebron zowel warmte als elektriciteit geproduceerd. Deze manier van werken verhoogt dus het rendement van de energieomzetting.

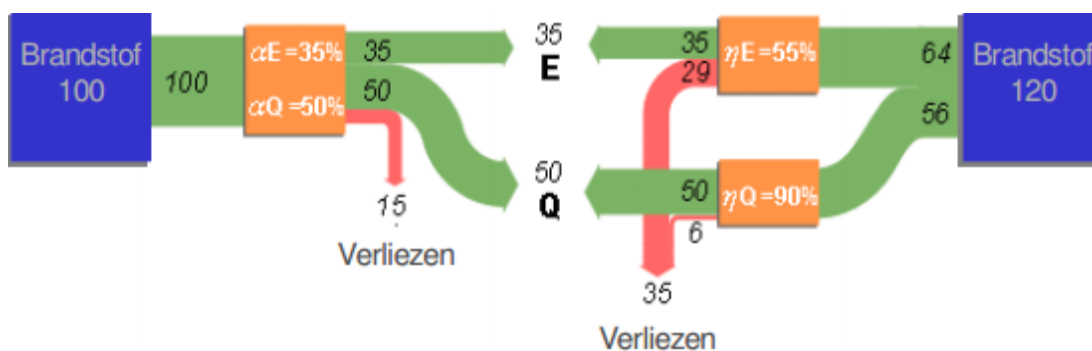
Bij klassieke elektriciteitscentrales worden namelijk grote hoeveelheden warmte geloosd via de koelcircuits en uitlaatgassen. Zoals bijvoorbeeld in de koeltorens van een nucleaire centrale. Deze warmte is een deel van de inherent aanwezige energie in de brandstof die verloren gaat. Ze zou evengoed afgenomen kunnen worden om op een andere plaats te voldoen aan een warmtevraag. Voor de werking van een centrale zou deze warmteafname echter constant moeten zijn om de koeling te verzekeren en vanwege de grote kwantiteit af te voeren warmte is dit praktisch gezien onhaalbaar. Hierdoor produceren grote elektriciteitscentrales in België maar elektriciteit met een rendement tussen de 35 en 55 procent afhankelijk van het type centrale. (Cogen Vlaanderen, 2015)

Op plaatsen waar de warmtevraag kleiner is maar wel constant zou een warmte-krachtinstallatie kunnen geïnstalleerd worden. De centrale wekt nu ook elektriciteit op, die zelf kan verbruikt worden of verkocht. Door dit bijkomende product wordt het rendement van de energieomzetting verhoogd. Warmte-krachtkoppeling is dus eigenlijk een vorm van warmteopwekking waar als nevenproduct ook elektriciteit geproduceerd wordt.

In de klassieke situatie waarbij een brandstof verbrand wordt om warmte te bekomen, wordt met een rendement van 90% gerekend. Bijna alle energie die in de brandstof zit, wordt omgezet in warmte. Dit percentage is vergelijkbaar met het totale rendement, elektrisch en thermisch samen, van een warmte-krachtinstallatie. Het verschil is dat er bij warmte-krachtkoppeling naast warmte ook elektriciteit geproduceerd wordt. Elektriciteit wordt als waardevoller aanzien dan laagwaardige warmte omdat elektriciteit nog gemakkelijk naar andere energievormen kan omgezet worden (mechanische, thermische, etc.) terwijl dit voor thermische energie veel moeilijker is. In de thermodynamica gebruikt men het begrip 'exergie' om de kwaliteit van een energievorm aan te duiden. Elektriciteit is dus exergetisch gezien waardevoller dan warmte.

Om aan een bepaalde warmtevraag te voldoen zal een WKK meer primaire energie-input nodig hebben dan wanneer de brandstof zou verbrand worden in een ketel zoals bij de klassieke situatie. De WKK zal echter wel op hetzelfde moment waardevolle elektriciteit produceren die anders met een laag rendement zou worden opgewekt in grote centrales. Er wordt namelijk brandstof verbrand waarna de warmte op hoge temperatuur eerst gebruikt wordt om mechanische arbeid te verrichten (generator aandrijven) waarna warmte op lagere temperatuur overblijft die dient om aan de warmtevraag van de gebruiker te voldoen. Het thermisch rendement van de omzetting ligt dus lager dan bij het verbranden van de brandstof in de klassieke situatie maar er komt wel een elektrisch rendement bij waardoor de omzetting vanuit exergetisch standpunt veel interessanter is.

Wanneer een gebruiker zowel elektriciteit als warmte nodig heeft, zal warmte-krachtkoppeling leiden tot een primaire energiebesparing.



*Figuur 4: Primaire energiebesparing WKK*

In een praktisch voorbeeld (zie Figuur 4) heeft een gebruiker een elektriciteitsbehoefte van 35 eenheden en warmtebehoefte van 50 eenheden. Indien hij de elektriciteit aankoopt van het lokale net wordt deze geproduceerd met een rendement van 55% (bij een STEG-centrale). De warmte bekomt hij door brandstof te verstoffen in een ketel met een rendement van 90%. Alles samen zijn er dus 120 eenheden primaire energie nodig om aan 35 eenheden elektriciteit en 50 eenheden warmte te komen. Indien de stroom en warmte geproduceerd worden met een WKK die een elektrisch rendement heeft van 35% en een thermisch rendement van 50% dan zijn er maar 100 eenheden primaire energie nodig. Er wordt dus 20 eenheden primaire energie bespaard.

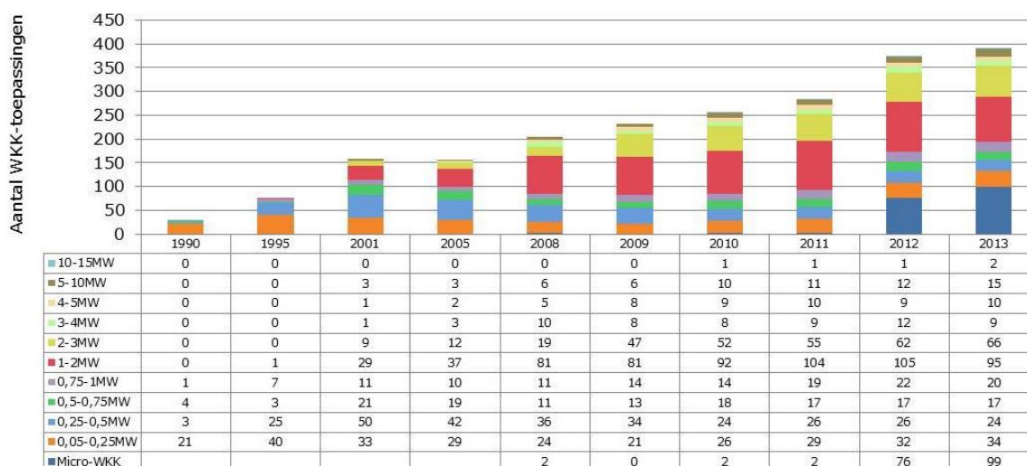
## 1.4. (Micro-)WKK in Vlaanderen: de cijfers

Vandaag de dag staat voor meer dan 2 GWe aan WKK-vermogen opgesteld in Vlaanderen (VITO, 2014). Voor WKK vonden er tot nu toe 2 bloeiperiodes plaats. Een eerste keer tijdens de jaren '90 en een tweede keer in de periode 2005-2011. Voor 1990 werden vooral stoomturbines geïnstalleerd voor WKK-toepassingen (bv. in de voedingsindustrie).

Na een sterke groei in de tweede helft van de jaren '90 viel de bouw van nieuwe WKK-installaties nagenoeg stil tussen 2000 en 2005. Mogelijke verklaringen daarvoor zijn enerzijds de liberalisering van de elektriciteitsmarkt met een ongunstige verhouding tussen brandstof- en elektriciteitsprijzen en anderzijds de stijgende aardgasprijs. Ook het uitblijven van steunmaatregelen onder de vorm van warmtekrachtcertificaten had zijn invloed. In de 5 jaar volgend op de millenniumwissel kwam de groei hoofdzakelijk van kleine WKK-installaties op basis van motoren en WKK's in de tuinbouwsector op basis van gas. Dit kwam mede door de stimulans van de groenestroomcertificaten, waarbij als brandstof voor de motoren dan vooral biogas afkomstig van de vergisting van organisch materiaal gebruikt werd. (Cogen Vlaanderen, 2015)

Door de hoge investeringskost en de kleine huidige sparkspread (= bruto winstmarge die kan gemaakt worden op de productie van elektriciteit uit aardgas) is nog niet het volledige potentieel aan WKK in Vlaanderen benut. Bepaalde industriële sectoren hebben een behoefte aan zowel warmte als elektriciteit en zijn dan ook potentieel geschikt voor warmte-krachtkoppeling. Vooral in de grote industrie zoals raffinaderijen, chemie, petrochemie, papier, voeding, textiel en metaalverwerking is er nog veel mogelijk op het vlak van WKK. Ook op kleinere schaal kunnen er echter interessante toepassingen zijn die variëren van de tuinbouw tot ziekenhuizen, zwembaden, recreatiecentra, appartementsblokken en zelfs residenties.

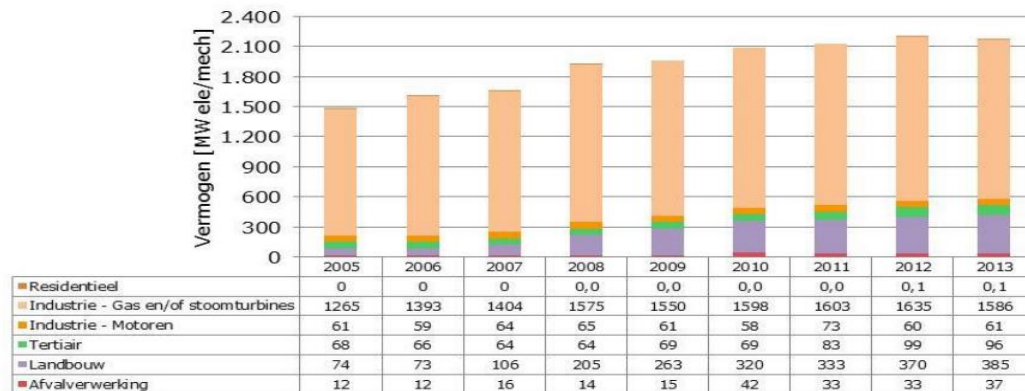
De Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) houdt de evolutie van het geïnstalleerd WKK-vermogen in Vlaanderen bij. De laatste cijfers zijn deze uit 2013 die uitgezet zijn in het eindrapport voor de inventarisering van WKK in Vlaanderen. Momenteel staat er voor iets meer dan 2 GW elektrisch vermogen ofwel ongeveer 10% van de totale elektrische productiecapaciteit in België.



Figuur 5: aantal installaties naar vermogensklasse



De verschillende bloeifases zijn duidelijk merkbaar in de uitgezette tabel (zie Figuur 5). Het valt echter ook op te merken dat voor micro-WKK (<50 kW) er pas na 2012 veel installaties bij kwamen.



Figuur 6: Opgesteld vermogen per sector

Het opgesteld vermogen aan WKK voor residentiële toepassingen bedroeg nog geen 100 kW in 2013. Wetende dat er elk jaar duizenden condensatieketels verkocht worden, is er dus ook voor de residentiële markt een enorm potentieel. De rol van micro-WKK binnen het grotere beeld van WKK in Vlaanderen is dan ook momenteel zeer bescheiden.

## 1.5. Wetgeving voor WKK in Vlaanderen

Op elk regeringsniveau is er wetgeving voor WKK gaande van het Europees niveau tot Vlaams niveau.

### 1.5.1. Vanuit Europa

De Europese wetgeving omtrent WKK staat geformuleerd in de "Richtlijn 2012/27/EU van het Europees parlement en de raad van 25 oktober 2012 betreffende energie-efficiëntie, tot wijziging van Richtlijnen 2009/125/EG en 2010/30/EU en houdende intrekking van de Richtlijnen 2004/8/EG en 2006/32/EG".

Vanuit Europa wordt vooral een kader gecreëerd waarbinnen de lidstaten een steunmechanisme voor WKK kunnen uitwerken. In de richtlijn wordt bepaald wat de lidstaten mogen doen qua ondersteuning en regeling van het energiesysteem om WKK te bevorderen.

Daarnaast worden rekenmethodes opgelegd voor de bepaling van de RPE van een warmtekrachtkoppeling. Deze methodes moeten gebruikt worden voor de statistische verwerking van alle installaties in België. De lidstaten moeten jaarlijks voor 30 april aan de Commissie statistieken voorleggen over de nationale productie van elektriciteit en warmte uit hoog- en laagrenderende warmtekrachtkoppeling. En dit in verhouding tot de totale warmte- en elektriciteitsproductie, berekend volgens de vastgelegde methode.

## 1.5.2. Vanuit België

Artikel 69 van het Wetboek der Inkomstenbelasting biedt bedrijven de mogelijkheid hun belastbare winst te verminderen met een verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen. De aftrek wordt verricht op de winst van het belastbaar tijdperk tijdens hetwelk de vaste activa zijn verkregen of tot stand zijn gebracht. Voor de energiebesparende investeringen gedaan in 2015 (aanslagjaar 2016) bedraagt de verhoogde aftrek 13,5%.

## 1.5.3. Vanuit Vlaanderen

### 1.5.3.1. Vergunningen

Voor grote installaties (>100 kWe) die geen lid zijn van een noodgroep moeten er verschillende vergunningen aangevraagd worden. Enerzijds zijn er de milieu-en bouwvergunningen maar voor installaties groter dan 10 kWe moeten er ook vergunningen aangevraagd worden voor de aansluiting op het gasnet en elektriciteitsnet. Als de WKK een groter elektrisch vermogen heeft dan 25 MW moet ook een productievergunning aangevraagd worden bij de Commissie voor de Regulering van Elektriciteit en Gas (CREG).

Een milieuvergunning is een toelating om milieuhinderlijke activiteiten uit te oefenen en vervangt eigenlijk de vroegere exploitatievergunning.

Bij zeer grote installaties kan het mogelijk zijn dat een milieueffectenrapport vereist is. Dit is een onderzoek naar de mogelijke milieugevolgen van bepaalde activiteiten of ingrepen. Een milieueffectrapport wordt opgemaakt vóór de projecten of plannen worden uitgevoerd. Zo kunnen schadelijke effecten voor het milieu in een vroeg stadium worden ingeschat en opgevangen. Voor de bouw van een WKK gaat dit dan vooral over de uitstoot van bepaalde stoffen (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, etc.) en eventuele lozing van koelwater en geluidsoverlast. Vaak hangen de bouw- en milieuvergunning aan elkaar vast en kan de één niet zonder de ander bekomen worden.

### 1.5.3.2. Steunmaatregelen

De basis van het Vlaams energiebeleid is terug te vinden in het decreet van 8 mei 2009 houdende algemene bepalingen betreffende het energiebeleid. Dit wordt meestal kortweg het energiedecreet genoemd. De uitvoeringsbepalingen bij het Energiedecreet staan te lezen in het besluit van de Vlaamse Regering van 19 november 2010 houdende algemene bepalingen over het energiebeleid ook wel het energiebesluit genoemd.

Een WKK komt in aanmerking voor warmtekrachtcertificaten als het een kwalitatieve WKK betreft. Hiervoor moet de relatieve primaire energiebesparing (RPEB) groter of gelijk zijn aan 10% voor WKK's vanaf 1000 kWe of minimaal 0% voor WKK's kleiner dan 1000kWe. De te gebruiken referentierendementen  $\eta_Q$  en  $\eta_E$  hangen af van verschillende factoren zoals het type brandstof voor de opwekking van elektriciteit en warmte, de correctiefactoren van de referentierendementen wegens klimaatomstandigheden en vermeden netverliezen.

$$RPEB = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} + \frac{\alpha_E}{\eta_E}}$$

- $\alpha_Q$  = thermische rendement van de WKK
- $\alpha_E$  = elektrisch rendement van de WKK
- $\eta_Q$  = thermisch referentierendement
- $\eta_E$  = elektrisch referentierendement

De installatie moet daarnaast ook gelegen zijn in het Vlaamse Gewest en moet in dienst genomen zijn of ingrijpend gewijzigd zijn na 1 januari 2002. Hij moet voldoende gekeurd zijn en voorzien zijn van de nodige meetapparatuur. Als laatste voorwaarde moet het project behoren tot een van de projectcategorieën van WKK-installaties waarvoor steun kan verkregen worden.

Erkende WKK's die in werking getreden zijn voor 1 januari 2013 krijgen 1 warmtekrachtcertificaat (WKC) per MWh bespaarde primaire energie. Na 4 jaar wordt het aantal verleende WKC's degressief. Sinds 1 januari 2013 is het systeem veranderd waarbij het aantal uitgereikte certificaten afhankelijk is van de jaarlijks vastgelegde 'bandingfactor' voor nieuwe en ingrijpend gewijzigde WKK's. Het aantal uitgereikte certificaten is dan gelijk aan de bandingfactor maal het aantal MWh primaire energiebesparing. Deze bandingfactor is bepaald op basis van de onrendabele top berekening. De onrendabele top is gedefinieerd als het productieafhankelijke gedeelte van de inkomsten die nodig zijn om de netto-constante waarde van een investering op nul te doen uitkomen. (Cogen Vlaanderen, 2015)

De banding factor wordt berekend door de onrendabele top te delen door de bandingdeler. De bandingdeler is de inschatting van de marktwaarde van een warmtekrachtcertificaat. In het Energiedecreet is bepaald dat de bandingfactor nooit meer kan bedragen dan 1,25. Er kan met andere woorden dus nooit meer dan 1,25 certificaten worden toegekend per MWh primaire energiebesparing. Op deze manier wordt voorkomen dat zeer onrendabele technologieën op te veel steun mogen rekenen. Verder wordt de bandingfactor van installaties met startdatum in 2013 en 2014 afgetopt op 1. De minister bepaalt hierna jaarlijks de maximale bandingfactor.

In Vlaanderen kunnen producenten van elektriciteit op basis van hernieuwbare energie groenestroomcertificaten bekomen. WKK's kunnen hiervoor in aanmerking komen als ze op een biobrandstof werken zoals biogas, plantaardige olie, houtafval enz. Deze certificaten worden ook berekend volgens de onrendabele top berekening en ze kunnen gecombineerd worden met de warmtekrachtcertificaten.

In het Energiebesluit was ook de mogelijkheid voorzien voor een investeringssteun voor micro-WKK voor publiekrechtelijke rechtspersonen en niet-commerciële instellingen maar daar is (voorlopig) nog geen budget voor uitgetrokken.

## 1.6. Technologieën gebruikt in micro-WKK's

### 1.6.1. Verbrandingsmotoren in micro-WKK toepassingen

#### 1.6.1.1 Inleiding

Verbrandingsmotoren bestaan al meer dan 100 jaar en worden dan ook in verschillende toepassingen teruggevonden. Het systeem bestaat uit het samendrukken en laten verbranden van brandstof waardoor deze mechanische arbeid levert. Deze arbeid kan dan gebruikt worden om een as te laten draaien (auto's) of een generator aan te drijven (micro-WKK).

In 1876 ontwikkelde Nikolaus Otto een gasmotor gebaseerd op de nu reeds bekende Otto-cyclus. Dit is een viertaktmotor met 1 arbeidsslag voor 2 omwentelingen van de krukas. Het Duitse gerecht besliste echter dat er niet één patent kon bekomen worden waaronder alle motoren met interne compressie vallen. Zelfs voor de 4-taktcyclus kon geen patent bekomen worden waardoor de inwendige cilindercompressie universeel werd.

In 1879 kreeg Karl Benz, die onafhankelijk onderzoek had verricht, een patent voor de tweetakt inwendige verbrandingsmotor. De motor was gebaseerd op dezelfde technologie als het ontwerp van de viertaktmotor van De Rocha. Hij ontwierp later zijn eigen viertaktmotor die hij installeerde in zijn auto's die later de eerste auto's werden voor massale productie.

James Atkinson werkte in 1882 het ontwerp uit voor de Atkinson-cyclus. De motor die gebaseerd was op deze cyclus liet toe de inlaat, compressie, expansie en uitlaat uit te voeren tijdens één enkele draaiing van de krukas. Zijn ingewikkelde ontwerp van de krukas zorgde ervoor dat er een verschil kon zijn tussen de expansieratio en de compressieratio waardoor een grotere efficiëntie van de motor bekomen werd.

### *1.6.1.2. Klassieke viertaktmotor*

De viertaktmotor is een inwendige verbrandingsmotor waarbij met 1 arbeidslag de krukas 2 omwentelingen maakt. Op het einde van de compressieslag wordt het mengsel van gas en lucht, dat zich dan in een toestand van hoge druk en temperatuur bevindt, ontstoken via een bougie. Bij een dieselmotor wordt enkel lucht samengedrukt tot het een toestand van hoge druk en temperatuur bereikt heeft. Hierna wordt de brandstof ingespoten waardoor het mengsel van brandstof en lucht spontaan aan zelfontbranding doet.

Het mengsel dat hierdoor expandeert duwt de zuiger naar beneden waardoor de krukas begint te draaien.

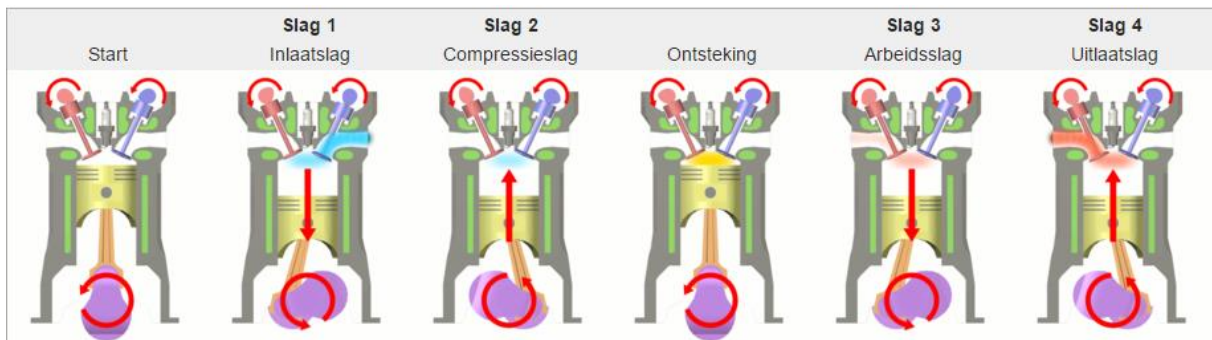
Het hele proces valt dus onder te verdelen in 4 stappen, namelijk de 4 slagen in de motor.

De eerste slag is de inlaatslag. Wanneer de zuiger zich op het bovenste dode punt bevindt- het punt waarbij de zuigerkamer het kleinst is- gaat de inlaatklep open. Op dit precieze moment zijn zowel de inlaat als de uitlaatklep even geopend. In deze periode vindt de 'spoeling' plaats. Hiermee wordt het uitduwen van de uitlaatgassen van het verbrande gas via de uitlaatklep bedoeld. Wanneer de gassen verwijderd zijn, beweegt de zuiger terug naar beneden waardoor er een vers mengsel (of zuivere lucht bij een dieselmotor) aangezogen wordt via de inlaatklep.

De tweede slag is de compressieslag. Wanneer de zuiger zich op het onderste dode punt bevindt, oftewel het punt waarbij de zuigerkamer het grootst is, is de maximale hoeveelheid brandstof aangezogen. Hierna wordt, door de beweging van de krukas, de zuigerkamer terug samengedrukt. De druk en temperatuur van het mengsel zullen stijgen. Bij de gasmotor zal het mengsel niet vanzelf ontbranden maar wordt het mengsel ontstoken via bougies.

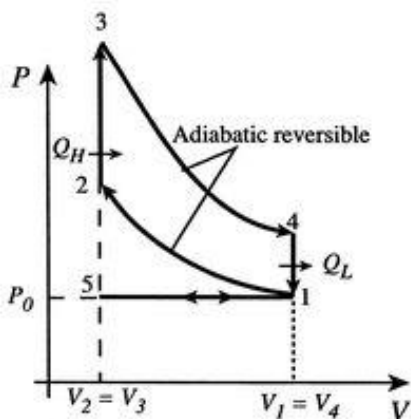
Na de compressie komt de expansie van het mengsel tijdens de arbeidslag. Bij een mengselmotor wordt de arbeid geleverd onder de vorm van een toenemend volume van het gas. De zuiger beweegt hierdoor naar beneden en de krukas slaat weer aan het draaien. Er zal een naverbranding plaatsvinden van de overgebleven brandstof waardoor de druk (die normaal daalt) nog altijd hoger zal zijn dan de compressiedruk.

De uitlaatgassen moeten verwijderd worden en dit gebeurt dan ook in de uitlaatslag. Net voor het einde van de arbeidslag zal de uitlaatklep zich openen waardoor de druk van het mengsel terug daalt. De krukas blijft draaien omwille van de andere pistons en de zuiger beweegt terug omhoog. De uitlaatgassen worden naar buiten geduwd via de uitlaatklep en er kan opnieuw een vers mengsel aangezogen worden.

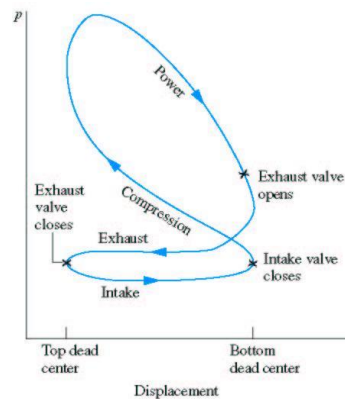


Figuur 7: Verschillende slagen in de cyclus

In realiteit wijkt de afgelegde cyclus echter sterk af van de theoretische ideale Otto-cyclus. Zuiver thermodynamisch gezien is het theoretisch rendement van de Ottocyclus afhankelijk van 1 grootte, namelijk de compressieverhouding. Voor een gasmotor worden bij een courante compressieverhouding van 10-12 theoretische rendementen van 55-60% bereikt. In werkelijkheid zijn de mechanische rendementen van Ottomotoren aanzienlijk lager. De voornaamste verliezen die optreden zijn onder andere een onvolledig benutte compressieverhouding, warmteverliezen van het koelwater, een niet ideaal gasmengsel, onvolledige verbranding, wrijvingsverliezen, smoorverliezen, etc. Deze verliesposten zijn de oorzaak voor een aanzienlijk lager rendement in werkelijkheid dan wat theoretisch haalbaar is. (Cogen Vlaanderen, 2015)



Figuur 8: Ideale Otto cyclus

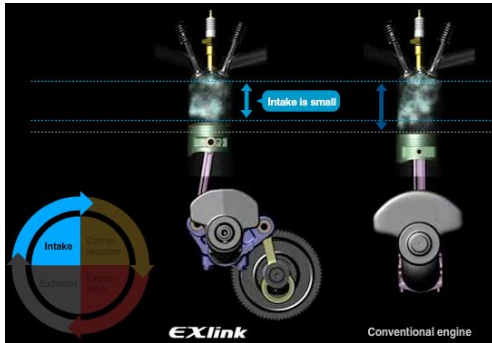


Figuur 9: Reële cyclus in de motor

De grootste nadelen van de inwendige verbrandingsmotoren voor micro-WKK toepassingen zijn het frequente onderhoud, de vibraties en het geluidsniveau. Verschillende onderdelen van de motor zoals de olie, filters, koelvloeistof en bougies moeten regelmatig onderhouden worden wat hinderlijk kan zijn in een huishoudelijke toepassing. Daartegenover staat dat het wel een beproefde technologie is die lage installatiekosten heeft (Beith, 2011).

### 1.6.1.3. Exlink motor

Er bestaan micro-WKK's met interne verbrandingsmotoren die draaien op een speciaal type interne verbrandingsmotor. Zo heeft Honda een motor geproduceerd die gebaseerd is op de Atkinson-cyclus. Het verschil ten opzichte van een klassieke verbrandingsmotor zit in de grootte van de expansieratio t.o.v. de compressieratio. De expansieratio is namelijk 1,4 keer groter. In een conventionele motor gebaseerd op de Otto cyclus zijn de bewegingen van de zuiger even groot. Bij de nieuwe motor zijn de expansie en uitlaat beweging echter groter dan deze van een conventionele motor en zijn de inlaat en compressie beweging kleiner (zie Figuren 10 tot 13). Hierdoor kan met minder brandstof meer arbeid verricht worden.



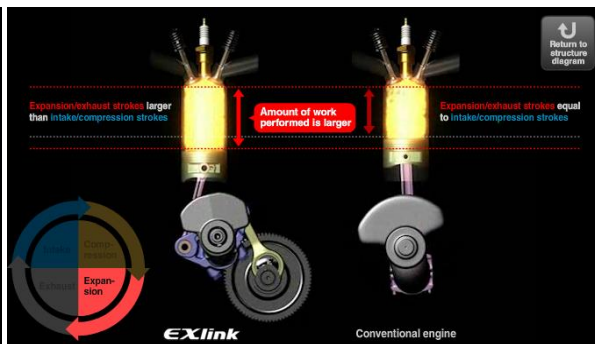
Figuur 10 Inlaatslag is kleiner



Figuur 11 : Het gas wordt gecprimeerd

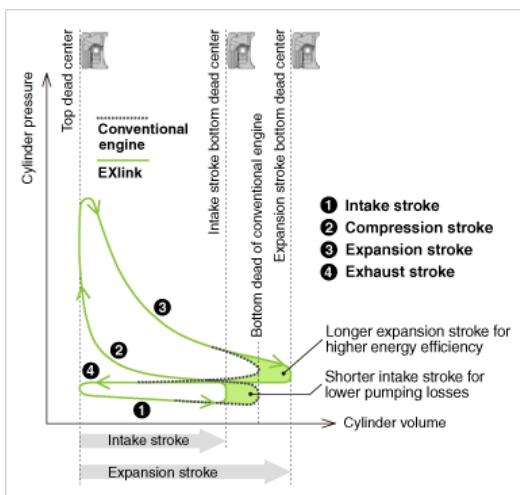


Figuur 12: Het gas wordt ontstoken

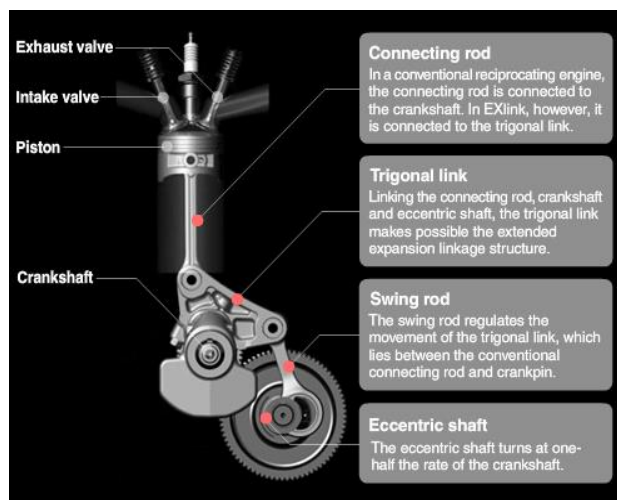


Figuur 13 : De expansieslag is groter

Door de verschillende grootte van inlaat en uitlaat is de motor efficiënter. Wanneer dit uitgezet wordt in grafiekvorm is duidelijk te zien dat er meer arbeid kan verricht worden.



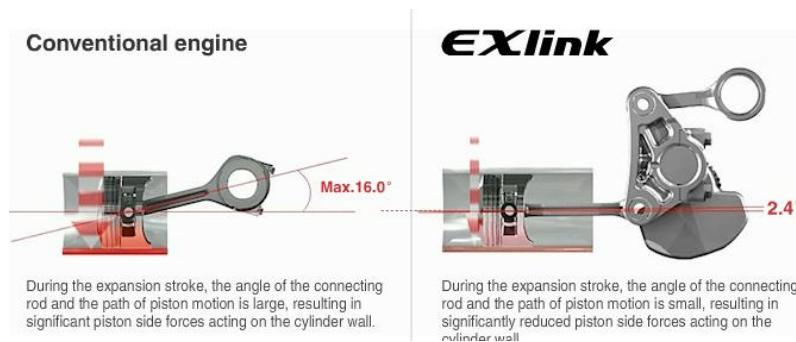
Figuur 14 : De Atkinson cyclus



Figuur 15 : Krukas systeem

De nieuwe motor heeft een trigonale verbinding die zich tussen de staaf van de zuiger en de krukas bevindt. Dit trigonaal verbindingsstuk is eerst vastgemaakt aan een 'swing rod' die op zijn beurt verbonden is met een excentrische as. De excentrische as draait maar op halve snelheid van de krukas waardoor de zuiger lange en korte bewegingen kan maken. De korte bewegingen worden gebruikt voor de inlaat en compressie en de lange bewegingen voor de uitlaat en expansie. Door dit speciale systeem met verlengde expansieslag zou er verwacht kunnen worden dat er meer motorwrijving zou ontstaan. De wrijving zorgt voor het grootste deel van het geluid dat de motor produceert. Wanneer bij een conventionele motor het expanderende gas de piston onder druk zet, ontstaan er zijdelingse krachten op de wanden van de zuigerkamer waardoor de wrijving ontstaat.

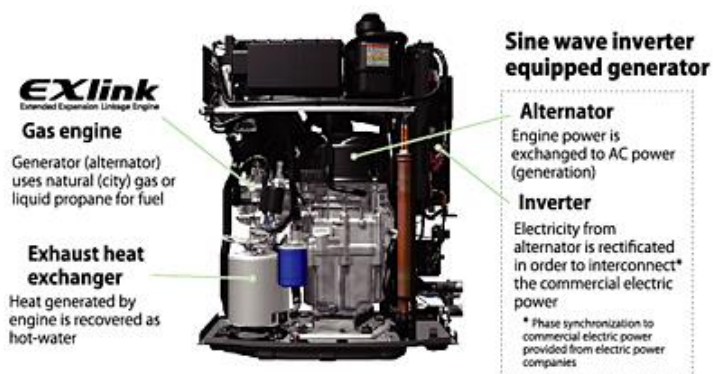
De grootste beïnvloedende factor bij het ontstaan van de wrijving is de hoek tussen het drijfstaaf van de zuiger naar de krukas en de zuigerwand. Bij de EXlink motor is deze hoek vele malen kleiner dan bij een conventionele motor (zie Figuur 16) waardoor ook de ontstane zijdelingse krachten die ontstaan bij de expansie minder dan de helft zijn van deze bij een conventionele motor. Zelfs met de vele extra onderdelen die de nieuwe motor heeft is de totale wrijving die ontstaat in de machine even groot als deze bij een conventionele motor (Honda, 2015).



Figuur 16 : Ontstaan van zijdelingse krachten

De cogeneratie komt tot stand wanneer de motor verbonden wordt met een generator om stroom te produceren en de koeling van de motor gebruikt wordt voor de warmteproductie.

Er is namelijk een warmtewisselaar aangeschakeld op de uitlaatgassen en de warmte die geproduceerd wordt tijdens de expansie van het brandstofmengsel wordt ook gerecupereerd via het koelwater van de motor. Zo wordt warmte gegenereerd op 75°C die dan dient voor de productie van warm water of vloerverwarming.

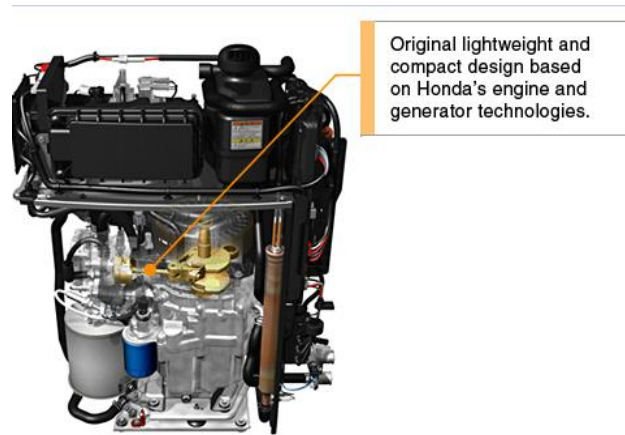


Figuur 17 : Opbouw WKK gebaseerd op EXlink motor





*Figuur 18 : Koeling uitlaatgassen*



*Figuur 19 : Verbinding motor met generator*

De koeling van de uitlaatgassen gebeurt in een apart deel van de micro-WKK. De uitlaatgassen worden afgeleid en over een '*three-way catalytic converter*' gezonden zodat er minder schadelijke stoffen overblijven in de uitlaatgassen. De koelvloeistof loopt rond de '*catalytic converter*' en neemt zo de warmte op terwijl de gassen naar beneden vloeien door de warmtewisselaar. Via een koelluchtcircuit wordt het bovenste deel van de WKK gekoeld zodat de koeling van de elektronische componenten los staat van de koeling van de motor.

De krukas van de motor doet mede dienst als rotor van de generator die ernaast staat. Op de rotor zijn magneten vastgemaakt die zorgen voor geïnduceerde spanningen in de stator en dus ook voor de stroom die geleverd wordt door de WKK.

## 1.6.2. Brandstofcellen in micro WKK toepassingen

### 1.6.2.1. Inleiding

Een brandstofcel wordt meestal gedefinieerd als een elektrochemische cel waarbij de chemische energie van een brandstof continue kan worden omgezet in elektrische energie. Dit wordt bereikt door gebruik te maken van een systeem waarin een redoxreactie plaatsvindt. De reductie- en oxidatiereactie worden fysiek van elkaar gescheiden door een separator (een elektrolyt of membraan) opdat de elektronenuitwisseling tussen deze twee halfreacties gecontroleerd kan worden.

De chemische energie van de brandstof wordt dus niet eerst omgevormd naar thermische energie (bvb. via verbranding) en daarna naar mechanische energie om een generator aan te drijven zoals bij de klassieke elektriciteitsopwekking wordt gedaan. De chemische energie wordt echter direct omgezet in elektriciteit waardoor er minder verliezen zijn. De meest gebruikte brandstofcel werkt op zuivere waterstof (brandstof) en zuurstof (oxidant) waarbij als restproducten water, warmte en elektrische stroom tevoorschijn komen.

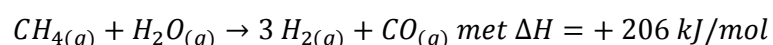
Het grote nadeel van brandstofcellen is dat ze voorlopig nog maar een beperkte levensduur getoond hebben. Elk jaar daalt het rendement van de stack totdat ze na 5-7 jaar vervangen moet worden. Aangezien de stack de grootste kost vormt van een brandstofcel-WKK is dit een belemmering om een toestel snel terug te verdienen. Hiernaast laat de lange opstarttijd snelle start/stop cycli niet toe waardoor een continue werking beoogd moet worden. In combinatie met het beperkte thermische vermogen zorgt dit ervoor dat vooral passiefwoningen interessant kunnen zijn voor deze technologie.

### 1.6.2.2. De brandstof voor de brandstofcel

De brandstofcel heeft in bij alle gevallen H<sub>2</sub>-gas nodig aan zijn ingang om te werken want bij deze brandstof kan de grootste spanning over de cel bereikt worden. Dit kan rechtstreeks toegeleverd worden indien men al over een grote voorraad van het gas beschikt in een opslagplaats maar meestal moet het geproduceerd worden in een 'reformer' of omvormer. Hierbij wordt van aardgas vertrokken en via chemische reacties wordt het omgevormd tot zuiver waterstofgas.

Hiertoe bestaan verschillende methodes, namelijk steamreforming, partial oxidation en autothermal reforming. Steam reforming is de meest gebruikte methode omdat er hogere concentraties waterstof geproduceerd worden waardoor er tot 30% minder brandstof nodig is dan bij de andere methodes (Hubert, 2006).

Bij steam reforming wordt aardgas samengevoegd met stoom bij een temperatuur van 700° tot 850°. Dit is een endotherme reactie, dus moet er energie toegevoegd worden om de reactie te laten doorgaan onder de vorm van stoom. Deze reactie gaat dan ook bij voorkeur door bij hoge temperaturen. (Lin, 2010)



Deze reactie is sterk endotherm omdat het verbreken van de bindingen in het water meer energie vraagt dan er vrijkomt bij de oxidatie van de koolstof in het methaan. Dit kan gestaafd worden via de wet van Hess. Indien een reactie bestaat uit een som van twee of meerdere deelreacties, dan is de reactie-enthalpie gelijk aan de som van de reactie-enthalpieën van de deelreacties. Dit is een gevolg van de wet van behoud van energie, de enthalpieverandering is namelijk onafhankelijk van de afgelegde weg. Het aantal reacties tussen de begintoestand en eindtoestand maakt geen verschil uit voor de totale enthalpieverandering tussen de begin en eindtoestand.

Voor de eerste reactie kan de wet van Hess als volgt worden geschreven.

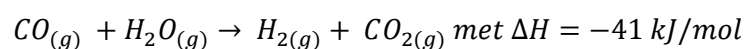
$$\Delta H = \sum 3 * H_f(H_2) + 1 * H_f(CO) - \sum 1 * H_f(CH_4) + 1 * H_f(H_2O(g))$$

Tijdens de reactie gebeuren 2 dingen. De bindingen van het methaan en water worden verbroken en tussen de losse chemische elementen van het reeds verbroken methaan en water worden nieuwe bindingen gelegd. Bij het verbreken van de bindingen in methaan en water komt de energie vrij die opgeslagen was bij de vorming van deze 2 molecules. In het geval van water komt er geen energie vrij maar moet er veel energie geïnvesteerd worden om de sterke bindingen tussen zuurstof en waterstof te verbreken. Ook voor het verbreken van de bindingen in het methaan is veel energie nodig, zij het wel minder dan voor het water. Hierna worden zowel waterstofgas als koolstofmonoxide gevormd. Bij de oxidatie van de koolstof komt energie vrij maar deze energie volstaat niet om de verbrekingsenergie van het methaan en het water te compenseren. Bij de vorming van waterstofgas wordt een verbinding gelegd tussen 2 waterstoffen en zodoende bereiken beide waterstoffen een stabiele toestand waarbij hun buitenste schil volzet is. Voor deze reactie is dus geen energie vereist omdat atomen altijd streven naar een stabiele toestand en de vormingsenthalpie is dan ook gelijk aan nul.

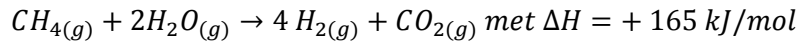
$$\Delta H = 3 * 0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 1 * \left(-110,52 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) - 1 * \left(-74,85 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) - 1 * \left(-241,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) = +206 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

De volledige reactie is dus endotherm omdat er meer energie nodig is voor het verbreken van de eerste moleculen dan er vrijkomt bij de vorming van de nieuwe moleculen. Dit betekent dat er continue energie moet blijven toegevoerd worden om de reactie te onderhouden.

Uit deze eerste reactie wordt een synthesesgas bekomen bestaande uit waterstofgas en koolstofmonoxide. In een tweede exotherme reactie wordt ook de koolstofmonoxide omgevormd tot waterstof a.d.h.v. stoom. Dit heet de "water-gas-shift". Het is een anorganische evenwichtsreactie die op hoge temperatuur uitgevoerd moet worden om voldoende CO om te zetten. Via katalysatoren zou de reactietemperatuur verlaagd kunnen worden maar dit brengt natuurlijk een bepaalde kost met zich mee.

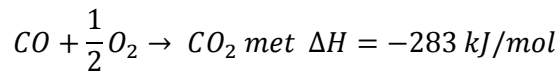


De vrijgekomen energie kan gebruikt worden om de reagentia van de eerste reactie voor te verwarmen. Na combineren van de twee reacties wordt de totale benodigde energie voor de omvormer bekomen.

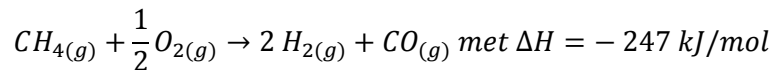


De 165 kJ per mol die nodig is om de gecombineerde reactie te laten slagen (en meer) wordt afhankelijk van het type brandstofcel bekomen door een deel van het aardgas te verbranden (PEMFC) of door warmterecuperatie uit de uitlaatgassen (SOFC). De overtollige warmte wordt dan in een latere fase ook nog gebruikt om warm water te produceren.

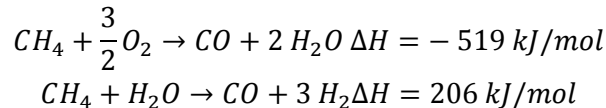
Na dit alles is er maximaal nog 1% koolstofmonoxide aanwezig in het brandstofmengsel. Door deze koolstofmonoxide te laten reageren met zuurstof wordt ze gereduceerd tot een aantal in de *parts per million*. Dit moet gebeuren bij de Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) omdat de werking ervan ernstig verstoord wordt door koolstofmonoxide. Koolstofmonoxide heeft namelijk een hoge affiniteit voor katalysator bij de anode (vooral platinum) waardoor het de stroom van brandstof in de PEMFC verstoort. (Liu, 2006)



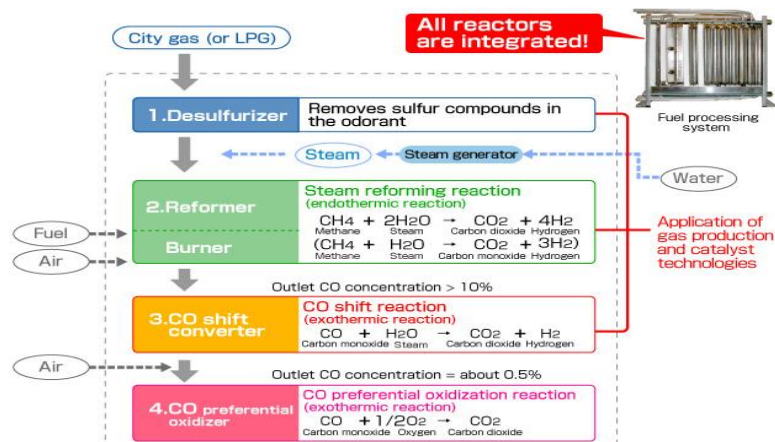
Een tweede, minder voorkomende, mogelijkheid om zuiver H<sub>2</sub>-gas te bekomen, bestaat uit de partiële oxidatie van het methaangas (Lin, 2010).



De laatste, en minst voorkomende, optie is de autothermal reforming en dit is een combinatie van partiële oxidatie en steam reforming (Lin, 2010).

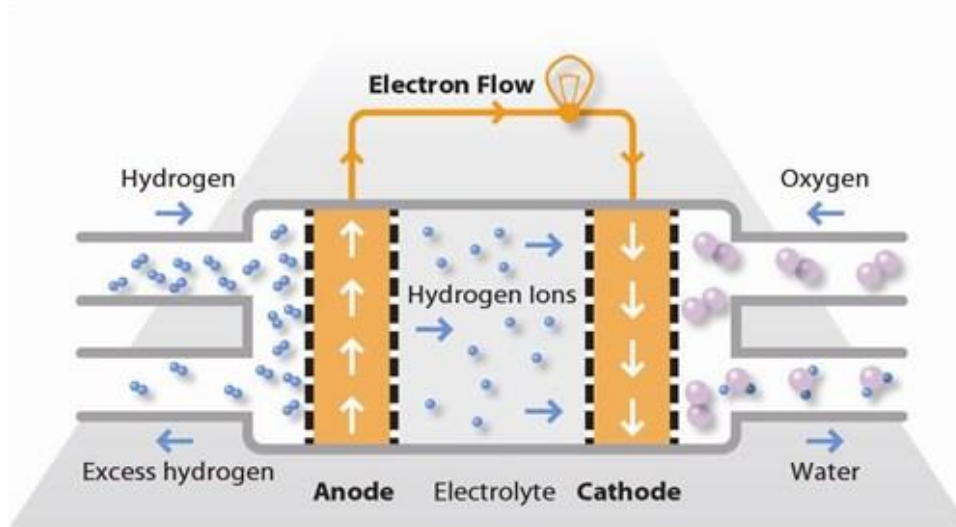


Het proces van steam reforming wordt in de praktijk ook toegepast zoals vereenvoudigd wordt weergegeven op de site van een fabrikant in een werkingschema van de omvormer.



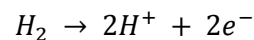
Figuur 20: Fuel reforming

### 1.6.2.3. PEMFC

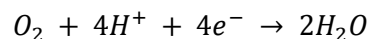


Figuur 21 : PEMFC werking

De basisstructuur van een Proton Exchange Membrane-brandstofcel bestaat uit een elektrolytlaag die in contact staat met een anode en een kathode. De elektrolytlaag dient als fysieke scheidingslaag om menging van de brandstof en de oxidant te voorkomen. Aan de anode wordt de brandstof geleverd terwijl aan de kathode de oxidant wordt toegevoegd. Er wordt beoogd een redoxreactie te creëren door aan de anode middels een katalysator de waterstof te splitsen in waterstofionen (H<sup>+</sup>) en vrije elektronen.



De waterstofionen bewegen door het elektrolyt richting de kathode. De vrije elektronen gaan via een geleider naar de kant van de kathode omdat de elektrolytlaag enkel de waterstofionen doorlaat. Deze bewegende ladingen vormen de geleverde stroom door de brandstofcel. Aan de kathode komen dus de waterstofionen, de vrije elektronen en de oxidant terug samen om water te vormen.



De totale reactie wordt dan



Deze reactie is sterk exotherm waarbij een deel van de energie gebruikt wordt om elektrische arbeid te verrichten en een ander deel onder de vorm van warmte voorkomt. De wet van Hess wordt terug gebruikt om de enthalpieverandering te bepalen in de reactie.

$$\Delta H^0_{f(\text{product})} - \Delta H^0_{f(\text{reagentia})} = -285,9 \text{ kJ/mol}$$

De bijhorende entropieverandering is

$$S^0_{f(\text{product})} - S^0_{f(\text{reagentia})} = (70,0) - \left(\frac{1}{2} * 205,0 + 130,6\right) = -163 \text{ J}/(\text{K} * \text{mol})$$

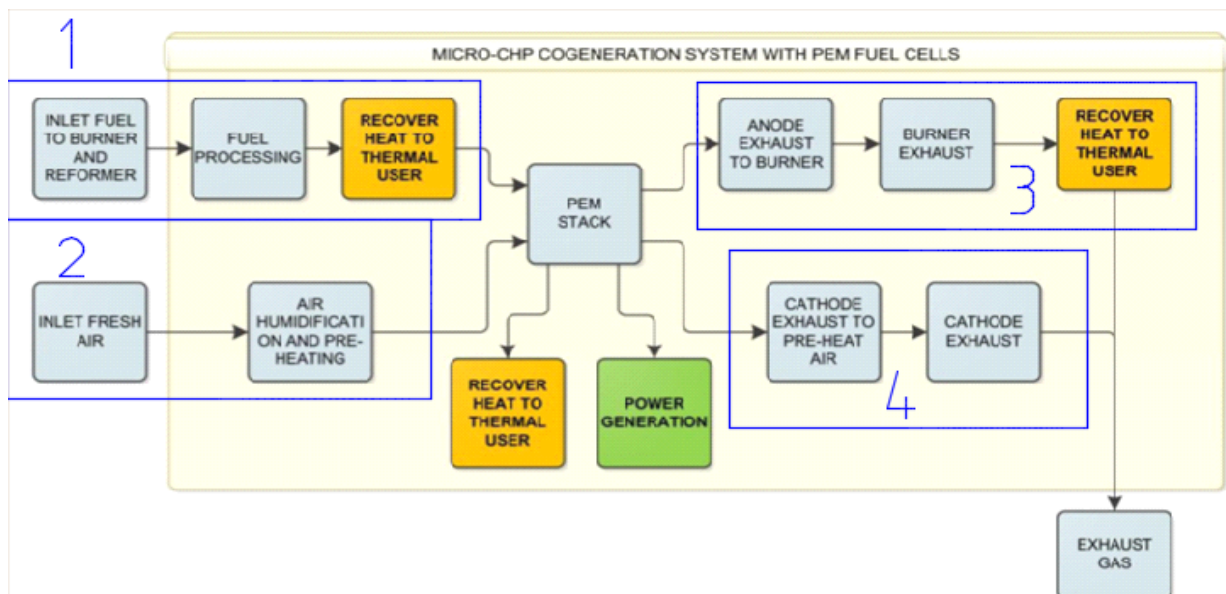
Als de entropieverandering negatief is, heeft de reactie meer orde teweeggebracht. Vooraf waren er 3 moleculen (2 waterstofgasmoleculen en 1 zuurstofgasmolecule) en na de reactie zijn er nog maar 2 moleculen (2 watermoleculen). Er is dus meer orde gebracht. De entropie van een gesloten systeem kan alleen maar toenemen of gelijk blijven, maar nooit afnemen. De entropie in een open systeem kan wel afnemen, maar alleen dan als de entropie van de omgeving minstens zo veel toeneemt. De reactie zal dus ook warmte afgeven aan de omgeving om zijn entropieafname te compenseren.

De totale energieverandering die vertegenwoordigd wordt door de enthalpieverandering bestaat dus voor een stuk uit afgegeven warmte en een stuk uit elektrische arbeid die geleverd wordt door de brandstofcel. De maximale elektrische arbeid die verricht kan worden is het verschil van de enthalpieverandering en de entropieverandering vermenigvuldigd met de reactietemperatuur.

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T * \Delta S^0 = -285,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - (298 \text{ K}) * \left(-163 \frac{\text{J}}{\text{K} * \text{mol}}\right) = -237,2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

De brandstofcel zal dus zelf ook warmte produceren naast de elektrische arbeid die ze verricht en deze warmte wordt opnieuw via een warmtewisselaar gebruikt om warm water te produceren.

De brandstofcel zelfs werkt maar op een temperatuur tussen de 60°C en de 75°C terwijl de reformer op een temperatuur van meer dan 700°C ageert. Na elke stap in het omvormproces moet het gas dan ook gekoeld worden en deze warmte wordt elders gebruikt om voor te verwarmen. Dit wordt vereenvoudigd weergegeven in figuur 22 en in detail in figuur 23.

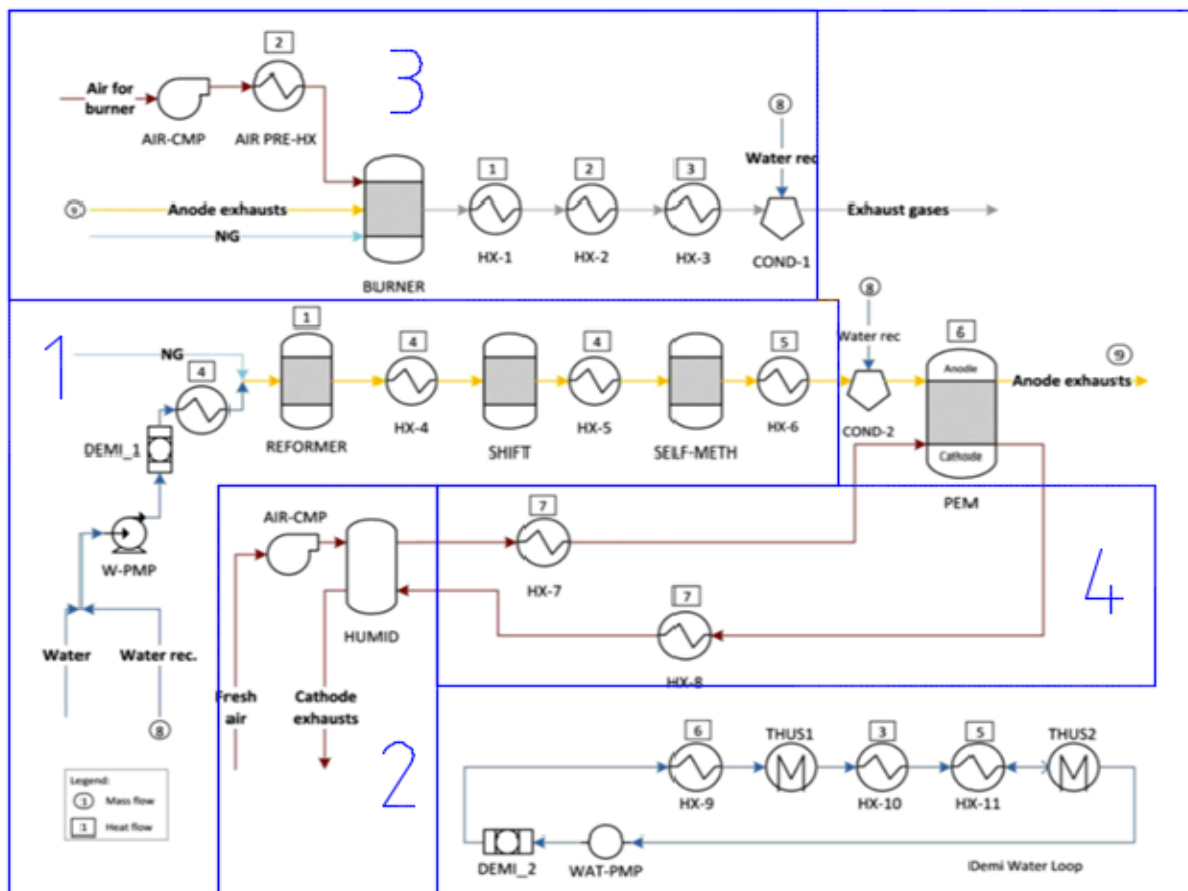


Figuur 22 : Systeemschema PEMFC

Uit het volledige systeemdiagram van figuur 23 is dan ook te zien dat na de reformer, de water-gas-shift en verwijdering van de koolstofmonoxide er telkens een warmtewisselaar staat. Deze warmte wordt gebruikt om de stoom te maken voor de steam reforming en voor bijvoorbeeld een vloerverwarmingssysteem.

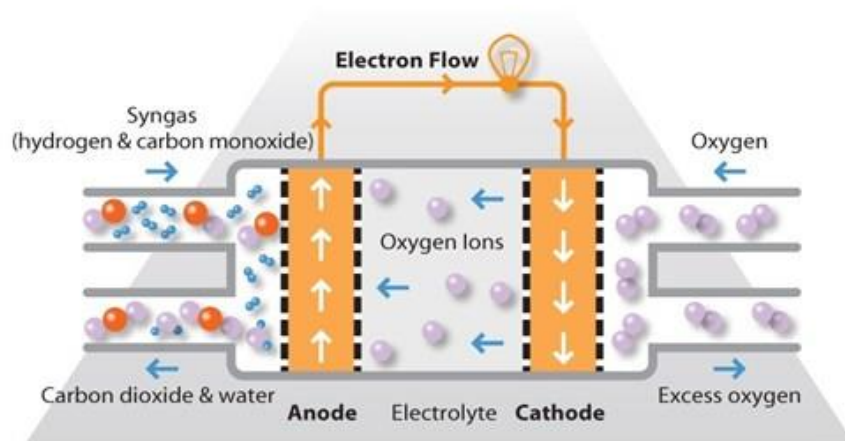
Niet alle waterstof gas dat toekomt in de brandstofcel wordt ook werkelijk verbruikt waardoor er in de uitlaatgassen nog altijd een bepaalde molfractie  $H_2$ -gas zit. Dit gas wordt in combinatie met een hoeveelheid  $CH_4$  in een nabrander verbrand om de omvormer op temperatuur te houden ( $>700^{\circ}C$ ) maar ook om de lucht net voor de nabrander op te warmen en als laatste om het warmwatersysteem op temperatuur te brengen (Beith, 2011). De plaatsing van de warmtewisselaars en het hergebruik van hun warmte wordt weergegeven in figuur 23.

Wanneer figuur 23 vergeleken wordt met figuur 22 dan is duidelijk dat de verschillende processen terugkomen. Figuur 23 werd opgedeeld in 4 zones. In de eerste zone vindt de *fuel processing* plaats. Om de omvormer op temperatuur te houden wordt de warmte uit warmtewisselaar 1 toegevoegd. Deze warmtewisselaar 1 staat net na de brander die het overgebleven waterstofgas in de uitlaatgassen van de brandstofcelanode samen met verse lucht en  $CH_4$  verbrandt in zone 3. In zone 2 wordt verse lucht voorverwarmd en bevochtigd alvorens ze naar de brandstofcelkathode gevoerd wordt. In de vierde zone wordt eerst de warmte onttrokken aan de uitlaatgassen van de kathode alvorens ze definitief afgevoerd worden.



Figuur 23: Onderdelen PEMFC systeem

#### 1.6.2.4. SOFC



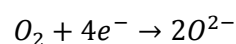
Figuur 24: SOFC werking

SOFC staat voor solid oxide fuel cell. Deze technologie maakt dan ook gebruik van een vaste oxidelaag als elektrolyt. Dit elektrolyt zorgt voor het transport van de negatieve zuurstofionen van de kathode naar de anode. De recombinatie van de negatieve zuurstofionen met de koolstofmonoxide en waterstofgas (synthesegas) gebeurt dan ook aan de anode.

De SOFC-technologie biedt enkele belangrijke voordelen t.o.v. PEMFC-technologie. SOFC is brandstofflexibel, wat betekent dat er andere brandstoffen kunnen gebruikt worden dan puur waterstofgas. Het systeem kan nu koolstofmonoxide verdragen waardoor waterstofcarbonaten kunnen gebruikt worden als brandstof. Korte ketens zoals ethanol kunnen dan ook als brandstof dienen naast aardgas. Alle gebruikte componenten in de brandstofcel zijn uit een vaste stof gemaakt waardoor er geen bevochtiging meer nodig is van het elektrolyt zoals bij PEMFC. Als laatste is de geproduceerde warmte van hoogwaardige kwaliteit door de hoge werkingstemperatuur (Beith, 2011).

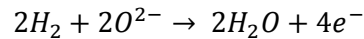
SOFC werkt op een temperatuur van ongeveer 1000°C omdat het gebruikte vaste elektrolyt (zirkoniumdioxide verrijkt met yttriumoxide) dan geleidend wordt voor zuurstofionen en niet geleidend wordt voor elektronen. Hierdoor kunnen de elektrochemische reacties plaatsvinden aan de elektroden zonder dat er een nood is aan een katalysator. De gebruikte materialen voor de brandstofcel moeten echter tegen de hoge temperaturen kunnen waardoor SOFC-brandstofcellen nog altijd duur blijven. Er wordt bijgevolg veel onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om deze op een lagere temperatuur te laten werken.

Aan de kathodekant worden de zuurstofatomen omgevormd naar negatieve ionen en elektronen.





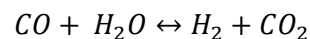
Indien er enkel waterstofgas aanwezig is aan de anode dan komt de volgende reactie voor bij een temperatuur van 1273 K.



De algemene reactie in de brandstofcel wordt dan

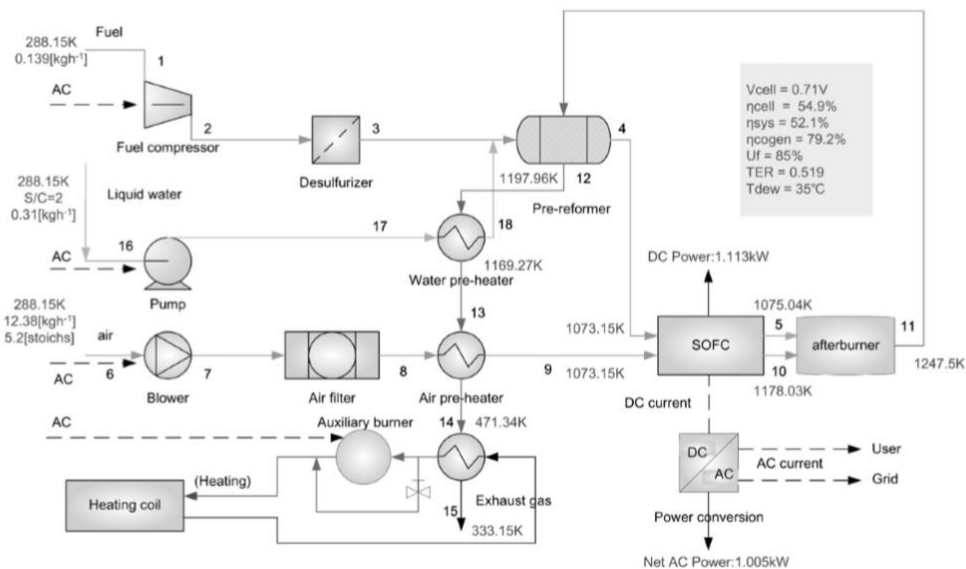


De aanwezigheid van koolstofmonoxide (synthesegas) aan de anode zorgt hier in tegenstelling tot bij de PEMFC niet voor een probleem aangezien dan de water-gas-shift optreedt en het geproduceerde waterstofgas als brandstof kan dienen voor de reactie met de negatieve zuurstofionen.



De SOFC-brandstofcellen kunnen op verschillende manieren uitgevoerd worden. Een eerste manier is het klassieke platen systeem waar de anode, elektrolytlaag en de kathode als platen worden uitgevoerd. De tweede manier werkt met een buissysteem waar de brandstof aan de binnenkant van de buis loopt en de oxidant aan de buitenkant.

Net zoals bij de PEMFC wordt niet alle H<sub>2</sub>-gas verbruikt in de brandstofcel. Dit wordt opnieuw verbrand om de stoom te produceren voor de steam reforming en om de CH<sub>4</sub> die omgevormd moet worden op te warmen. Wanneer de meeste warmte uit deze uitlaatgassen gehaald is, kan de rest gebruikt worden voor de productie van warm water. In onderstaande figuur wordt de werking duidelijk van alle systeemcomponenten waarbij ook de temperatuur waarop ze werken is weergegeven.



Figuur 25: Werkingsfiguur van een SOFC

### 1.6.3. Stirling technologie voor micro-WKK toepassingen

#### 1.6.3.1. Inleiding

De stirlingmotor is een motor die werkt op het principe van de stirling-cyclus. Hierbij wordt een beweging bekomen door het uitzetten en inkrimpen van een vloeistof of gas. Het principe werd al reeds in 1816 op punt gesteld door Robert Stirling maar vindt heden ten dage nog geen grootschalige toepassing.

Wegens het hoge bekomen theoretische rendement kan de technologie zeker zijn nut bewijzen voor een micro-WKK toepassing. Het grote voordeel van de stirlingmotor is zijn stille werking. De gassen die uitzetten en inkrimpen verlaten nooit de motor. Er moeten namelijk geen uitlaatgassen de motor verlaten en er vinden geen ontploffingen plaats binnenin de motor. De brandstof die de motor vereist kan van uiteenlopende afkomst zijn daar er enkel warmte nodig is voor de werking van de motor. Deze kan ontstaan vanuit een verbranding van een fossiele brandstof of via zonnewarmte.

Het hele werkingsprincipe gaat uit van de algemene gaswet. Een bepaald volume gas dat opgesloten is, zet uit naarmate de temperatuur van het gas stijgt. Omgekeerd daalt het volume van het gas wanneer dit afkoelt.

$$p * V = n * R * T$$

met: p de druk [Pa]

V het volume [m<sup>3</sup>]

n de hoeveelheid gas [mol]

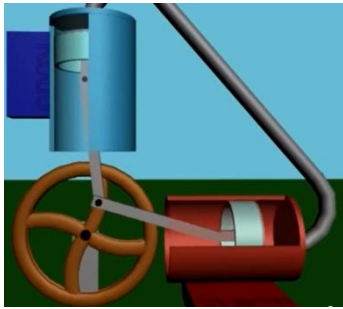
R de gasconstante [ $\frac{J}{K * mol}$ ]

T de absolute temperatuur [K]

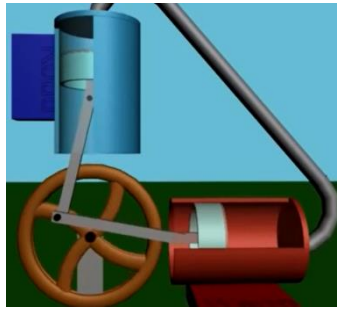
Aangezien de stirlingmotoren uitgaan van de uitzetting en inkrimping van gassen moet verzekerd kunnen worden dat de motor perfect afgesloten kan worden. In het verleden bleken de sluitingen het na een tijd te begeven bij bepaalde toestellen. Ook het grotere thermische vermogen, dan bij bijvoorbeeld de brandstofcellen, zorgt voor de nood aan een groot buffervat dat meer ruimte inneemt.

#### 1.6.3.2. Alpha-configuratie

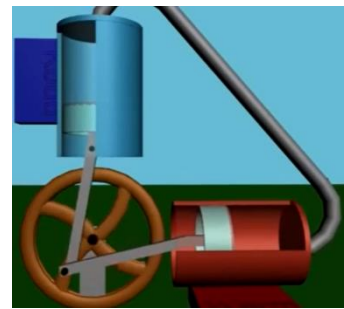
Een mogelijke configuratie van een stirlingmotor is de alpha-configuratie waarbij 2 cilinders verbonden zijn met elkaar en hetzelfde gas bevatten. De ene cilinder wordt gekoeld terwijl de andere cilinder opgewarmd wordt. Elke cilinder bevat een zuiger die mee kan bewegen met het uitzetten of inkrimpen van het gas. De zuigers zijn verbonden met een draaiwiel waarmee eventueel een generator kan aangedreven worden.



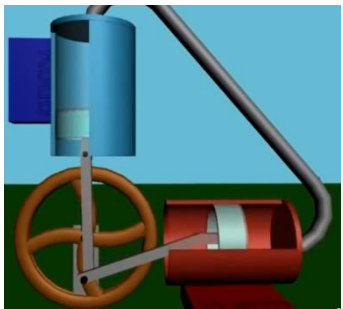
Figuur 26 : Start cyclus



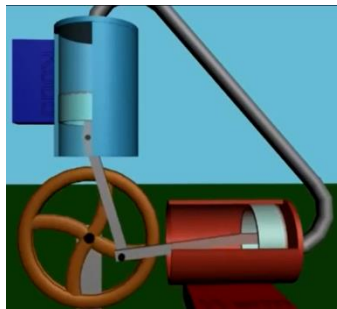
Figuur 27 : Het gas expandeert



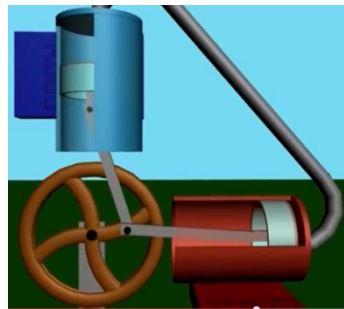
Figuur 28 : Het gas bereikt maximaal volume



Figuur 29: Compressie rode zuiger



Figuur 30 Alle gas in blauwe cilinder



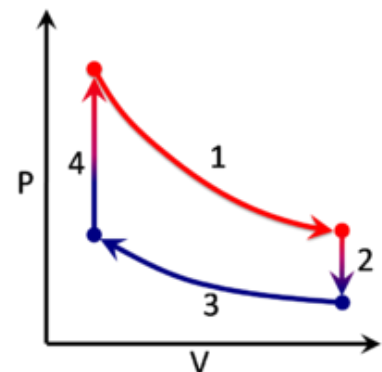
Figuur 31: Nieuwe cyclus

Het proces valt onder te verdelen in 4 stappen :

1. Het gas bevindt zich deels in de buis en deels in de warme cilinder. Door de temperatuurstijging van het gas en het vaste volume verhoogt de druk en duwt het gas de rode zuiger naar links. Ook de blauwe zuiger wordt weggeduwd omdat het gas in alle richting expandeert totdat het zijn maximum volume heeft bereikt.
2. Doordat de zuigers weggeduwd worden door het uitzettende gas, wordt het draaiwiel aan het roteren gebracht. Het draaiwiel zal in een vlotte beweging draaien waarna op een bepaald tijdstip door het momentum van het draaiwiel de rode zuiger teruggeduwd zal worden. Het gas wordt van de rode cilinder naar de blauwe geduwd.
3. Het draaiwiel blijft bewegen en wanneer het de stand bereikt heeft van Figuur 30 zal het gas beginnen samentrekken door de koeling van de blauwe cilinder en de blauwe zuiger zal opnieuw naar boven getrokken worden.
4. Door de opwaartse beweging van de blauwe zuiger wordt het gas terug naar de warme cilinder geduwd waarna de cyclus opnieuw kan starten.

Deze 4 verschillende stappen vinden hun oorsprong in het druk-volume diagram dat de stirling cyclus vertegenwoordigt.

In de eerste stap wordt een isotherme expansie ondergaan. Vervolgens wordt isochore warmte afgevoerd waardoor de druk en de temperatuur daalt. Als derde stap vindt een isotherme compressie plaats die gevolgd wordt door een isochore warmtetoevoer.



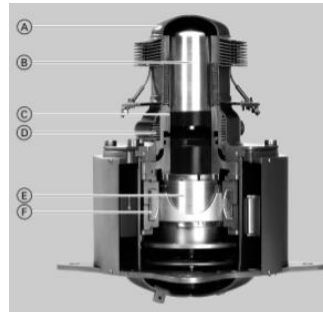
Figuur 32: Thermodynamische Stirling-cyclus

### 1.6.3.3. Vrijbewegende zuiger stirlingmotoren

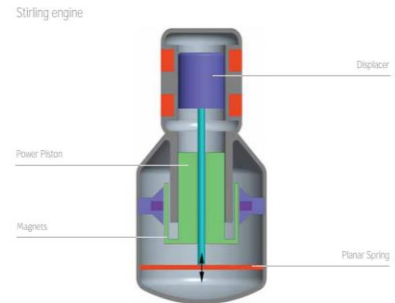
De stirling motoren die in de meeste micro-WKK's van dit eindwerk opgenomen worden, werken op een ander type van stirling motor. In bijna alle systemen is een lineaire vrijbewegende zuiger stirlingmotor geïnstalleerd.



Figuur 33 : Motor van Stirling 3



Figuur 34 : Motor van Stirling 4



Figuur 35 : Motor van Stirling I

In een hermetisch afgesloten gedeelte bevindt zich heliumgas (dit kan verschillen afhankelijk van het model). Het gas wordt door een ringbrander in het bovenste gedeelte verwarmd en in het onderste gedeelte weer afgekoeld door koelwater. De warmte van de ringbrander wordt overgebracht op de stirlingkop door warmteoverdrachtsvinnen. De temperatuur kan hier dus oplopen tot boven 500°C. Tussen het warme en het koude gedeelte van de stirlingmotor bevindt zich een warmtebuffer (regenerator) om warmteoverdracht tussen het koude en warme gedeelte te vermijden.

De werkingswarmte van de stirlingmotor gaat naar de warmtewisselaar van de puntlastketel en wordt gebruikt voor het opverwarmen van water. Het koude gedeelte van de generator wordt doorstroomd met het retourwater van de CV.

De precieze werking gaat als volgt. Bij de start zit het gas onderaan en wordt het opgewarmd. Hierna beweegt de verplaatsingszuiger naar beneden. Het heliumgas beweegt langs deze verplaatsingszuiger naar boven en wordt hier gekoeld. De koeling van het gas zorgt ervoor dat het inkrimpt en bijgevolg een andere werkende zuiger meetrokt. Hierna beweegt de verplaatsingszuiger weer naar boven. Het gas beweegt langs de verplaatsingszuiger terug naar beneden en warmt op. Door de uitzetting van het warme helium wordt de werkende zuiger teruggeduwd. Deze op en neer gaande beweging zorgt voor de stroom die opgewekt wordt in de koperen wikkeling eromheen. De verplaatsingszuiger is gekoppeld aan de werkende zuiger maar loopt 90° voor.

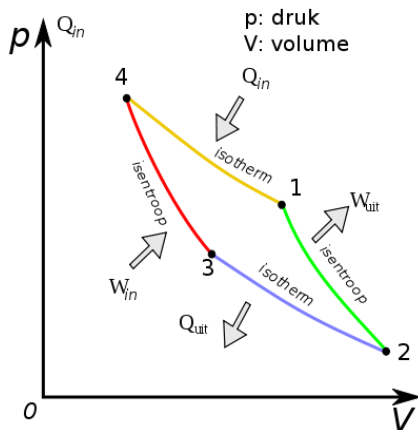


Figuur 36: Werking vrijbewegende zuiger stirlingmotor

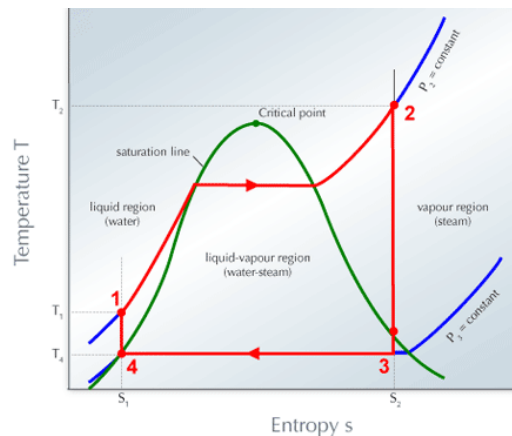
### 1.6.4. Organische Rankine Cyclus

Een organische rankinecyclus of ORC is een variant op het klassieke rankine-proces met stoom. Bij een ORC wordt een organisch oplosmiddel gebruikt in plaats van stoom. Deze organische oplosmiddelen hebben een lager kookpunt dan water waardoor warmte op lagere temperaturen kan gebruikt worden om het proces aan te drijven.

Een rankine-proces of rankinecyclus is een thermodynamisch kringproces dat warmte in mechanische arbeid omzet. De warmte om de vloeistof te laten verdampen wordt extern aangevoerd en kan via verschillende energiebronnen bekomen worden. De Rankinecyclus benadert de ideale carnotcyclus maar het verschil zit in de toevoer en afvoer van warmte, die in de rankinecyclus op gelijke druk gebeurt maar in ideale carnotcyclus bij gelijke temperatuur. Er is een waterpomp nodig om het condensaat van de condensor op de vereiste druk te brengen. De energie van de ketelvoedingswaterpomp gaat hier verloren. Om te voorkomen dat er condensaat in de turbine terecht komt na het uitzetten van het verdampte mengsel (en verrichten van arbeid) wordt de stoom eerst oververhit. Deze oververhitte stoom kan dan expanderen zonder dat hierbij een natte stoom bekomen wordt.

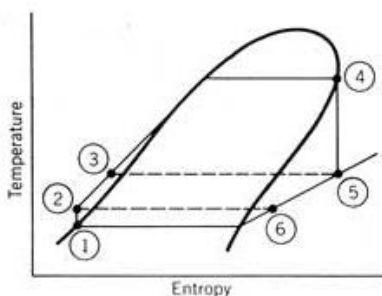


Figuur 37 :Ideale carnotcyclus



Figuur 38: Rankinecyclus water

Net zoals bij een klassieke rankine-cyclus wordt bij een organische rankinecyclus de werkende vloeistof naar een boiler opgepompt waarna het verdampt. Hierna laat men de droge damp expanderen in een turbine of andere soort expander die op zijn beurt een generator aandrijft. Het uitgezette mengsel wordt uiteindelijk terug door een condensor gevoerd die via een warmtewisselaar het fluidum weer laat condenseren.



Figuur 39 :Organische rankine cyclus

Als werkende stof wordt vaak pentaan, toluen of ammoniak gebruikt. Het nadeel van deze stoffen is dat ze duurder en gevaarlijker zijn dan water. Hierdoor moeten lekken vermeden worden en moet de beveiliging groter zijn. Het voordeel van organische werkstof is dan weer dat door de lagere verdampingstemperaturen en andere vorm van de fase lijn van de organische stof er minder condensatie optreedt in de turbine dan wanneer stoom gebruikt wordt. Er moet dan ook minder tot geen oververhitting gebeuren want er is geen risico op condensatie tijdens de expansie.

## 2. Technische analyse van de gevonden micro-WKK's

### 2.1. Methodiek

#### 2.1.1. Opbouw matrices

Om tot een vergelijking te komen van alle verschillende modellen wordt de Kesselring-methode gebruikt. Hierbij worden alle in rekening gebrachte parameters/criteria vergeleken met elkaar in een matrix om zo voor elke parameter een wegingsfactor te bekomen.

Alle parameters worden zowel verticaal als horizontaal opgesteld. Vervolgens wordt elke verticale parameter één voor één vergeleken met de horizontale parameters. Indien de horizontale belangrijker is dan de verticale wordt een 1 toegekend op die plaats. Wanneer alles vergeleken is met elkaar worden per horizontale parameter alle waarden opgeteld om zo de wegingsfactor te bekomen.

*Tabel 1 : Criteria technische beoordeling*

Criteria
Aankoopprijs
Levensduur
Brandstofflexibiliteit
CO <sub>2</sub> Terugverdientijd
Conformiteit PHR
FESR
Geluidsniveau
Geproduceerde eenheden
Grootte Buffervat
Import taks
Ingenomen Volume
Opstarttijd
Restproducten
Servicemogelijkheden
Transportvervuiling
Vereiste Aansluitingen
Onderhoudstermijn
Gamma
Kant en klaarheid
Exergiebehoud

Afhankelijk van de bril waardoor de analist kijkt kan de vergelijkingstabel anders ingevuld worden. Ieder persoon vindt andere criteria belangrijk. Een eerste keer werd de tabel ingevuld vanuit het standpunt dat de installatie liefst zo lang mogelijk probleemloos draait om de investering zo snel mogelijk terug te verdienen. Een tweede keer werd de tabel ingevuld vanuit het standpunt dat de installatie een zo groot mogelijke positieve impact moet hebben op het milieu ook al gaat dit gepaard met een hoge kost.

Tabel 2: Kesselringmatrix met als doel een korte SPB

	Aankooprij	Levensduur	Brandstofflexibiliteit	CO <sub>2</sub> Terugverdiertijd	Conformiteit PHR	FESR	Geluidsniveau	Geproduceerde eenheden	Grootte Buffervat	Import taks	Ingenomen Volume	Opstarttijd	Restproducten	Servicemogelijkheden	Transportvervuiling	Vereiste Aansluitingen	Onderhoudsinterval	Gamma	Kant en klaarheid	Exergiebehoud	Wegingsfactor	
Aankooprij	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	15
Levensduur	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	18
Brandstofflexibiliteit	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	8
CO <sub>2</sub> Terugverdiertijd	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
Conformiteit PHR	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	12
FESR	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	5
Geluidsniveau	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	11
Geproduceerde eenheden	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	17
Grootte Buffervat	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	13
Import taks	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Ingenomen Volume	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	6
Opstarttijd	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	11
Restproducten	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Servicemogelijkheden	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19
Transportvervuiling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
Vereiste Aansluitingen	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	7
Onderhoudsinterval	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	12
Gamma	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	8
Kant en klaarheid	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	16
Exergiebehoud	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	4

Tabel 3: Kesselringmatrix voor beste milieu-impact

	Aankooprij	Bewezen Levensduur	Brandstofflexibiliteit	CO <sub>2</sub> Terugverdiertijd	Conformiteit PHR	FESR	Geluidsniveau Geproduceerde eenheden	Grootte Buffervat	Importtax	Ingenomen Volume	Opstarttijd	Restproducten	Servicemogelijkheden	Transportvervuiling	Vereiste Aansluitingen	Onderhoudsinterval	Gamma	Kant en klaarheid	Exergiebehoud	Wegingsfactor	
Aankooprij	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	3
Levensduur	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	10
Brandstofflexibiliteit	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	12
CO <sub>2</sub> Terugverdiertijd	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	16
Conformiteit PHR	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	16
FESR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19
Geluidsniveau	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	7
Geproduceerde eenheden	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	9
Grootte Buffervat	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	11
Import tax	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
Ingenomen Volume	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
Opstarttijd	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	10
Restproducten	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18
Servicemogelijkheden	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	6
Transportvervuiling	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	12
Vereiste Aansluitingen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Onderhoudsinterval	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	7
Gamma	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	9
Kant en klaarheid	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	4
Exergiebehoud	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	16



Deze afzonderlijke criteria worden gebundeld in grote groepen die beoordeeld zullen worden.

### **Prijs**

- Aankoopprijs
- Importtaks

### **Commercialiseerbaarheid**

- Servicemogelijkheden
- Gamma
- Kant en klaarheid
- Vereiste aansluitingen
- Conformiteit PHR

### **Betrouwbaarheid**

- Levensduur
- Geproduceerde eenheden
- Onderhoudstermijn

### **Comfort**

- Ingenomen volume
- Geluidsniveau
- Opstarttijd
- Grootte buffervat

### **Milieu-impact**

- Brandstofflexibiliteit
- CO<sub>2</sub>-terugverdientermijn
- FESR
- Restproducten
- Transportvervuiling
- Exergiebehoud

Vervolgens wordt voor elke parameter getoetst hoe goed de verschillende micro-WKK's hieraan voldoen. De WKK's worden met elkaar vergeleken en zij die het beste scoren voor deze parameter krijgen een 4 en degene die het slechtst scoren een 1. Wanneer een bepaalde parameter niet te beoordelen is omdat er geen informatie over gevonden kon worden, zijn er 2 gebruikte oplossingen. Als de parameter gelinkt is aan een bepaalde technologie wordt een inschatting gemaakt aan de hand van de andere micro-WKK's met dezelfde technologie waarvoor wel informatie gevonden werd. Deze scores zullen dan ook cursief aangeduid worden. Indien de parameter niet technologiegebonden is en dus voor elk toestel anders is, wordt geen inschatting gemaakt en wordt de parameter niet beoordeeld.

*Tabel 4: Score technische criteria*

<b>Omschrijving</b>	<b>Score</b>
Voldoet het minst	1
	2
	3
Voldoet het best	4

## 2.1.2. Korte beschrijving micro-WKK's

### ICE 1

Deze micro-WKK, die werkt met een interne verbrandingsmotor, is in zijn land van herkomst vele duizenden malen geïnstalleerd geweest doordat de overheid het model zwaar gesubsidieerd heeft. Het heeft zijn deugdelijkheid bewezen en heeft met zijn lage aankoopprijs een belangrijke troef ten opzichte van de andere toestellen. Het beperkte volume van het buffervat zal echter een nadeel zijn voor directe implementatie op de Vlaamse markt.

### ICE 2

De micro-WKK draait op dezelfde technologie als de ICE 1 maar heeft een ander omhulsel. De Europese fabrikant heeft het systeem aangepast om te voldoen aan de Europese wetgeving en noden (groter buffervat en grote vermogen van de back up brander). Dit resulteert in een grotere aankoopprijs. Toch wordt het toestel al met succes in de buurlanden verkocht. Door de goede grootte van zowel het elektrisch (1 kW) als thermisch vermogen (2,5 kW) zal dit toestel een grote cash flow creëren bij de meeste Vlaamse gezinnen.

### Stirling 1

Dit product is al enige tijd op de markt en heeft met zijn relatief lage aankoopprijs kans om korte terugverdientermijnen te bekomen. De fabrikant maakt deel uit van een grote groep die onder andere ook de Stirling 2 produceert. De stirling-motor heeft een beperkter elektrisch rendement dan de andere technologieën waardoor het voor gezinnen met een grote elektriciteitsvraag minder geschikt is.

### Stirling 2

Deze stirling-WKK heeft dezelfde motor in zich als de stirling 1 maar heeft een groter buffervat dat inbegrepen is in de aankoopprijs. Het is een systeem dat gefabriceerd wordt in een buurland en daarom wordt het ook al ingevoerd en geïnstalleerd in België. Tot nu toe worden nog geen gebreken vastgesteld aan het toestel.

### Stirling 3

Dit product wordt gemaakt door een internationale Aziatische speler die het toestel al verdeelt in de UK en Nederland. Zijn beperkte aankoopprijs maakt het tot één van de meest interessante toestellen om op korte termijn de Belgische markt te 'veroveren'.

### Stirling 4

Ook deze WKK draait op dezelfde stirlingmotor als stirling 1 en 2 en heeft daarom grotendeels dezelfde technische karakteristieken. Het heeft een iets groter buffervat dan de anderen wat de aankoopprijs de hoogte in duwt ten opzichte van de andere stirling-WKK's.

### **Stirling 5**

Deze stirling is het kleinere broertje van een 5 kW WKK die draait op een interne verbrandingsmotor. Het zit echter nog in de testfase in het land van fabricage en zal op korte termijn nog niet uitgevoerd worden. Het buffervat is meer dan 500 liter groot en zal dus in staat zijn om de stirling gedurende langere tijd te laten draaien.

### **Stirling 6**

Dit is eigenlijk een pelletketel waar de stirlingmotor van de vorige modellen is aan toegevoegd. Het toestel heeft een thermisch vermogen dat bijna het drievoud is van de vorige modellen waardoor zijn PHR sterk daalt. In dit eindwerk wordt verondersteld dat alle toestellen op vollast draaien waardoor dit toestel theoretisch maar een beperkt aantal draaiuren zal bekomen. Het grote buffervat van 600 liter is hier dan zeker ook nodig gezien het grote thermische vermogen.

### **PEMFC 1,2,3,4 en 5**

Deze brandstofcellen maakten deel uit van een project dat gesubsidieerd werd door de Zuid-Koreaanse overheid. De eerste prijzen die vrijgegeven werden voor de toestellen zijn dan ook zeer hoog. De overheid stond echter garant voor een subsidie tot 80% van de aankoopprijs. De producten worden nog niet geëxporteerd en zullen dat waarschijnlijk op korte termijn ook niet worden. Er zijn nog maar een beperkt aantal van de toestellen geproduceerd waardoor de prijs nog niet gedrukt kon worden.

### **PEMFC 6**

Prototype brandstofcel van een fabrikant die voorheen enkel een stirling-WKK uitbracht. Voor de technologie werd samengewerkt een grote Japanse fabrikant die reeds duizenden systemen verkocht. De verkoopprijs wordt op fora geschat op ongeveer 20 000 euro wat in lijn zou liggen met de andere Europese brandstofcellen van dezelfde soort. In deze prijs zit ook het buffervat van 170 liter inbegrepen. Gezien het beperkte thermische vermogen volstaat dit volume om frequente start en stops te voorkomen.

### **PEMFC 7**

Dit is één van de eerste proton exchange membrane brandstofcellen (PEMFC) die op grote schaal geproduceerd werd. In het land van oorsprong zijn er duizenden geïnstalleerd geweest door een sterke subsidiering vanuit de overheid. De subsidiering stopt echter binnen de eerstkomende jaren waardoor de prijs terugvalt naar ongeveer dezelfde van de Europese toestellen. De fabrikant heeft een samenwerkingsakkoord met een Europese fabrikant om de brandstoftechnologie te implementeren in een Europees toestel.

### **PEMFC 8**

In hetzelfde grootschalige project als waar ook PEMFC 7 deel van uitmaakte, heeft deze fabrikant een andere versie van de PEMFC-WKK ontworpen. Ook dit toestel is vele duizenden keren verkocht geweest waardoor het zijn betrouwbaarheid bewezen heeft. Zowel PEMFC 7 als 8 hebben een bijhorend buffervat van minstens 150 liter wat een langdurige werking van de brandstofcel met beperkt thermisch vermogen verzekert.

### **PEMFC 9**

Deze brandstofcel met thermisch vermogen van 0,6 kW en elektrisch vermogen van 0,3 kW beweert in zijn infobrochure tot 8000 draaiuren per jaar halen. In de simulatie raakt hij weliswaar maar tot 6500 draaiuren. De systeemdelen kunnen afzonderlijk gekocht worden. Voor een totaalpakket met buffervat inbegrepen is de richtprijs 18000 terwijl voor enkel de brandstofcel een prijs geldt van 9500 euro.

### **PEMFC 10**

PEMFC 10 is een prototype brandstofcel van dezelfde fabrikant die ook de Stirling 1 maakt. Voor een PEM-brandstofcel heeft hij een groot thermisch vermogen van 1,87 kW. Zijn buffervat is met zijn 300 liter dan ook ongeveer dubbel zo groot als deze van PEMFC 6 en 7. De goede verhouding tussen elektrisch en thermisch vermogen zal ervoor zorgen dat zijn cash flow bij de grootste is van alle brandstofcellen. De aankoopprijs, die nog niet vastligt, zal in combinatie met deze cash flow er hopelijk voor zorgen dat dit de eerste brandstofcel kan zijn die doorbreekt op grote schaal in Europa.

### **SOFC 1**

Dit toestel was net als PEMFC 7 en 8 deel van het door de overheid gesubsidieerde project in Japan. Hierdoor zijn reeds duizenden van dit model verkocht geweest. Zijn prijs (zonder subsidies) ligt echter nog altijd in dezelfde lijn van de andere SOFC-toestellen. Door zijn beperkte thermische vermogen van 0,6 kW zal het model een groot aantal draaiuren bekomen maar kan het maar een klein deel van de thermische vraag afdekken. Het elektrische vermogen van 0,7 kW zorgt er dan weer voor dat wel veel elektriciteit opgewekt wordt.

### **SOFC 2**

Dit is de brandstofcel met het grootste elektrische vermogen (1,5 kW) en tegelijkertijd een van de kleinste thermische vermogens (0,6 kW). Deze verhouding zorgt ervoor dat in veel gevallen te veel stroom geproduceerd wordt die zonder vergoeding terug op het net moet gezet worden. In het scenario waar de leverancier de overtollig geproduceerde stroom zou opkopen aan een lage prijs wordt het toestel echter wel weer interessant.

### **SOFC 3**

De Zwitserse fabrikant heeft gedurende 8 jaar testen gedaan op het model alvorens het nu op de markt te brengen. Met zijn elektrisch vermogen van 1 kW en thermisch vermogen van 1,8 kW heeft het toestel net als de PEMFC 10 de kans om een grote cash flow te creëren. De aankoopprijs van 19000 euro zorgt er dan jammer genoeg weer voor dat het model pas op lange termijn terug te verdienen is.

### **SOFC 4**

Dit product van een Taiwanese fabrikant zit nog in de eerste fasen van productontwikkeling en moet nog getest worden. Niet alle technische specificaties liggen al vast maar de richtprijs van 8000 euro lijkt op het eerste zit een verademing binnen de prijzen van brandstofcellen. Of het echter ook effectief voor deze prijs te koop zal zijn binnen enkele jaren valt nog sterk te betwijfelen. In theorie kan het toestel een grote cash flow creëren en in combinatie met de voorlopig lage aankoopprijs is dit één van de meest interessante toestellen die onderzocht worden.

### **SOFC 5**

Deze brandstofcel met een zeer hoog elektrisch vermogen van 2 kW zorgt ervoor dat in combinatie met het thermisch vermogen van 2 kW er op jaarbasis meer dan 10 000 kWh elektriciteit wordt opgewekt. Dit is tot bijna het driedubbele van een normaal jaarverbruik van een standaardgezin waardoor heel veel elektriciteit terug op het net moet worden gezet zonder vergoeding. De WKK heeft nog altijd de hulp nodig van een back-upbrander en verbruikt zelf meer aardgas dan voorheen waardoor de cash flow zelfs negatief wordt. Net zoals bij SOFC 2 kan dit toestel pas interessant worden wanneer een leverancier of andere afnemer een prijs zou betalen voor de teveel geproduceerde stroom.

### **SOFC 6 en 7**

Deze 2 fabrikanten zijn lid van een overkoepelende groep die samenwerkte met een Aziatisch ontwikkelaar van brandstofcellen om deze modellen op de Europese markt te brengen. Beide toestellen hebben dus dezelfde technische specificaties en buffervat maar voorlopig is enkel nog maar de SOFC 6 te koop.

### **ORC 1**

ORC 1 is al enkele jaren op de markt in Duitsland en baseert zich net zoals ORC 1 op de stoom rankine cyclus. Het elektrisch vermogen is regelbaar tussen de 0,3 en 1,5 kW alsook het thermisch vermogen tussen de 4 en 16 kW. In de simulaties wordt echter verondersteld dat de WKK telkens op volle vermogen werkt waardoor de bekomen cash flow de minimum waarde is die bereikt kan worden.

## **ORC 2**

Deze nieuwe micro-WKK wekt elektriciteit op door een organische vloeistof te laten verdampen die dan een spiraal laat draaien. De spiraal is verbonden met een generator die maximaal 1 kW kan opwekken. Dit toestel wordt gefabriceerd door een gasleverancier die klanten overtuigd om zich aan te sluiten bij hen na aankoop van het toestel. Op die manier kan de prijs gedrukt worden en wordt het toestel zeer aantrekkelijk. Het thermische vermogen van 7,2 kW volstaat zeker om voor een groot deel van de warmtevraag te kunnen instaan.

## **ORC 3**

Dit prototype van Belgische makelij zit momenteel nog in een testfase maar zou binnenkort op de markt moeten komen. Zijn werking is gebaseerd op een stoom rankine cyclus. Het heeft een groot thermisch vermogen van 16 kW dat alle pieken in de warmtevraag moet aankunnen.

## 2.2. Technische parameters

### 2.2.1. Prijs

#### 2.2.1.1. Aankoopprijs

In Europa worden er per jaar maar een paar duizenden micro-WKK's verkocht terwijl er volgens Delta EE jaarlijks tot 8 miljoen boilers verkocht worden en in 2012 alleen al 3 miljoen condensatieketels werden geïnstalleerd. De hoofdreden hiervoor ligt bij de hoge meerkost van micro-WKK's ten opzichte van condensatieketels. Als de verkoopschijfers echter zo laag blijven kan er geen kostreductie op gang komen ten gevolge van massaproductie.

In de studie *'How much are householders really willing to pay for microCHP in Europe?'* deed Delta EE onderzoek naar de prijselasticiteit van micro-WKK's in Nederland, Groot-Brittannië en Duitsland. Ze namen een enquête af bij 600 gezinnen verspreid over de drie landen en polsten hierbij naar hun bereidwilligheid om een micro-WKK te installeren en de meerkost die men hiervoor wou betalen.

Men kwam tot de conclusie dat de prijs niet elastisch is als ze hoog is maar wel elastisch is als ze laag is. Als de aankoopprijs dus rond 16 000 euro blijft zal een verlaging van de prijs met 1000 euro niet veel effect hebben op het verkoopschijfer. Kan de prijs echter zakken tot bijvoorbeeld 10000 euro dan kan een prijsverlaging wel tot verkoopsverhoging leiden. Het punt waarop de prijs wel elastisch wordt, is technologieafhankelijk en landafhankelijk. In alle landen was men bereid meer te betalen voor brandstofceltechnologie dan voor een WKK die draait op een stirlingmotor. Duitsers wilden tot 4000 euro meer betalen voor een brandstofcel-WKK dan voor een stirling-WKK. Nederlanders en Britten wilden ook meer betalen voor een brandstofcel-WKK maar in mindere mate dan de Duitsers.

Na een korte uitleg over het voordeel van micro-WKK, kwam uit de enquête naar voor dat 60 tot 70% van de gezinnen een micro-WKK zou aanschaffen wanneer deze maar tot 2000 euro meer zou kosten dan een condensatieketel.

In het scenario waar een micro-WKK precies dezelfde prijs zou hebben als een klassieke condensatieketel, zou nog altijd maar tussen de 50 en 85 % van de gezinnen de aankoop van een micro-WKK overwegen. De reden hiervoor ligt in het beperkte gamma dat ter beschikking is in de landen. Als er slechts keuze is uit 3 producten in elk land heeft men het gevoel dat de WKK niet aansluit bij het verbruikersprofiel van het gezin. Duitsland heeft veruit het breedste gamma en verkoopt dan ook tot 10 keer meer micro-WKK's dan Nederland en Groot-Brittannië.

Tabel 5: Aankooprijks micro-WKK's

Product	Aankooprijks [€]	Land van herkomst
ICE 1	7000	Japan
ICE 2	12000	Duitsland
Stirling 1	10000	UK
Stirling 2	10000	Nederland
Stirling 3	8400	Nederland/Zuid-Korea
Stirling 4	14250	Duitsland
Stirling 5	testfase	Duitsland
Stirling 6	22000	Oostenrijk
PEMFC 1	77000 (in 2010)	Zuid-Korea
PEMFC 2	77000 (in 2010)	Zuid-Korea
PEMFC 3	/	Zuid-Korea
PEMFC 4	/	Zuid-Korea
PEMFC 5	77000 (in 2010)	Zuid-Korea
PEMFC 6	19 500	Duitsland
PEMFC 7	15000	Japan
PEMFC 8	14500	Japan
PEMFC 9	18000	Duitsland
PEMFC 10	/	UK/Duitsland
SOFC 1	17000	Japan
SOFC 2	30000	Australië
SOFC 3	19000	Zwitserland
SOFC 4	8000 euro in 2018	Taiwan
SOFC 5	/	Italië
SOFC 6	20000	Duitsland
SOFC 7	nog niet op de markt	Duitsland
ORC 1	18000	Duitsland
ORC 2	6500	UK
ORC 3	nog niet op de markt	België

Tabel 6 : Score aankooprijks

Product	Score [-]
ICE 1	4
ICE 2	3
Stirling 1	3
Stirling 2	3
Stirling 3	4
Stirling 4	3
Stirling 5	/
Stirling 6	1
PEMFC 1	0
PEMFC 2	0
PEMFC 3	/
PEMFC 4	/
PEMFC 5	0
PEMFC 6	2
PEMFC 7	3
PEMFC 8	3
PEMFC 9	2
PEMFC 10	/
SOFC 1	2
SOFC 2	1
SOFC 3	2
SOFC 4	4
SOFC 5	/
SOFC 6	2
SOFC 7	/
ORC 1	2
ORC 2	4
ORC 3	/

In het ideale geval kost een micro-WKK evenveel als een condensatieketel of minder. Dit is echter vandaag de dag nog niet het geval. Enkel de ORC 2 en de ICE 1 komen in de buurt met een prijs tussen de 6000 en 7000 euro. Toestellen die net iets duurder zijn dan een condensatieketel krijgen de maximum score. Installaties die tot een prijs gaan van 11000 euro (meerprijs van 5000 euro t.o.v. een condensatieketel) krijgen een score van 3. Prijzen tussen de 11000 euro en 20000 euro krijgen een score van 2. Boven de 20 000 euro is het al heel moeilijk om een installatie te verkopen als men het toestel wil terugverdiend zien tijdens zijn levensduur en daarom krijgen die toestellen een score van 1. Hogere prijzen dan 30000 euro zijn onverkoopbaar en dus enkel hanteerbaar in proefprojecten of gevallen waar overheden hele grote subsidies geven. Deze gevallen krijgen de nulscore. Het dient opgemerkt te worden dat niet elk toestel een volledig systeem verkoopt voor de bovenvermelde prijzen. In het criterium 'Kant en klaarheid' wordt vermeld welke systeemdelen in de aankooprijks begrepen zitten.



### 2.2.1.2. Importtaks

Tabel 7: Importtaks micro-WKK's

Product	Importtaks [%]
ICE 1	2,7
ICE 2	0
Stirling 1	0
Stirling 2	0
Stirling 3	2,7
Stirling 4	0
Stirling 5	0
Stirling 6	0
PEMFC 1	2,7
PEMFC 2	2,7
PEMFC 3	2,7
PEMFC 4	2,7
PEMFC 5	2,7
PEMFC 6	0
PEMFC 7	2,7
PEMFC 8	2,7
PEMFC 9	0
PEMFC 10	0
SOFC 1	2,7
SOFC 2	2,7
SOFC 3	0
SOFC 4	2,7
SOFC 5	0
SOFC 6	0
SOFC 7	0
ORC 1	0
ORC 2	0
ORC 3	0

Tabel 8 : Score importtaks

Product	Score [-]
ICE 1	1
ICE 2	4
Stirling 1	4
Stirling 2	4
Stirling 3	1
Stirling 4	4
Stirling 5	4
Stirling 6	4
PEMFC 1	1
PEMFC 2	1
PEMFC 3	1
PEMFC 4	1
PEMFC 5	1
PEMFC 6	4
PEMFC 7	1
PEMFC 8	1
PEMFC 9	4
PEMFC 10	4
SOFC 1	1
SOFC 2	1
SOFC 3	4
SOFC 4	1
SOFC 5	4
SOFC 6	4
SOFC 7	4
ORC 1	4
ORC 2	4
ORC 3	4

Alle toestellen die buiten Europa worden gefabriceerd moeten geïmporteerd worden. In dit geval zijn er dus maar 2 mogelijkheden ofwel wordt er 2,7% importtaks betaald ofwel niet. Gezien de kleine wegingsfactor die de taks krijgt in de kesselring-methode worden de twee extremen toegekend als score. Indien er geen taks moet betaald worden krijgt het toestel de maximumscore van 4, indien er wel taks betaald moet worden krijgt het toestel de minimumscore van 1.

## 2.2.2. Commercialiseerbaarheid

### 2.2.2.1. Servicemogelijkheden

Tabel 9: Servicemogelijkheden micro-WKK's servicemogelijkheden

Product	Installateur
ICE 1	Wordt in Europa verdeeld als ICE 2
ICE 2	niet in België, wel in buurlanden
Stirling 1	niet in België, wel in buurlanden
Stirling 2	Ja
Stirling 3	Niet meer in België
Stirling 4	Ja
Stirling 5	Groter vermogen al in België, $\mu$ -WKK in buurland
Stirling 6	Vanaf 2016 op de Europese markt
PEMFC 1	niet in België
PEMFC 2	niet in België
PEMFC 3	niet in België
PEMFC 4	niet in België
PEMFC 5	niet in België
PEMFC 6	Vanaf 2016 op de Europese markt
PEMFC 7	Binnenkort in Europa als PEMFC 6
PEMFC 8	Samenwerkingsverband voor Europa
PEMFC 9	niet in België, wel in buurlanden
PEMFC 10	niet in België, wel in buurlanden
SOFC 1	Samenwerkingsverband voor Europa
SOFC 2	Ja
SOFC 3	niet in België, wel in buurlanden
SOFC 4	niet in België
SOFC 5	niet in België, wel in buurlanden
SOFC 6	Vanaf 2017 op de Europese markt
SOFC 7	Vanaf 2017 op de Europese markt
ORC 1	Ja
ORC 2	niet in België, wel in buurlanden
ORC 3	Vanaf 2016 op de Belgische markt

Tabel 10: Score

Product	Score
ICE 1	0
ICE 2	2
Stirling 1	2
Stirling 2	4
Stirling 3	3
Stirling 4	4
Stirling 5	3
Stirling 6	1
PEMFC 1	0
PEMFC 2	0
PEMFC 3	0
PEMFC 4	0
PEMFC 5	0
PEMFC 6	1
PEMFC 7	0
PEMFC 8	0
PEMFC 9	2
PEMFC 10	2
SOFC 1	0
SOFC 2	4
SOFC 3	2
SOFC 4	0
SOFC 5	2
SOFC 6	1
SOFC 7	1
ORC 1	4
ORC 2	2
ORC 3	2

Er zijn momenteel niet veel verschillende modellen van micro-WKK die geïnstalleerd worden in België. Deze modellen krijgen dan ook de maximum score. Stirling 3 is in het verleden geïnstalleerd geweest in België maar dit is gestopt omdat de installateur ophield met de verkoop ervan. Dit model krijgt een score van 3. Stirling 5 wordt op dit moment nog niet geïnstalleerd in België maar een model met een groter vermogen wel al. Op termijn is de stap dus kleiner om ook dit model te importeren waardoor het ook een score van 3 krijgt. Toestellen die momenteel in de buurlanden worden geïnstalleerd en dus op termijn misschien ook in België zullen geïntroduceerd worden krijgen een score van 2. Modellen die in de laatste ontwikkelingsfase zitten en binnenkort op de Europese markt komen krijgen een score van 1. De modellen met de nulscore zijn modellen die enkel buiten Europa geïnstalleerd worden en op korte termijn ook niet naar Europa zullen komen onder de eigen merknaam.

### 2.2.2.2. Gamma

Tabel 11: Gamma micro-WKK's

Product	Gamma
ICE 1	Samenwerkingsverband met ICE 2 waarbij ICE 2 brandstofcellen onderzoekt
ICE 2	
Stirling 1	Gamma met PEMFC 10
Stirling 2	Geen gamma
Stirling 3	Geen gamma
Stirling 4	Gamma samen met PEMFC 6
Stirling 5	5 kW systeem te koop
Stirling 6	Geen gamma
PEMFC 1	Zowel 1 als 5 kW versie
PEMFC 2	SOFC systeem in ontwikkeling
PEMFC 3	5kW brandstofcel en UPS in ontwikkeling
PEMFC 4	5kW brandstofcel en UPS in ontwikkeling
PEMFC 5	Geen gamma
PEMFC 6	Gamma samen met STIRLING 4
PEMFC 7	UPS systeem sinds 2015 mogelijk
PEMFC 8	Geen gamma
PEMFC 9	Geen gamma
PEMFC 10	Gamma met Stirling 1
SOFC 1	Geen gamma
SOFC 2	Geen gamma
SOFC 3	Geen gamma
SOFC 4	Geen gamma
SOFC 5	Geen gamma
SOFC 6	Geen gamma
SOFC 7	Geen gamma
ORC 1	Geen gamma
ORC 2	Geen gamma
ORC 3	Groter systeem in ontwikkeling

Tabel 12 : Score gamma

Product	Score
ICE 1	
ICE 2	4
Stirling 1	3
Stirling 2	0
Stirling 3	0
Stirling 4	3
Stirling 5	2
Stirling 6	2
PEMFC 1	2
PEMFC 2	3
PEMFC 3	
PEMFC 4	3
PEMFC 5	0
PEMFC 6	3
PEMFC 7	1
PEMFC 8	0
PEMFC 9	0
PEMFC 10	3
SOFC 1	0
SOFC 2	0
SOFC 3	0
SOFC 4	0
SOFC 5	0
SOFC 6	0
SOFC 7	0
ORC 1	0
ORC 2	0
ORC 3	2

De modellen die geen enkele soort van gamma hebben krijgen de nulscore. Modellen die zowel een versie hebben waarbij een elektrisch net vereist is om te kunnen werken als een systeem die als UPS kan werken krijgen een score van 1. Wanneer er verschillende vermogens mogelijk zijn binnen dezelfde technologie en merknaam krijgt het model een score van 2. Zijn er verschillende technologieën beschikbaar onder hetzelfde merk dan krijgt het model een score van 3. Wanneer er een UPS versie beschikbaar is in combinatie met verschillende technologieën of vermogensrange krijgt het model de maximumscore.

### 2.2.2.3. Kant en klaarheid

Tabel 13: Kant en klaarheid micro-WKK's

Product	Delen volledige systeem	Grootte buffervat
ICE 1	ICE + Piekbrander+ Buffervat	90
ICE 2	ICE +Piekbrander + Buffervat	300
Stirling 1	Stirlingmotor+Piekbrander	/
Stirling 2	Stirlingmotor+Piekbrander+ Buffervat	150
Stirling 3	Stirlingmotor+Piekbrander	/
Stirling 4	Stirlingmotor+Piekbrander+Buffervat	400
Stirling 5	Stirlingmotor+Piekbrander+Buffervat	530
Stirling 6	Stirlingmotor+Piekbrander+Buffervat	600
PEMFC 1	Brandstofcel + Buffervat	150
PEMFC 2	Brandstofcel + Piekbrander+Buffervat	150
PEMFC 3	Brandstofcel	/
PEMFC 4	Brandstofcel	/
PEMFC 5	Brandstofcel	/
PEMFC 6	Brandstofcel + Piekbrander + Buffervat	170
PEMFC 7	Brandstofcel + Piekbrander + Buffervat	200
PEMFC 8	Brandstofcel + Piekbrander + Buffervat	147
PEMFC 9	Brandstofcel + Piekbrander + Buffervat	500
PEMFC 10	Brandstofcel + Piekbrander + Buffervat	300
SOFC 1	Brandstofcel + Piekbrander + Buffervat	90
SOFC 2	Brandstofcel	/
SOFC 3	Brandstofcel + Piekbrander	/
SOFC 4	Nog niet beslist	Nog niet beslist
SOFC 5	Brandstofcel	/
SOFC 6	Brandstofcel + Piekbrander + Buffervat	150
SOFC 7	Brandstofcel + Piekbrander + Buffervat	150
ORC 1	ORC + Buffervat	600
ORC 2	ORC	/
ORC 3	ORC	/

Tabel 14: Score kant en klaarheid

Product	Score
ICE 1	3
ICE 2	4
Stirling 1	2
Stirling 2	3
Stirling 3	2
Stirling 4	4
Stirling 5	4
Stirling 6	4
PEMFC 1	2
PEMFC 2	4
PEMFC 3	1
PEMFC 4	1
PEMFC 5	1
PEMFC 6	4
PEMFC 7	4
PEMFC 8	4
PEMFC 9	4
PEMFC 10	4
SOFC 1	4
SOFC 2	1
SOFC 3	2
SOFC 4	1
SOFC 5	1
SOFC 6	4
SOFC 7	4
ORC 1	4
ORC 2	1
ORC 3	1

Systemen die bestaan uit de WKK-technologie voor de basislast met daarbij een piekbrander en een opslagvat dat groot genoeg is, krijgen de maximumscore. Systemen die alle delen hebben maar waar het opslagvat te klein is om veel draaiuren te verzekeren krijgen een score van 3. Systemen die maar 2 van de 3 delen installeren zonder bijkomende kost krijgen een score van 2 en modellen waar enkel de WKK geïnstalleerd wordt zonder piekbrander of opslagvat krijgen de laagste score van 1. Uit de simulaties in excel blijkt dat bij bepaalde toestellen het aantal draaiuren nog sterk kan stijgen door het buffervat te vergroten. Bij de vereenvoudigd berekening wordt uitgegaan van een buffervat dat groot genoeg is om bij de dagen met lage warmtevraag ervoor te zorgen dat de piekbrander niet nodig is. Als het aantal draaiuren met de opgegeven buffervaten veel lager is dan het aantal uren uit de vereenvoudigde berekening dan is het opgegeven buffervat te klein voor de huizen waar de simulatie op gebaseerd is. Brandstofcel-wkk's hebben kleinere buffervaten nodig dan de andere technologieën omdat ze gezien hun klein thermisch vermogen maar bij hele lage warmtevraag in staat zullen zijn om ook warmte in het buffervat te steken. Vooral bij de stirling-wkk's zal een correct dimensioneren van het buffervat noodzakelijk zijn.

### 2.2.2.4. Vereiste aansluitingen

Tabel 15: Aansluitingen micro-WKK's

Product	Aansluitingen
ICE 1	Stroom/aardgas/water
ICE 2	Stroom/aardgas/water
Stirling 1	Stroom/aardgas/water/internet
Stirling 2	Stroom/aardgas/water
Stirling 3	Stroom/aardgas/water
Stirling 4	Stroom/aardgas/water
Stirling 5	Stroom/aardgas/water
Stirling 6	Stroom/aardgas/water
PEMFC 1	Stroom/LNG/LPG/water
PEMFC 2	Stroom/aardgas/water
PEMFC 3	Stroom/aardgas/water
PEMFC 4	Stroom/aardgas/water
PEMFC 5	Stroom/aardgas/water
PEMFC 6	Stroom/aardgas/water
PEMFC 7	Stroom/aardgas/water
PEMFC 8	Stroom/aardgas/water
PEMFC 9	Stroom/aardgas/water
PEMFC 10	Stroom/aardgas/water
SOFC 1	Stroom/aardgas/water
SOFC 2	Stroom/aardgas/water
SOFC 3	Stroom/aardgas/water
SOFC 4	Stroom/aardgas/water
SOFC 5	Stroom/aardgas/water
SOFC 6	Stroom/aardgas/water
SOFC 7	Stroom/aardgas/water
ORC 1	Stroom/aardgas/pellets/water
ORC 2	Stroom/aardgas/water
ORC 3	Stroom/Pelletcontainer/Water

Tabel 16: Score aansluitingen

Product	Score
ICE 1	2
ICE 2	2
Stirling 1	2
Stirling 2	2
Stirling 3	2
Stirling 4	2
Stirling 5	2
Stirling 6	2
PEMFC 1	2
PEMFC 2	2
PEMFC 3	2
PEMFC 4	2
PEMFC 5	2
PEMFC 6	2
PEMFC 7	2
PEMFC 8	2
PEMFC 9	2
PEMFC 10	2
SOFC 1	2
SOFC 2	2
SOFC 3	2
SOFC 4	2
SOFC 5	2
SOFC 6	2
SOFC 7	2
ORC 1	2
ORC 2	2
ORC 3	2

Alle modellen hebben bijna dezelfde aansluitingen nodig. Het principe van WKK draait namelijk rond het feit dat aardgas of pellets dienen als primaire energiebron om zowel warmte als elektriciteit te produceren. Elke micro-WKK heeft dus een gasaansluiting of pelletopslag nodig en een verbinding met het elektriciteitsnet om de overtollige elektriciteit op het net te kunnen zetten. Omdat de warmte bijna altijd naar verwarming van sanitair warm water gaat en naar een vloerverwarming of radiatoren is ook een wateraansluiting nodig. Bij 1 van de modellen is ook een internetverbinding nodig om van op afstand de installatie te kunnen bijregelen en te controleren.

### 2.2.2.5. Conformiteit PHR

De vraag naar elektriciteit en warmte zal voor elk gezin verschillend zijn omdat er in een ander huis geleefd wordt, er een andere gezinssamenstelling is en er een ander leefritme heerst. Desalniettemin kan via de totaal geleverde elektriciteit en gas in Vlaanderen uitgerekend worden wat het gemiddelde verbruik is voor een Vlaams gezin.

Deze cijfers zijn te vinden op de site van de VREG en worden in de onderstaande tabellen weergegeven. Er worden algemene cijfers gegeven van de Europese categorieën die voor een bepaalde gezinssamenstelling gelden en daarnaast ook de effectief geleverde hoeveelheden stroom en gas per jaar van alle afnamepunten samen in Vlaanderen. Er is een duidelijk verschil op te merken tussen de Europese categorieën en het effectieve Vlaamse verbruik.

In de onderstaande linkse tabel worden de Europese categorieën weergegeven waarin de gezinssamenstelling overgaat van een alleenstaande in een appartement tot een groot gezin in een vrijstaande woning. Volgens deze cijfers zou een doorsnee Vlaams gezin (2 ouders, 1 kind) 3500 kWh elektrisch verbruik hebben. Uit cijfers van het distributienet blijkt echter dat een Vlaams gezin in werkelijkheid 3895 kWh elektriciteit verbruikt. Dit ligt aan het feit dat elk land andere comforteisen, gewoontes en isolatienormen heeft.

Verbruiker	Jaarverbruik dagmeter in kWh	Jaarverbruik nachtmeter in kWh	Jaarverbruik uitsluitend nachtmeter in kWh	Elektriciteit (distributienet)			
				Jaar	Geleverd volume (MWh) huishoudelijke toegangspunten	Beleverde huishoudelijke toegangspunten	Gemiddeld geleverd volume per toegangspunt
Kleine verbruiker met 1 meter	600	0	0	2009	11.372.169,11	2.651.905	4.288 kWh/jaar
Relatief kleine verbruiker met 1 meter	1.200	0	0	2010	11.569.438,34	2.666.112	4.339 kWh/jaar
Doorsnee gezin met 2 meters	1.600	1.900	0	2011	10.677.365,10	2.678.142	3.967 kWh/jaar
Doorsnee gezin met één meter	3.500	0	0	2012	10.578.422,02	2.690.214	3.932 kWh/jaar
Relatief grote verbruiker met 2 meters	3.600	3.900	0	2013	10.521.437,02	2.701.333	3.895 kWh/jaar
Grote verbruiker met 2 meters + accumulatieverwarming en/of elektrische boiler	3.600	3.900	12.500				
Grote verbruiker, met 1 meter + accumulatieverwarming en/of elektrische boiler	7.500	0	12.500				

Figuur 40 : Opgemeten Vlaams elektriciteitsverbruik

Figuur 41 : Europese richtcijfers elektriciteitsverbruik

Het aardgasverbruik van een gemiddeld Vlaams gezin zou volgens de Europese categorieën 2326 kWh bedragen als het gezin enkel aardgas gebruikt voor warm water en om te koken. Wordt er bijkomend ook verwarmd op aardgas dan stijgt het verbruik theoretisch naar 23260 kWh.

Uit de cijfers van de distributienetbeheerders blijkt echter dat een gezin in Vlaanderen gemiddeld een aardgasverbruik van 17783 kWh heeft. Het is dus duidelijk dat in België het merendeel van de huizen verwarmd wordt op aardgas.

Verbruiker	Jaarverbruik aardgasmeter (in kWh)	Gebruik
Kleine verbruiker	2.326	koken en warm water
Relatief kleine verbruiker	4.652	
Doorsnee gezin	23.260	verwarming en ander gebruik
Grote verbruiker	34.890	

Figuur 43 : Europese richtcijfers aardgasverbruik

Jaar	Aardgas (distributienet)		
	Geleverd volume (GWh) huishoudelijke toegangspunten	Beleverde huishoudelijke toegangspunten	Gemiddeld geleverd volume per toegangspunt
2009	27.834,86	1.567.752	17.755 kWh/jaar
2010	32.809,48	1.606.079	20.428 kWh/jaar
2011	25.003,76	1.646.566	15.185 kWh/jaar
2012	28.214,50	1.682.437	16.770 kWh/jaar
2013	30.575,03	1.719.353	17.783 kWh/jaar

Figuur 42 : Opgemeten Vlaams aardgasverbruik

Uit deze cijfers kan dan ook een gemiddelde power-to-heat-ratio berekend worden.

$$PHR_{gem.vlaams} = \frac{3895 \text{ kWh}}{17783 \text{ kWh}} = 0,219$$

Wanneer dit cijfer vergeleken wordt met de PHR van elk toestel dan blijkt dat (voorlopig) voor een gemiddeld Vlaams gezin de PHR van de stirling-technologie hier het nauwst bij aansluit.

Technologieën waarbij veel meer warmte geproduceerd wordt dan elektriciteit passen momenteel het beste voor een gemiddeld Vlaams gezin. Dit is rechtstreeks te linken aan het woningpark in Vlaanderen. In het *actieplan voor energierenovatieprogramma 2020* staan cijfers over het Vlaamse woningbestand. Zeker inzake isolatie kan er in het huidige woningbestand vooruitgang geboekt worden.

	2011
Woningen met uitsluitend of gedeeltelijk enkel glas	15%
Woningen zonder dak- of zoldervloerisolatie	24%
Woningen zonder vloerisolatie	72%
Woningen zonder buitenmuurisolatie	59%

Figuur 44 : isolatie in de Vlaamse huizen

	Aardgas	Stookolie
Gewone verwarmingsketel	28 %	66 %
Lagetemperatuur- of hoogrendementsketel	39 %	21 %
Condensatieketel	30 %	10 %
Weet niet	2 %	3 %

Figuur 45 : verwarmingsinstallaties in Vlaamse huizen

Uit de studie *Woning en woonomgeving in België* blijkt dat in 2001 slechts 22% van de woningen gebouwd was na 1981. België heeft dus een oud woningpark dat klaar is voor renovatie. Het zal dus nog een tijd duren voordat brandstofcellen, met een PHR die eerder naar 1 gaat, ook volledig zelf zullen kunnen instaan voor de warmteproductie in een Vlaams huis.

Tabel 17: PHR micro-WKK's

Product	PHR [-]
ICE 1	0,40
ICE 2	0,40
Stirling 1	0,17
Stirling 2	0,20
Stirling 3	0,19
Stirling 4	0,18
Stirling 5	0,17
Stirling 6	0,08
PEMFC 1	0,77
PEMFC 2	1,00
PEMFC 3	0,77
PEMFC 4	1,16
PEMFC 5	0,71
PEMFC 6	0,75
PEMFC 7	0,69
PEMFC 8	0,70
PEMFC 9	0,50
PEMFC 10	0,53
SOFC 1	1,13
SOFC 2	2,50
SOFC 3	0,56
SOFC 4	1,33
SOFC 5	1,00
SOFC 6	1,00
SOFC 7	1,00
ORC 1	0,09
ORC 2	0,14
ORC 3	0,09

Tabel 18: Score PHR

Product	Score [-]
ICE 1	3
ICE 2	3
Stirling 1	4
Stirling 2	4
Stirling 3	4
Stirling 4	4
Stirling 5	4
Stirling 6	3
PEMFC 1	2
PEMFC 2	1
PEMFC 3	2
PEMFC 4	1
PEMFC 5	2
PEMFC 6	2
PEMFC 7	2
PEMFC 8	2
PEMFC 9	2
PEMFC 10	2
SOFC 1	1
SOFC 2	1
SOFC 3	2
SOFC 4	1
SOFC 5	1
SOFC 6	1
SOFC 7	1
ORC 1	3
ORC 2	3
ORC 3	3

De meeste stirlingmotoren krijgen de maximumscore van 4 omdat hun PHR het dichtst ligt bij 0,2109, gevolgd door de rankine-cyclus motoren en de interne verbrandingsmotoren die een score van 3 krijgen. De brandstofcellen zijn het minst aangewezen voor een gemiddelde Vlaamse woning omdat ze te weinig warmte produceren in verhouding tot elektriciteit waardoor de back-up brander zeer vaak zal moeten bijspringen. Als de PHR boven de 1 ligt, krijgt het toestel ook een score van 1. PHR's die variëren tussen 0.5 tot 1 krijgen een score van 2.

Het dient opgemerkt te worden dat toestellen die momenteel slecht scoren op vlak van PHR in de toekomst interessanter kunnen worden. Gezien de trend dat nieuwbouwwoningen en zelfs grondige renovaties naar de passiefhuishoudnorm moeten, kunnen toestellen met beperkt thermisch vermogen en grote PHR wel beter passen in deze nieuwe passiefwoningen.



## 2.2.3. Betrouwbaarheid

### 2.2.3.1. Levensduur

Tabel 19: Levensduur micro-WKK's

Product	Levensduur [-]
ICE 1	30000 uur
ICE 2	30000 uur
Stirling 1	2 jaar garantie
Stirling 2	40000 uur
Stirling 3	/
Stirling 4	50000 uur
Stirling 5	Testfase
Stirling 6	/
PEMFC 1	/
PEMFC 2	10 jaar
PEMFC 3	40000 uur
PEMFC 4	40000 uur
PEMFC 5	/
PEMFC 6	/
PEMFC 7	60000 uur met 10 jaar gratis service
PEMFC 8	80000 uur
PEMFC 9	80000 uur
PEMFC 10	/
SOFC 1	60000 uur
SOFC 2	10 jaar gegarandeerd
SOFC 3	15-20 jaar (met vervanging fuel cell)
SOFC 4	40000 uur
SOFC 5	Ontwikkelingsfase
SOFC 6	/
SOFC 7	/
ORC 1	/
ORC 2	2 jaar garantie
ORC 3	Testfase

Tabel 20: Score levensduur

Product	Score [-]
ICE 1	2
ICE 2	2
Stirling 1	2
Stirling 2	3
Stirling 3	/
Stirling 4	3
Stirling 5	/
Stirling 6	/
PEMFC 1	/
PEMFC 2	3
PEMFC 3	3
PEMFC 4	3
PEMFC 5	/
PEMFC 6	/
PEMFC 7	4
PEMFC 8	4
PEMFC 9	4
PEMFC 10	/
SOFC 1	4
SOFC 2	3
SOFC 3	4
SOFC 4	3
SOFC 5	/
SOFC 6	/
SOFC 7	/
ORC 1	/
ORC 2	2
ORC 3	/

De levensduur van een condensatieketel is voor een goede ketel minstens 10 jaar en meestal nog langer. WKK's die een levensduur zouden hebben van meer dan 15 jaar (meer dan 60 000 draaiuren) krijgen de maximumscore. WKK's met een levensduur groter dan 10 jaar (40 000 draaiuren) krijgen een score van 3. Types met een levensduur die ligt tussen de 10 jaar en de minimumgarantie die geldt op de toestellen van 2 jaar, krijgen een score van 2. Niet alle fabrikanten geven in de productfiches een levensduur op. Aangezien dit voor elk toestel anders is, wordt er geen inschatting gemaakt van de levensduur.

### 2.2.3.2. Geproduceerde eenheden

De reden waarom veel particulieren weigerachtig staan ten opzichte van de installatie van een micro-WKK is de hoge aankoop prijs en de relatief jonge technologie. Mensen willen een beproefd product dat zijn deugdelijkheid heeft bewezen en wijdverspreid te koop is. Een technologie dus die ontwikkeld en reeds veel geïnstalleerd is.

De grootste markt voor micro-WKK bevindt zich in Japan dat na de ramp in Fukushima op zoek ging naar een nieuwe manier van (decentrale) energieopwekking. De Japanse overheid stimuleerde sterk de ontwikkeling van de markt voor residentiële WKK's, zelfs al voor de nucleaire ramp in Fukushima. Ze zette samen met de privé-industrie (hoog technologische bedrijven en gas leveranciers) een grootschalig project op voor onderzoek naar een bruikbaar prototype van micro-WKK. Onder de noemer ENE-FARM brachten Panasonic, Toshiba en Aisin een micro-WKK op de markt die sterk aansloeg bij het grote publiek. (Carter, 2012)

Als men echter de cijfers van de fabrikanten zelf mag geloven dan zijn de ENE-FARM producten niet de best verkopende micro-WKK's in Japan. Honda bracht namelijk al in 2002 een eerste prototype op de markt onder de naam ECO-WILL dat, volgens Honda, al meer dan 100 000 keer verkocht is geweest. De systemen zijn zo populair dat vele van de Japanse ontwikkelaars ondertussen al samenwerkingsverbanden hebben met Europese fabrikanten van verwarmingsketels om zo de technologie tot in Europa te krijgen.

Vanuit Europa is een poging ondernomen om de Japanse strategie te volgen door een project op te zetten onder de naam ENE.FIELD. Het doel is om in 12 verschillende lidstaten gezamenlijk tot 1000 micro-WKK's te installeren en ze op te volgen. Zo wordt gehoopt de commercialisatie te kunnen versnellen. Er zijn installaties geplaatst geweest uit het gamma van 9 gevestigde Europese micro-WKK fabrikanten. De installaties worden gemonitord in de 12 lidstaten zodat er waardevolle inzichten gemaakt kunnen worden in de huishoudelijke energievraag doorheen Europa. De gecreëerde afzetmarkt zou daarna een kostreductie moeten teweeg brengen die de commercialisatie nog verder moet bevorderen. Het ENE.FIELD project komt echter in België niet van de grond omdat de meerprijs van de installaties nog altijd te groot is om bereidwillige gezinnen te vinden.

Tabel 21: Geproduceerde eenheden micro-WKK's

Tabel 22: Score geproduceerde eenheden

Product	Geproduceerde eenheden [-]	Product	Score [-]
ICE 1	131000	ICE 1	4
ICE 2	/	ICE 2	1
Stirling 1	/	Stirling 1	1
Stirling 2	1000	Stirling 2	3
Stirling 3	30-40 (in Nederland)	Stirling 3	1
Stirling 4	1000	Stirling 4	3
Stirling 5	/	Stirling 5	0
Stirling 6	/	Stirling 6	0
PEMFC 1	>200	PEMFC 1	2
PEMFC 2	/	PEMFC 2	0
PEMFC 3	<100	PEMFC 3	1
PEMFC 4	<100	PEMFC 4	1
PEMFC 5	1000	PEMFC 5	3
PEMFC 6	test-fase	PEMFC 6	0
PEMFC 7	>35000	PEMFC 7	4
PEMFC 8	>20000	PEMFC 8	4
PEMFC 9	135	PEMFC 9	2
PEMFC 10	/	PEMFC 10	0
SOFC 1	6000	SOFC 1	4
SOFC 2	>500	SOFC 2	2
SOFC 3	300	SOFC 3	2
SOFC 4	doel : 10 000 in 2018	SOFC 4	0
SOFC 5	/	SOFC 5	1
SOFC 6	15 jaar	SOFC 6	4
SOFC 7	15 jaar	SOFC 7	4
ORC 1	/	ORC 1	1
ORC 2	verkoop vanaf 2015	ORC 2	0
ORC 3	/	ORC 3	0

Modellen die al duizenden keren verkocht zijn geweest in het buitenland krijgen de maximumscore. Vervolgens zijn er toestellen die rond de 1000 keer geïnstalleerd zijn geweest in Europa. Deze krijgen een score van 3. Degene waarvan het verkoopsaantal in de honderden ligt, ontvangen een score van 2. Van verschillende modellen die wel al verkocht worden, kon geen verkoopsaantal bekomen worden. Dit leek voor de fabrikanten niet vermeldenswaardig in de productfiches en zal wellicht klein zijn. Deze toestellen krijgen de eenheid als score en toestellen die nog in de ontwikkelingsfase zitten krijgen de nulscore.

### 2.2.3.3. Onderhoudsinterval

Tabel 23: Onderhoudsinterval micro-WKK's      Tabel 24: Score onderhoudsinterval

Product	Onderhoudsinterval [-]	Product	Score [-]
ICE 1	6000 uur	ICE 1	2
ICE 2	6000 uur	ICE 2	2
Stirling 1	jaarlijks	Stirling 1	2
Stirling 2	jaarlijks	Stirling 2	2
Stirling 3	jaarlijks	Stirling 3	2
Stirling 4	jaarlijks	Stirling 4	2
Stirling 5	jaarlijks	Stirling 5	2
Stirling 6	jaarlijks	Stirling 6	2
PEMFC 1	jaarlijks	PEMFC 1	2
PEMFC 2	jaarlijks	PEMFC 2	2
PEMFC 3	jaarlijks	PEMFC 3	2
PEMFC 4	jaarlijks	PEMFC 4	2
PEMFC 5	jaarlijks	PEMFC 5	2
PEMFC 6	2 jaarlijks, back-up jaarlijks	PEMFC 6	2
PEMFC 7	jaarlijks	PEMFC 7	2
PEMFC 8	3,5 jaar, back up jaarlijks	PEMFC 8	2
PEMFC 9	4 jaar, filters jaarlijks	PEMFC 9	2
PEMFC 10	jaarlijks	PEMFC 10	2
SOFC 1	3,5 jaar	SOFC 1	2
SOFC 2	jaarlijks	SOFC 2	2
SOFC 3	jaarlijks	SOFC 3	2
SOFC 4	jaarlijks	SOFC 4	2
SOFC 5	jaarlijks	SOFC 5	2
SOFC 6	jaarlijks	SOFC 6	2
SOFC 7	jaarlijks	SOFC 7	2
ORC 1	jaarlijks	ORC 1	2
ORC 2	jaarlijks	ORC 2	2
ORC 3	jaarlijks	ORC 3	2

Stirling motoren zijn afgesloten motoren en kunnen niet onderhouden worden. Hun onderhoudsinterval is dus hetzelfde als voor een klassieke condensatieketel. (Beith, 2011) Voor de Stirling 2 raadt men een jaarlijks onderhoud aan en de fabrikant biedt hiervoor een aantrekkelijk onderhoudscontract. Ook Stirling 1 vermeldt in zijn productfiche dat een jaarlijks onderhoud aangeraden is. Omdat bijna alle stirling-WKK's op dezelfde stirlingmotor draaien wordt de onderhoudstermijn voor alle stirling-WKK's hetzelfde verondersteld.

Uit contact met de Europese fabrikanten van de SOFC-WKK's is gebleken dat jaarlijks alle filters (water en lucht) moeten gecontroleerd en eventueel vervangen worden. Enkel de SOFC 1, de meest geïnstalleerde wereldwijd, moet volgens de fabrikant maar 1 keer om de 3,5 jaar onderhouden worden. Deze fabrikant biedt dan ook een 10-jarig contract aan voor het onderhoud. Voor de SOFC-WKK's waarvoor geen onderhoudstermijn gevonden werd, wordt een termijn van 1 jaar genomen.

Bij de PEMFC- wordt het aardgas grondiger gefilterd van CO en is de vervanging van de lucht en waterfilters minder frequent. Bij de meeste toestellen is een onderhoud om de 2 jaar voldoende. De bijhorende back-up brander wordt best jaarlijks gecontroleerd.

De ORC's kunnen een groter thermische vermogen leveren en hebben dus meestal geen back up brander nodig. ORC 1 en ORC 3 werken beiden op pellets en deze moeten periodiek gelegegd worden (om de 3 maanden). Bijkomend is een jaarlijks onderhoud voorzien.

Algemeen kan gesteld worden dat het onderhoud van de micro-WKK's jaarlijks moet gebeuren. Volgens de Belgische wet moet een condensatieketel minimum 1 keer om de twee jaar gecontroleerd worden. Toestellen die werken op pellets, steenkool of hout moeten jaarlijks gecontroleerd worden.

Enkel de SOFC1 vermeld expliciet een onderhoudstermijn van 3,5 jaar maar spreekt dan ook niet over de back-up brander. Elk toestel wordt dan ook verondersteld jaarlijks gecontroleerd te moeten worden en krijgt dus een score van 2.

## 2.2.4. Comfort

### 2.2.4.1. Ingenomen volume

Om een beoordeling te kunnen geven aan de verschillende modellen wordt hun grootte vergeleken met dat van een 'gemiddelde' condensatieketel zoals die in België kunnen aangekocht worden. Er wordt vergeleken met condensatieketels omdat deze de grootste kanshebber zijn om geïnstalleerd te worden wanneer een gezin er aan denkt om de boiler te vervangen. Hiervoor werden willekeurige modellen gekozen van 2 grote fabrikanten die te koop zijn in België.

Vitoladens 300C is een oliecondensatieketel met een intern buffervat van 55 liter. Dit zal voor een normaal gezin nog aangevuld moeten worden met een extern buffervat dus de volledige installatie zal een groter volume innemen. De vitoladens heeft een thermisch vermogen dat moduleerbaar is van 10,3 tot 28,9 kW.

De ecoTEC plus VC en ecoTEC exclusiv VC zijn soloketels, wat wil zeggen dat het alleen verwarmingsketels zijn. Voor de productie van warm water kunnen deze ketels gecombineerd worden met een sanitaire warmwaterboiler van het type VIH. Vaillant beschikt over een gamma aan vermogens vanaf 12 kW tot 65 kW.

De ecoCOMPACT is een condensatieketel bovenop een warmwaterboiler en dit samen in één vloermodel. Zijn technologie is gebaseerd op die van de wandcondensatieketels waarvoor Vaillant bekend staat.

De oliecondensatieketels Vitoladens 300-W voor wandmontage en Vitoladens 333-F als staande ketel zijn technisch identiek. Beide zijn verkrijgbaar in twee vermogensniveaus tot 23,5 kW. De Vitoladens 333-F biedt bovendien een geïntegreerde geëmailleerde warmwaterboiler met een inhoud van 130 liter voor een hoog warmwatercomfort.

De Ecovit exclusiv is beschikbaar in 5 verschillende types vanaf het vermogen van 22 kW tot 65 kW. Hij kan dus zowel een normale ééngezinswoning als een industrieel gebouw aan. De warmwaterketel ecoVIT exclusiv kan met de warmwaterboilers van het type uniSTOR gecombineerd worden. Dit zijn boilers met een ingebouwde verwarmingsspiraal, beschikbaar in verschillende types tussen 120 en 500 liter.

Bij het vergelijken van de ingenomen volumes van de micro-WKK's tegenover deze van de condensatieketels moet in rekening gebracht worden dat niet alle condensatieketels en niet alle micro-WKK's over een intern buffervat beschikken. Er mag dus niet louter beoordeeld worden op de gemiddelde ingenomen volumes.

Tabel 25: Gemiddelde volume condensatieketels

Productnaam	Hoogte [m]	Breedte [m]	Diepte [m]	Volume [m <sup>3</sup> ]
Oliecondensatieketel Vitoladens 300C met buffervat VITOCCELL 100-H	1,062	0,638	1,076	0,729 1,109
Gascondensatieketel EcoTEC plus VC126 met buffervat Unistor VIH R120 liter	0,72	0,44	0,338	0,107 0,848
Gascondensatieketel EcoTEC Exclusiv VC146 4-7 met buffervat Unistor VIH R120 liter	0,8	0,48	0,385	0,148 0,889
EcoCOMPACT VCC 266/4-5 150	1,64	0,599	0,693	0,681
Oliecondensatieketel Vitoladens 300W met buffervat VITOCCELL 100-H	0,85	0,48	0,38	0,155 0,535
Oliecondensatieketel Vitoladens 333F	1,6	0,6	0,595	0,571
EcoVIT exclusiv VKK 126 met buffervat Unistor VIH R120 liter	1,257	0,57	0,691	0,495 1,236
<b>Gemiddelde met buffervat van 120 l</b>				<b>0,732</b>
<b>Gemiddelde zonder buffervat</b>				<b>0,228</b>

Bepaalde modellen van micro-WKK's worden standaard geïnstalleerd met een warmwateropslagtank terwijl anderen worden geïnstalleerd zonder vooraf bepaalde opslagtank. Een condensatieketel komt meestal ook voor in combinatie met een opslagtank voor het geproduceerde warme water. Gemiddelde volumes werden berekend voor de condensatieketels zowel met als zonder opslagtanks.

Zodoende kunnen de modellen die zonder opslagtank worden verkocht alsook degene die met opslagtank worden verkocht gequoteerd worden. Een score op 4 wordt toegekend. Een model dat veel kleiner is dan het gemiddelde van de condensatieketels krijgt een 4. Een model dat daarentegen veel groter is krijgt een nul. Indien de modellen zowel met als zonder opslagtank verkregen kunnen worden dan worden twee scores toegekend en het gemiddelde genomen.

Tabel 26: Score ingenomen volume

Productnaam	Volume [m <sup>3</sup> ]	Score zonder buffervat	Score met buffervat	Gemiddelde score
ICE 1	0,130	4		
ICE 1 met buffervat	0,519		4	4
ICE 2	0,428	0		
ICE 2 met buffervat	0,706		3	1,5
STIRLING 1	0,181	4		4
STIRLING 2	0,210	3		3
STIRLING 3	0,218	3		3
STIRLING 4	0,207	3		
STIRLING 4 buffervat	1,442		0	1,5
STIRLING 5 met buffervat	2,190		0	0
STIRLING 6 met buffervat	2,648		0	0
PEMFC 1	0,894	0		0
PEMFC 2	0,380	1		
PEMFC 2 met buffervat	1,079		1	1
PEMFC 3	0,344	1		1
PEMFC 4	0,358	1		1
PEMFC 5	0,578	0		0
PEMFC 6	0,413	0		
PEMFC 6 met buffervat	1,103		1	0,5
PEMFC 7	0,788	0		0
PEMFC 8	0,234	3		
PEMFC 8 met buffervat	0,815		2	2,5
PEMFC 9	0,347	1		
PEMFC 9 met buffervat	2,927		0	0,5
PEMFC 10	0,545	0		
PEMFC 10 met buffervat	0,695		3	1,5
SOFC 1	0,232	3		
SOFC 1 met buffervat	0,636		3	3
SOFC 2	0,400	1		1
SOFC 3	0,590	0		0
SOFC 4	/	/	/	/
SOFC 5	0,772	0		0
SOFC 6 met buffervat	1,296		0	0
SOFC 7 met buffervat	1,296		0	0
ORC 1	0,648	0		0
ORC 2	0,179	4		4
ORC 3	2,295	0		0



## 2.2.4.2. Geluidsniveau

Tabel 27: Geluidsniveau micro-WKK's

Product	Geluid [dB]
ICE 1	47
ICE 2	58
Stirling 1	49
Stirling 2	46
Stirling 3	46
Stirling 4	54
Stirling 5	45
Stirling 6	/
PEMFC 1	52
PEMFC 2	52
PEMFC 3	55
PEMFC 4	60
PEMFC 5	51
PEMFC 6	49
PEMFC 7	38/49
PEMFC 8	40/48
PEMFC 9	49
PEMFC 10	51
SOFC 1	38/48
SOFC 2	47
SOFC 3	30
SOFC 4	<65
SOFC 5	<50
SOFC 6	31
SOFC 7	31
ORC 1	51
ORC 2	/
ORC 3	/

Tabel 28: Score geluidsniveau

Product	Geluid [dB]
ICE 1	4
ICE 2	1
Stirling 1	4
Stirling 2	4
Stirling 3	4
Stirling 4	2
Stirling 5	4
Stirling 6	/
PEMFC 1	3
PEMFC 2	3
PEMFC 3	2
PEMFC 4	1
PEMFC 5	2
PEMFC 6	3
PEMFC 7	4
PEMFC 8	4
PEMFC 9	4
PEMFC 10	2
SOFC 1	4
SOFC 2	4
SOFC 3	4
SOFC 4	1
SOFC 5	4
SOFC 6	4
SOFC 7	4
ORC 1	3
ORC 2	/
ORC 3	/

Als de productfiches geloofd mogen worden, dan zijn de brandstofcellen heel stil. De back up branders, die meestal ingebouwd zijn, maken daarentegen wel telkens meer dan 48 dB aan geluid. Dat de brandstofcellen de stilste technologie hebben ligt voor de hand aangezien er geen gecontroleerde ontploffingen plaats vinden zoals bij de interne verbrandingsmotor of trillende delen aanwezig zijn zoals bij de stirlingmotoren. Toch maken de brandstofcel-WKK's wel evenveel geluid als de andere technologieën want gezien hun lage thermische output is er een back-up boiler nodig die minstens evenveel decibels produceert als een condensatieketel.

De SOFC 3, 6 en 7 geven in hun brochure een geluidsniveau van rond de 30 dB aan. Dit is enkel het geluid van de brandstofcel en kan niet de werking van de back-up brander en andere onderdelen van de WKK bevatten (*Beith, 2011*). De stirling 6 en ORC 3 draaien op pellets als brandstof en gaven geen geluidsniveau aan in hun productfiches. Aangezien deze technologie verschillend is van alle andere wordt hier geen inschatting van het geluidsniveau gemaakt.

ORC 2 heeft een volledig nieuw concept en geeft zijn geluidsniveau niet weer. Door het nieuwe ontwerp kan ook hier geen inschatting gemaakt worden.

De stirlingmotoren hebben dan wel een lager elektrisch vermogen maar hun thermisch vermogen ligt hoger dan dit van de brandstofcellen. Dit maakt dat ze zelf een grotere warmtevraag aankunnen maar toch is er nog altijd een hulpbrander geïnstalleerd. Het werkingsprincipe van de stirlingmotor toont aan dat er snel bewegende delen zijn en deze zorgen voor het gezoem van de WKK. Volgens de productfiches van de verschillende machines ligt het geluidsniveau dan ook minstens op 46 dB.

Voor alle toestellen werden de geluidsniveaus gevonden behalve voor de PEMFC 5. Aangezien het een PEM-brandstofcel betreft en er van andere WKK's met dezelfde technologie wel waarden te vinden zijn, wordt een inschatting gemaakt voor de waarde gebaseerd op de toestellen uit dezelfde regio.

Volgens de productfiches zijn stirling 1 en 2 de stilste met 46 dB en deze krijgen de maximum score. De SOFC 3, met zijn 30 dB in de productfiche, krijgt als score een drie doordat het geluidsniveau waarschijnlijk in de lijn van de andere stille brandstofcellen zal liggen. Deze krijgen beide de maximum score. Het luidste toestel is SOFC 4 en deze krijgt de laagste score. Het verschil van 19 dB wordt verdeeld in intervallen en op die manier worden de andere scores toegekend.

Algemeen kan gesteld worden dat voor alle toestellen de geluidsniveaus zeer laag zijn en vergelijkbaar zijn met deze van een koelkast. Dit zorgt er dus in geen enkel geval voor dat de micro-WKK's niet binnenshuis kunnen geïnstalleerd worden.

### 2.2.4.3. Opstarttijd

Tabel 29: Opstarttijd micro-WKK's

Product	Opstarttijd
ICE 1	minuten
ICE 2	minuten
Stirling 1	minuten
Stirling 2	minuten
Stirling 3	minuten
Stirling 4	minuten
Stirling 5	minuten
Stirling 6	minuten
PEMFC 1	<1 u
PEMFC 2	1 u
PEMFC 3	<1u
PEMFC 4	<45min
PEMFC 5	<1 min
PEMFC 6	<1 u
PEMFC 7	<1 u
PEMFC 8	<1u
PEMFC 9	<1 u
PEMFC 10	<1 u
SOFC 1	uren
SOFC 2	25 h
SOFC 3	24 h
SOFC 4	6 h
SOFC 5	uren
SOFC 6	uren
SOFC 7	uren
ORC 1	minuten
ORC 2	minuten
ORC 3	minuten

Tabel 30: Score opstarttijd

Product	Score
ICE 1	3
ICE 2	3
Stirling 1	4
Stirling 2	4
Stirling 3	4
Stirling 4	4
Stirling 5	4
Stirling 6	4
PEMFC 1	2
PEMFC 2	2
PEMFC 3	2
PEMFC 4	2
PEMFC 5	2
PEMFC 6	2
PEMFC 7	2
PEMFC 8	2
PEMFC 9	2
PEMFC 10	2
SOFC 1	1
SOFC 2	0
SOFC 3	0
SOFC 4	1
SOFC 5	1
SOFC 6	1
SOFC 7	1
ORC 1	4
ORC 2	4
ORC 3	4

De inwendige verbrandingsmotoren hebben een snelle mechanische opstart maar vragen een langere tijd voordat de temperatuur hoog genoeg geworden is voor het nominale thermische vermogen. De opstarttijd voor de PEMFC modellen bedraagt gemiddeld 1 uur waardoor ze minder geschikt zijn voor snelle start-stop cycli. Hetzelfde geldt voor de SOFC technologie waar de opstarttijd verschillende uren bedraagt (Beith, 2011). Algemeen kan gezegd worden dat brandstofcellen gemaakt zijn voor een continu gebruik en dus voor huizen waar de warmtevraag laag en constant is. Zowel bij de stirlingmotoren als de ORC-motoren wordt uitwendig gas verbrand. De beide technologieën hebben dus een korte tijd (15 min) nodig om op temperatuur te komen en zijn geschikt voor snelle start-stop cycli (Bouvenot, 2014). Deze krijgen dan ook de maximumscore gevolgd door de inwendige verbrandingsmotoren die een score van 3 krijgen. De PEMFC's krijgen een score van 2 en de SOFC's de laagste score van 1.

#### 2.2.4.4. Grootte buffervat

Het buffervat speelt een cruciale rol voor de optimale werking van een micro-WKK. Het stelt de micro-WKK in staat om te produceren wanneer de warmtevraag lager is dan zijn thermisch vermogen. Zo wordt het frequent stoppen en terug opstarten voorkomen en kan de WKK langere draaitijden bekomen. De buffer wordt daarna aangesproken wanneer de warmtevraag groter is dan het thermisch vermogen van de buffer. Het water dat vertrekt naar de verwarming heeft dan al een bepaalde temperatuur en de WKK moet dan minder warmte toevoeren om het op de juiste vertrektemperatuur te krijgen.

In de vereenvoudigde simulatie (die later nog uitvoerig besproken zal worden) wordt uitgegaan van een buffervat dat de werking van een piekbrander elimineert wanneer de dagvraag van een gezin lager is dan de maximale thermische energie die de micro-WKK kan leveren op dagbasis. Bij deze redenering wordt alle energie die de WKK meer produceert dan de momentane warmtevraag opgeslagen in de buffertank voor later gebruik binnen de dagcyclus.

Als er bijvoorbeeld op dagbasis maar 20 kWh nodig is en de micro-WKK kan op 24 uur tijd deze energie leveren dan is bij de vereenvoudigde simulatie geen piekbrander nodig. In een reële situatie zitten er echter zelfs bij de dagen met lage totale warmtevraag pieken in het verbruik waardoor het thermisch vermogen van de WKK op die ogenblikken te klein kan blijken te zijn en de piekbrander toch moet bijspringen. Bij de vereenvoudigde simulatie wordt daarentegen verondersteld dat er een zeer groot buffervat aanwezig waardoor de WKK altijd op vollast kan werken. Wanneer de warmte die de micro-WKK dan produceert (op vollast) groter is dan de gevraagde warmte wordt ze opgeslagen in het vat om later te kunnen gebruiken wanneer de vraag groter is dan de productie.

Om te bepalen of het buffervat dat geleverd wordt bij micro-WKK's groot genoeg is voor de Vlaamse gezinnen wiens gegevens opgemeten zijn gedurende een volledig jaar wordt een gedetailleerde simulatie uitgevoerd. Hierbij worden de thermische dagvragen aan de hand van de verwarmingsschema's omgevormd naar uurvragen. Er wordt geprogrammeerd dat de WKK in werking treedt wanneer de temperatuur in het buffervat daalt tot 80° (uitgaande van een 90/70 regime). Zo wordt een aantal draaiuren op jaarbasis bekomen dat altijd minder zal zijn dan het aantal draaiuren in de vereenvoudigde situatie met het 'ideale' buffervat. Bij elk van de drie gezinnen wordt voor elk toestel het aantal draaiuren van de gedetailleerde simulatie gedeeld door de draaiuren van de ideale situatie om een percentage te bekomen. Hierna wordt het gemiddelde van de drie waarden genomen voor elk toestel. Hoe groter het percentage hoe meer het geleverde buffervat geschikt is om een groot aantal draaiuren te faciliteren.

Zo heeft bijvoorbeeld ICE 1 bij gezin 2 een totaal aantal draaiuren van 4647 uren in de gedetailleerde simulatie en bij de vereenvoudigde situatie 4909 uren. Dit zorgt voor een percentage van 94,7%. Ook voor de andere gezinnen wordt dit percentage berekend. Van deze 3 getallen wordt het gemiddelde berekend en dit getal wordt gebruikt om een score te geven op de grootte van het buffervat.

Tabel 31: Grootte buffervat micro-WKK's

Product	Draaiuren t.o.v. vereenvoudigde simulatie [%]
ICE 1	90,8
ICE 2	95,5
Stirling 1	/
Stirling 2	95,8
Stirling 3	/
Stirling 4	96,9
Stirling 5	96,9
Stirling 6	99,6
PEMFC 1	98,0
PEMFC 2	98,5
PEMFC 3	/
PEMFC 4	/
PEMFC 5	/
PEMFC 6	98,6
PEMFC 7	98,7
PEMFC 8	98,5
PEMFC 9	99,5
PEMFC 10	98,0
SOFC 1	98,9
SOFC 2	/
SOFC 3	/
SOFC 4	/
SOFC 5	/
SOFC 6	98,9
SOFC 7	98,9
ORC 1	100,0
ORC 2	/
ORC 3	/

Tabel 32 : Score grootte buffervat

Product	Score
ICE 1	1
ICE 2	2
Stirling 1	/
Stirling 2	2
Stirling 3	/
Stirling 4	2
Stirling 5	2
Stirling 6	4
PEMFC 1	3
PEMFC 2	3
PEMFC 3	/
PEMFC 4	/
PEMFC 5	/
PEMFC 6	3
PEMFC 7	3
PEMFC 8	3
PEMFC 9	4
PEMFC 10	3
SOFC 1	3
SOFC 2	/
SOFC 3	/
SOFC 4	/
SOFC 5	/
SOFC 6	3
SOFC 7	3
ORC 1	4
ORC 2	/
ORC 3	/

ORC 1 heeft een groot buffervat dat ondanks het grote thermische vermogen in staat is om voldoende warmte te bufferen. De brandstofcellen hebben gezien hun beperkte thermische vermogen geen groot buffervat nodig omdat er vaak weinig tot geen situaties voorkomen waarbij de vraag veel kleiner is dan de warmte die WKK kan leveren. Zo bekommt ORC 1 de maximale score en toestellen die meer dan 97% halen een score van drie. ICE 2 en bepaalde stirling-WKK's zouden een iets groter buffervat kunnen gebruiken en krijgen een score van 2. ICE1 heeft met zijn buffervat van 90 liter veruit te weinig buffercapaciteit en krijgt een score van 1. Bij veel modellen is er geen standaardvat dat meegeleverd wordt waardoor deze niet beoordeeld worden.

## 2.2.5. Milieu-impact

### 2.2.5.1. Brandstofflexibiliteit

Tabel 33: Brandstofflexibiliteit micro-WKK's

Product	Brandstof
ICE 1	NG/LPG
ICE 2	NG
Stirling 1	NG/LPG/Biogas
Stirling 2	NG/Biogas
Stirling 3	NG
Stirling 4	NG/LPG
Stirling 5	NG/Bio Gas/LPG
Stirling 6	Pellets
PEMFC 1	LNG/LPG
PEMFC 2	NG
PEMFC 3	LNG
PEMFC 4	LNG
PEMFC 5	NG
PEMFC 6	NG (hoogcalorisch)
PEMFC 7	NG
PEMFC 8	LPG/NG
PEMFC 9	NG
PEMFC 10	NG/Biogas
SOFC 1	NG
SOFC 2	NG/Bio Gas
SOFC 3	NG/Bio Gas
SOFC 4	NG
SOFC 5	NG
SOFC 6	NG
SOFC 7	NG
ORC 1	Pellet/NG/LPG
ORC 2	NG
ORC 3	Pellets

Tabel 34 : Score brandstofflexibiliteit

Product	Score
ICE 1	2
ICE 2	1
Stirling 1	3
Stirling 2	2
Stirling 3	1
Stirling 4	2
Stirling 5	3
Stirling 6	1
PEMFC 1	2
PEMFC 2	1
PEMFC 3	1
PEMFC 4	1
PEMFC 5	1
PEMFC 6	1
PEMFC 7	1
PEMFC 8	2
PEMFC 9	1
PEMFC 10	2
SOFC 1	1
SOFC 2	2
SOFC 3	2
SOFC 4	1
SOFC 5	1
SOFC 6	1
SOFC 7	1
ORC 1	3
ORC 2	1
ORC 3	1

Bij de meeste Vlaamse gezinnen is enkel een aardgasaansluiting voorzien. De WKK zal dus sowieso op deze brandstof moeten draaien, tenzij bijvoorbeeld enkel kan gewerkt worden met Pellets. Deze moeten dan geleverd worden en opgeslagen. Sommige modellen kunnen ook op LPG draaien of Biogas. Wanneer de WKK op biogas draait, kan ze ook in Vlaanderen ook in aanmerking komen voor GSC bijkomend aan de WKC. Er zal door deze certificaten echter niet altijd meer cash flow kunnen gecreëerd worden omdat biogas ook duurder is dan aardgas. Per variant die mogelijk is al brandstof voor de WKK krijgt ze een punt extra als score.

### 2.2.5.2. CO<sub>2</sub>-terugverdientermijn

Tabel 35: CO<sub>2</sub>-terugverdientermijn micro-WKK's

Product	CO <sub>2</sub> -terugverdientermijn [jaar]
ICE 1	/
ICE 2	/
Stirling 1	0,75-1,35
Stirling 2	0,75-1,35
Stirling 3	0,75-1,35
Stirling 4	0,75-1,35
Stirling 5	0,75-1,35
Stirling 6	0,75-1,35
PEMFC 1	0,72
PEMFC 2	0,72
PEMFC 3	0,72
PEMFC 4	0,72
PEMFC 5	0,72
PEMFC 6	0,72
PEMFC 7	0,72
PEMFC 8	0,72
PEMFC 9	0,72
PEMFC 10	0,72
SOFC 1	2-10
SOFC 2	2-10
SOFC 3	2-10
SOFC 4	2-10
SOFC 5	2-10
SOFC 6	2-10
SOFC 7	2-10
ORC 1	/
ORC 2	/
ORC 3	/

Tabel 36: Score CO<sub>2</sub>-terugverdientermijn

Product	Score
ICE 1	/
ICE 2	/
Stirling 1	3
Stirling 2	3
Stirling 3	3
Stirling 4	3
Stirling 5	3
Stirling 6	3
PEMFC 1	4
PEMFC 2	4
PEMFC 3	4
PEMFC 4	4
PEMFC 5	4
PEMFC 6	4
PEMFC 7	4
PEMFC 8	4
PEMFC 9	4
PEMFC 10	4
SOFC 1	2
SOFC 2	2
SOFC 3	2
SOFC 4	2
SOFC 5	2
SOFC 6	2
SOFC 7	2
ORC 1	/
ORC 2	/
ORC 3	/

Uit een life cycle analysis van een stirling micro-WKK, die dateert uit 2011, is gebleken dat de energie die nodig was voor de fabricatie teruggewonnen werd op 1,32 tot 2,32 jaar. De CO<sub>2</sub>-terugverdientermijn bedroeg tussen de 9 maand en 1,35 jaar (Gazis, 2011). Voor de LCA werd samengewerkt met het bedrijf dat de micro-WKK fabriceerde om zo de samenstelling te kunnen te bepalen. Voor elk onderdeel van de WKK werd bepaald hoeveel kg staal, aluminium, koper en dergelijke verwerkt werd. Om te bepalen hoeveel energie en CO<sub>2</sub> er in de ruwe materialen werd gestoken, werd de *UK-oriented Inventory of Carbon and Energy* geraadpleegd. Aangezien bijna alle stirling-WKK's op dezelfde motor draaien en de hulpbrander ongeveer overal evenveel vermogen heeft zal de CO<sub>2</sub>-terugverdientermijn voor alle stirling-WKK's rond dezelfde waarde draaien.

Ook van een SOFC-wkk werd een life cycle analysis gemaakt. Voor de productie was 12-17 GJ aan energie nodig en 700-950 kg CO<sub>2</sub>-uitstoot werd geproduceerd. De brandstofcellen moeten om de 3-5 jaar vervangen worden en wanneer ook deze in rekening worden gebracht binnen een levensduur van 10 jaar, verdrievoudigen de energie-input en CO<sub>2</sub>-uitstoot. Door het hoge elektrische rendement kunnen de systemen hun energie-input en CO<sub>2</sub>-uitstoot ophalen op 2 jaar tijd wanneer ze de elektriciteit productie van centrales met een laag rendement vervangen. Als de gevestigde elektriciteitscentrales echter met een hoger rendement draaien stijgt de terugverdientermijn drastisch tot op het punt dat ze langer is dan de levensduur van de installatie (*Staffell, 2012*).

Een andere studie wijst uit dat voor de productie van een 2 kWe PEMFC-WKK de volgende energie nodig is.

- Stack: Natural gas: 31.008 MJ - Electricity (medium voltage): 80.278 MJ
- Balance of plant: Electricity (medium voltage): 152.006 M - Natural gas: 302.167 MJ - Light fuel oil: 197.926 MJ
- Pipework: Electricity (medium voltage): 2145.899 MJ - Light fuel oil: 3242.031 MJ - Natural gas: 3242.031 MJ
- Inverter: Electricity (medium voltage): 30.528 MJ

In totaal kost de productie van de PEMFC-WKK dus 9423,874 MJ aan energie. Een PEMFC-WKK zorgt in deze studie gemiddeld voor een primaire energie besparing van 3615,093 kWh per jaar en zou dus zijn fabricatie-energie terugwinnen op 0,72 jaar tijd. Deze terugverdientijd slaat dan wel op de algemene energie die de productie kost en niet op de CO<sub>2</sub>-uitstoot.

Voor de WKK's met een interne verbrandingsmotor werden nog geen LCA's uitgevoerd. Ook voor de WKK die op ORC technologie werken zijn er geen gegevens beschikbaar. Aangezien elk productieproces anders is voor een bepaalde technologie wordt er geen inschatting gemaakt van een terugverdientermijn.



### 2.2.5.3. FESR

FESR staat voor fuel energy savings ratio en betekent hetzelfde als het Vlaamse RPE (relatieve primaire energiebesparing). Om volgens de Vlaamse wetgeving aan kwalitatieve warmtekrachtkoppeling te doen moet deze waarde groter zijn dan nul voor micro-WKK's.

*“De relatieve primaire energiebesparing (RPEB) moet groter of gelijk zijn aan 10% voor WKK vanaf 1.000 kWe of minimaal 0% voor WKK kleiner dan 1.000kWe. De te gebruiken referentierendementen  $\eta_{TH}$  en  $\eta_E$  hangen af van het type brandstof voor de opwekking van elektriciteit en warmte, de correctiefactoren van de referentierendementen wegens klimaatomstandigheden en vermeden netverliezen.”*

Om de FESR te berekenen zijn referentierendementen nodig die bepaald zijn door de Vlaamse overheid en vastgelegd zijn in de bijlagen I, II, III en IV van het Ministerieel besluit van 1 juni 2012. Op de site van de VREG staat het volgende te lezen.

*“Het thermisch referentierendement is enkel afhankelijk van de gebruikte brandstof en van de vorm waarin de warmte geproduceerd wordt. Voor de WKK op aardgas die warmte produceert in de vorm van warm water is het thermisch referentierendement 90%.”*

Het elektrisch rendement is afhankelijk van de hoeveelheid stroom die geïnjecteerd wordt en de hoeveelheid die ter plaatste verbruikt wordt.

$$\eta_{er} = (52,5\% + 0,5\%) * (0,945 * \%geinjecteerd + 0,925 * \%terplaatsteverbruikt)$$

De verklaring van deze berekening:

0,5% > correctiefactor voor klimaatomstandigheden, overal in Vlaanderen gelijk aan 0,5%

0,945 > correctiefactor voor injectie in het net op 10 kV

0,925 > correctiefactor voor ter plaatse verbruikte elektriciteit op 400V

Aangezien de VREG er bij teruglopende tellers van uit gaat dat alle geproduceerde elektriciteit ter plaatse verbruikt wordt, wordt het percentage van ter plaatse verbruikte stroom dan ook 100% genomen. Aldus wordt het elektrisch referentierendement 49,025%.

Met de bekomen referentiewaarden kan de FESR als volgt worden berekend :

$$FESR = 1 - \frac{PHR + 1}{\eta_{WKK} * \left( \frac{PHR}{\eta_{e,ref}} + \frac{1}{\eta_{th,ref}} \right)}$$

Hoe hoger de FESR van de micro-WKK hoe meer primaire energie hij bespaart ten opzichte van. de conventionele opwekking waarbij de benodigde warmte en elektriciteit afzonderlijk wordt geproduceerd.

Tabel 37: FESR micro-WKK's

Product	FESR [%]
ICE 1	0,210
ICE 2	0,210
Stirling 1	0,154
Stirling 2	0,122
Stirling 3	0,194
Stirling 4	0,166
Stirling 5	0,179
Stirling 6	0,166
PEMFC 1	0,195
PEMFC 2	0,186
PEMFC 3	0,175
PEMFC 4	0,261
PEMFC 5	0,215
PEMFC 6	0,274
PEMFC 7	0,294
PEMFC 8	0,288
PEMFC 9	0,282
PEMFC 10	0,274
SOFC 1	0,307
SOFC 2	0,337
SOFC 3	0,270
SOFC 4	0,300
SOFC 5	0,295
SOFC 6	0,295
SOFC 7	0,295
ORC 1	0,107
ORC 2	0,112
ORC 3	0,087

Tabel 38 :Score FESR

Product	Score
ICE 1	3
ICE 2	3
Stirling 1	1
Stirling 2	2
Stirling 3	3
Stirling 4	2
Stirling 5	2
Stirling 6	2
PEMFC 1	3
PEMFC 2	2
PEMFC 3	2
PEMFC 4	4
PEMFC 5	3
PEMFC 6	4
PEMFC 7	4
PEMFC 8	4
PEMFC 9	4
PEMFC 10	4
SOFC 1	4
SOFC 2	4
SOFC 3	4
SOFC 4	4
SOFC 5	4
SOFC 6	4
SOFC 7	4
ORC 1	1
ORC 2	1
ORC 3	1

Volgens de wetgeving rond WKK-certificaten zijn alle toestellen goedgekeurd aangezien ze een FESR hebben die groter is dan 0%. Voor de toekenning van de scores krijgen de toestellen met een FESR rond de 26% en hoger een maximale score. Een FESR groter dan 19% levert een drie op, groter dan 15% een 2. De toestellen met de laagste FESR (<15%) krijgen een 1 als score.

## 2.2.5.4. Restproducten

Tabel 39: Restproducten micro-WKK's

Product	NO <sub>x</sub> [mg/ Nm <sup>3</sup> ]
ICE 1	80
ICE 2	80
Stirling 1	< 70
Stirling 2	< 70
Stirling 3	< 70
Stirling 4	< 70
Stirling 5	< 70
Stirling 6	70
PEMFC 1	Geen NO <sub>x</sub>
PEMFC 2	Geen NO <sub>x</sub>
PEMFC 3	Geen NO <sub>x</sub>
PEMFC 4	Geen NO <sub>x</sub>
PEMFC 5	Geen NO <sub>x</sub>
PEMFC 6	Geen NO <sub>x</sub>
PEMFC 7	Geen NO <sub>x</sub>
PEMFC 8	Geen NO <sub>x</sub>
PEMFC 9	Geen NO <sub>x</sub>
PEMFC 10	Geen NO <sub>x</sub>
SOFC 1	Geen NO <sub>x</sub>
SOFC 2	Geen NO <sub>x</sub>
SOFC 3	< 30
SOFC 4	Geen NO <sub>x</sub>
SOFC 5	Geen NO <sub>x</sub>
SOFC 6	Geen NO <sub>x</sub>
SOFC 7	Geen NO <sub>x</sub>
ORC 1	70
ORC 2	< 70
ORC 3	70

Tabel 40: Score restproducten

Product	Score
ICE 1	1
ICE 2	1
Stirling 1	3
Stirling 2	3
Stirling 3	3
Stirling 4	3
Stirling 5	3
Stirling 6	2
PEMFC 1	4
PEMFC 2	4
PEMFC 3	4
PEMFC 4	4
PEMFC 5	4
PEMFC 6	4
PEMFC 7	4
PEMFC 8	4
PEMFC 9	4
PEMFC 10	4
SOFC 1	4
SOFC 2	4
SOFC 3	4
SOFC 4	4
SOFC 5	4
SOFC 6	4
SOFC 7	4
ORC 1	2
ORC 2	3
ORC 3	2

De uitstoot van interne verbrandingsmotoren is de hoogste van alle micro-WKK technologieën gezien de verbrandingscondities binnenin de motor. De ICE 1 en ICE 2 draaien op dezelfde motor en zullen dus ongeveer dezelfde uitstoot hebben. Door de omvormer die gebruik maakt van een drieweg katalysator kunnen de emissies van koolstofmonoxide bijna tot nul gereduceerd worden. Daarnaast beperkt de uitstoot van NO<sub>x</sub> zich tot ongeveer 80 mg per normaal kubiek uitlaatgas.

De emissies van een stirling motor zijn iets hoger dan deze van een condenserende boiler (*Beith, 2011*) en zouden volgens de productfiches tot tien keer lager kunnen zijn dan deze van de interne verbrandingsmotoren. Klasse 5 van de NO<sub>x</sub> en CO<sub>2</sub>-uitstoot staat voor het feit dat er maximaal 70 mg/Nm<sup>3</sup> mag uitgestoten worden. Alle verwarmingstoestellen die op aardgas werken moeten aan deze Europese norm voldoen om te mogen verkocht worden binnen Europa.

Voor de pellet-WKK's werd enkel van ORC 1 de NO<sub>x</sub>-uitstoot gevonden. Voor de waarde van de andere pellet-WKK's werd dezelfde waarde aangenomen als van ORC 1 daar in de literatuur te lezen staat dat voor kleine installaties de NO<sub>x</sub>-uitstoot zich concentreert rond de 60 mg/Nm<sup>3</sup>.

De brandstofcellen kunnen bijna emissieloos genoemd worden. Hoewel ze nooit een nuluitstoot zullen hebben, wordt door de omvorming van het aardgas in plaats van de verbranding ervan veel minder schadelijk stoffen uitgestoten. De emissies van grote installaties zijn opgemeten door verschillende auteurs en deze zijn maar 1-15% van de uitstoot bij technologieën die gebaseerd zijn op motoren. Gemiddelde emissies bij grote installaties zijn ongeveer 1,6 mg stikstofdioxide per normaal kubiek uitlaatgas en 2,7 mg koolstofmonoxide maar ook andere stoffen zoals zwaveldioxide, methaan en willekeurige organische ketens worden uitgestoten zij het onder de detecteerbare grens. Zolang de residentiële brandstofcellen ook de steam-reforming gebruiken, kunnen de emissies gelijkaardig aan deze van de grote installaties verondersteld worden.

Alle fabrikanten van de brandstofcellen vermelden dat er nagenoeg geen NO<sub>x</sub>-uitstoot is bij hun toestel. Enkel de SOFC 4 heeft blijkbaar toch een uitstoot die kleiner is dan 30 mg/Nm<sup>3</sup>

Toestellen die nagenoeg geen NO<sub>x</sub>-uitstoot hebben (<30 mg/Nm<sup>3</sup>) krijgen de maximumscore. Een uitstoot kleiner dan 70 mg/Nm<sup>3</sup> levert een 3 op. De modellen met een uitstoot van 70 mg/Nm<sup>3</sup> krijgen een twee als score en de ICE's krijgen de laagste score.

### 2.2.5.5. Transportvervuiling

Tabel 41: Transportvervuiling micro-WKK's      Tabel 42: Score transportvervuiling

Product	Land van oorsprong	Product	Score [-]
ICE 1	Japan	ICE 1	1
ICE 2	Duitsland	ICE 2	3
Stirling 1	UK	Stirling 1	3
Stirling 2	Nederland	Stirling 2	3
Stirling 3	Nederland/Zuid-Korea	Stirling 3	1
Stirling 4	Duitsland	Stirling 4	3
Stirling 5	Duitsland	Stirling 5	3
Stirling 6	Oostenrijk	Stirling 6	2
PEMFC 1	Zuid-Korea	PEMFC 1	1
PEMFC 2	Zuid-Korea	PEMFC 2	1
PEMFC 3	Zuid-Korea	PEMFC 3	1
PEMFC 4	Zuid-Korea	PEMFC 4	1
PEMFC 5	Zuid-Korea	PEMFC 5	1
PEMFC 6	Duitsland	PEMFC 6	3
PEMFC 7	Japan	PEMFC 7	1
PEMFC 8	Japan	PEMFC 8	1
PEMFC 9	Duitsland	PEMFC 9	3
PEMFC 10	UK/Duitsland	PEMFC 10	3
SOFC 1	Japan	SOFC 1	1
SOFC 2	Australië	SOFC 2	1
SOFC 3	Zwitserland	SOFC 3	2
SOFC 4	Taiwan	SOFC 4	1
SOFC 5	Italië	SOFC 5	2
SOFC 6	Duitsland	SOFC 6	3
SOFC 7	Duitsland	SOFC 7	3
ORC 1	Duitsland	ORC 1	3
ORC 2	UK	ORC 2	3
ORC 3	België	ORC 3	4

Het toestel dat door een Belgische fabrikant gefabriceerd wordt krijgt de maximale score. Toestellen die in de buurlanden gemaakt worden krijgen een score van 3. Wordt de WKK gemaakt in andere Europese landen die geen buurlanden zijn dan krijgt het toestel een score van 2. Als de WKK van buiten Europa moet geïmporteerd worden dan krijgt het de laagste score van 1.

### 2.2.5.6. Exergiebehoud

Tabel 43: Exergiebehoud micro-WKK's

Product	PHR [-]
ICE 1	0,400
ICE 2	0,400
Stirling 1	0,167
Stirling 2	0,200
Stirling 3	0,189
Stirling 4	0,175
Stirling 5	0,172
Stirling 6	0,075
PEMFC 1	0,769
PEMFC 2	1,000
PEMFC 3	0,769
PEMFC 4	1,163
PEMFC 5	0,714
PEMFC 6	0,750
PEMFC 7	0,694
PEMFC 8	0,700
PEMFC 9	0,500
PEMFC 10	0,535
SOFC 1	1,129
SOFC 2	2,500
SOFC 3	0,556
SOFC 4	1,333
SOFC 5	1,000
SOFC 6	1,000
SOFC 7	1,000
ORC 1	0,094
ORC 2	0,139
ORC 3	0,094

Tabel 44: Score exergiebehoud

Product	Score [-]
ICE 1	2
ICE 2	2
Stirling 1	1
Stirling 2	1
Stirling 3	1
Stirling 4	1
Stirling 5	1
Stirling 6	1
PEMFC 1	2
PEMFC 2	3
PEMFC 3	2
PEMFC 4	3
PEMFC 5	2
PEMFC 6	2
PEMFC 7	2
PEMFC 8	2
PEMFC 9	2
PEMFC 10	2
SOFC 1	3
SOFC 2	4
SOFC 3	2
SOFC 4	3
SOFC 5	3
SOFC 6	3
SOFC 7	3
ORC 1	1
ORC 2	1
ORC 3	1

Exergie is dat gedeelte van de energie dat volledig omzetbaar is in andere energievormen. Anergie daarentegen is het gedeelte dat niet (meer) volledig omzetbaar is in andere vormen. Het is duidelijk dat aan exergie een grotere waarde dient gehecht te worden dan aan anergie en dat met deze exergie dan ook zuinig omgesprongen moet worden.

Elektriciteit is volledig omzetbaar in andere vormen, zoals bijvoorbeeld mechanische energie en warmte, en bestaat dus volledig uit exergie. Warmte is echter een energievorm met een lagere kwaliteit, die niet meer volledig kan omgezet worden in een andere energievorm. Warmte bevat dus naast exergie ook anergie en het aandeel van de anergie neemt toe naarmate de warmte op lagere temperatuur beschikbaar is.

PHR staat voor power to heat ratio. Dit is de verhouding tussen het elektrisch en thermisch vermogen. Omdat elektriciteit als waardevoller wordt aanzien dan laagwaardige warmte is een hogere PHR vanuit energetisch standpunt een meerwaarde.

Het zal dan ook duidelijk zijn dat stirling motoren hier minder goed op scoren dan de brandstofcellen die een veel hoger elektrisch rendement hebben.

Een hogere PHR waarde zal leiden tot een hogere FESR-waarde en dus tot een grote CO<sub>2</sub>-besparing. Vanuit energetisch standpunt is een hogere PHR-waarde een pluspunt maar praktisch kan dit het omgekeerde zijn. Wanneer de WKK een te laag thermisch vermogen heeft ten opzichte van de warmtevraag zal de back-up brander heel veel opstarten wat tot een intermitterende werking van de WKK leidt.

De toestellen met de hoogste PHR's zijn duidelijk de brandstofcellen waarbij SOFC 2 er nog bovenuit steekt. Dit uit zich ook in de scores die toegekend worden. SOFC 2 krijgt de maximale score waarna de andere PHR's die rond de eenheid schommelen een score van 3 krijgen. Alle toestellen met een PHR-waarde tussen 0.4 en 1 krijgen een score van 2 en de anderen de minimale score.

### 2.3. Besluit technische analyse

Om de totale som te maken van alle karakteristieken worden voor elk toestel de scores op de verschillende onderdelen uitgezet naast elkaar. Deze scores worden vervolgens vermenigvuldigd met de weegfactoren die de beoordeler zelf heeft gekozen. Als laatste wordt voor elk toestel de totale som gemaakt van de scores vermenigvuldigd met de weegfactoren.

Hiernaast wordt ook de 'ideale' machine bepaald. Deze fictieve machine haalt op elk onderdeel de maximum score die gehaald is geweest door de 26 reële toestellen. Voor elk onderdeel wordt de score terug vermenigvuldigd met de weegfactoren en deze worden opgeteld bij elkaar. Zo wordt een maximum score bekomen die het best mogelijke toestel in theorie zou kunnen halen.

Elk toestel wordt vergeleken met dit ideale toestel door de totale scores die elk individueel toestel gehaald heeft, te delen door deze maximum score om zo tot een relatief getal te komen.

Op deze manier kan aan de hand van de twee Kesselringmatrices met hun respectievelijke weegfactoren een top 5 bekomen worden.

*Tabel 45: Top 5 voor korte SPB*

Stirling 4	0,780112
Stirling 2	0,767507
PEMFC 8	0,693277
PEMFC 9	0,682073
PEMFC 7	0,672269

*Tabel 46: Top 5 voor beste milieu-impact*

PEMFC 9	0,693989
PEMFC 8	0,670765
PEMFC 7	0,666667
Stirling 4	0,64071
Stirling 2	0,629781

De opmerking moet zeker gemaakt worden dat alles afhankelijk is van de weegfactoren die gekozen worden door de beoordeler. Dit is een individuele keuze die de uitkomst sterk beïnvloedt. Ook het feit of aan elk onderdeel een score kon worden toegekend, en dus alle gegevens beschikbaar waren, heeft een grote invloed op de totale som van de scores. Toestellen waarvan alle gegevens voorhanden waren, halen bij deze beoordelingsmethode veel betere relatieve cijfers dan de andere toestellen (zie tabel 49 en 50).

Om dit probleem te omzeilen werd dezelfde methode toegepast als hiervoor maar dan enkel met de onderdelen die gequoteerd konden worden. De delen waarvoor geen gegevens gevonden werden buiten beschouwing gelaten en de som werd gemaakt van alle scores die wel toegekend werden.

Om de relatieve score te bekomen werd de som gemaakt van de overeenkomstige scores van de ideale machine en hierdoor gedeeld. Als bijvoorbeeld voor een toestel alle gegevens voorhanden waren behalve een geluidsniveau dan werd de totale som van scores bepaald van het toestel zonder de score van geluidsniveau en nadien gedeeld door de totale score van het ideale toestel zonder de ideale score van geluidsniveau. Op deze manier wordt elke toestel vergeleken met het 'ideale' toestel op de parameters die ook echt beoordeeld konden worden.

Zodoende is te merken dat andere toestellen tot de beste toestellen gaan behoren.



Tabel 47: Top 5 voor korte SPB zonder onbekende scores

Stirling 4	0,78
Stirling 2	0,77
ORC 1	0,70
PEMFC 8	0,69
PEMFC 9	0,68

Tabel 48 : Top 5 voor beste milieu-impact zonder onbekende scores

PEMFC 9	0,71
PEMFC 10	0,69
PEMFC 8	0,68
PEMFC 7	0,67
PEMFC 6	0,67

In tabel 47 nemen dezelfde 2 toestellen de eerste posities in als bij tabel 45. Deze modellen hebben op bepaalde onderdelen beter gescoord dan het gemiddelde wat maakt de ze voor dit scenario het meest geschikt zijn.

- Hun aankoop prijs is relatief beperkt.
- Ze kunnen onderhouden kunnen door een verdeler/installateur dicht bij huis.
- De PHR van de technologie sluit goed aan bij het Vlaamse gemiddelde.
- Er wordt een goede levensduur voorspeld.
- Het betreft totaalsystemen waar weinig tot geen aanpassingen/toevoegingen voor vereist zijn.

De combinatie van al deze factoren zorgt ervoor dat deze stirling-WKK's het meest interessant zijn als een koper een vlotte en regelmatige werking van de installatie beoogt aan een prijs die kan concurreren met een nieuwe condensatieketel.

Uit tabel 48 komen echter volledig andere modellen als beste naar voor dan bij tabel 47. Brandstofcellen maken hier de volledige top 5 vol wanneer een zo goed mogelijke impact op het milieu beoogd wordt. Ook hier zorgen bepaalde criteria ervoor dat de brandstofceltechnologie als beste scoort .

- De brandstofcellen hebben gezien hun hoge elektrisch rendement de grootste CO<sub>2</sub> - besparing.
- Er worden bijna geen restproducten uitgestoten.
- Ze hebben een goede CO<sub>2</sub>-terugverdientermijn .
- Ze hebben inherent een stille werking.

Het is echter niet omdat bepaalde modellen vanuit het technische aspect als beste worden aanzien dat ze ook vanuit een economisch standpunt aantrekkelijk zijn. Elke gezinsituatie heeft een ander jaarlijks verbruik van elektriciteit en gas waardoor voor elk huishouden andere technologieën voordeliger zullen blijken te zijn. In het volgende deel van deze thesis wordt dan ook voor 3 verschillende huishoudens bepaald welke toestellen de kortste terugbetalingstermijn zullen hebben.

Tabel 49: Volledig exceltabel met weegfactoren voor korte SPB

	Aankooprij	Levensduur	Brandstoflexibiliteit	CO2 Terugverdiendtijd	Conformiteit PHR	FESR	Geluidsniveau	Geproduceerde eenheden	Grootte buffervat	Importtax	Ingenomen Volume	Opstarttijd	Restproducten	Service mogelijkheden	Transportvervuiling	Vereiste Aansluitingen	Onderhoudsinterval	Gamma	Kant en klaarheid	Exergiebehoud	Som	Relatieve som	Relatieve som zonder onbekenden
ICE 1	60	36	16	/	36	15	44	68	13	2	24	33	2	0	2	14	24	32	48	8	477	0,67	0,68
ICE 2	45	36	8	/	36	15	11	17	26	8	9	33	2	38	6	14	24	32	64	8	432	0,61	0,61
Stirling 1	45	36	24	6	48	5	44	17	/	8	24	44	6	38	6	14	24	24	32	4	449	0,63	0,68
Stirling 2	45	54	16	6	48	10	44	51	26	8	18	44	6	76	6	14	24	0	48	4	548	0,77	0,77
Stirling 3	60	/	8	6	48	15	44	17	/	2	18	44	6	57	2	14	24	0	32	4	401	0,56	0,68
Stirling 4	45	54	16	6	48	10	22	51	26	8	9	44	6	76	6	14	24	24	64	4	557	0,78	0,78
Stirling 5	/	/	24	6	48	10	/	0	26	8	0	44	6	57	6	14	24	16	64	4	357	0,50	0,66
Stirling 6	15	/	8	6	36	10	/	0	52	8	0	44	4	19	4	14	24	16	64	4	328	0,46	0,55
PEMFC 1	0	/	16	8	24	15	33	34	39	2	0	22	8	0	2	14	24	16	32	8	297	0,42	0,46
PEMFC 2	0	54	8	8	12	10	33	0	39	2	6	22	8	0	2	14	24	24	64	12	342	0,48	0,48
PEMFC 3	/	54	8	8	24	10	22	17	/	2	6	22	8	0	2	14	24	24	16	8	269	0,38	0,45
PEMFC 4	/	54	8	8	12	20	11	17	/	2	6	22	8	0	2	14	24	24	16	12	260	0,36	0,43
PEMFC 5	0	/	8	8	24	15	22	51	/	2	0	22	8	0	2	14	24	0	16	8	224	0,31	0,38
PEMFC 6	30	/	8	8	24	20	33	0	39	8	3	22	8	19	6	14	24	24	64	8	362	0,51	0,56
PEMFC 7	45	72	8	8	24	20	44	68	39	2	0	22	8	0	2	14	24	8	64	8	480	0,67	0,67
PEMFC 8	45	72	16	8	24	20	44	68	39	2	15	22	8	0	2	14	24	0	64	8	495	0,69	0,69
PEMFC 9	30	72	8	8	24	20	44	34	52	8	3	22	8	38	6	14	24	0	64	8	487	0,68	0,68
PEMFC 10	/	/	16	8	24	20	22	0	39	8	9	22	8	38	6	14	24	24	64	8	354	0,50	0,61
SOFC 1	30	72	8	4	12	20	44	68	39	2	18	11	8	0	2	14	24	0	64	12	452	0,63	0,63
SOFC 2	15	54	16	4	12	20	44	34	/	2	6	0	8	76	2	14	24	0	16	16	363	0,51	0,55
SOFC 3	30	72	16	4	24	20	44	34	/	8	0	0	8	38	4	14	24	0	32	8	380	0,53	0,57
SOFC 4	60	54	8	4	12	20	11	0	/	2	/	11	8	0	2	14	24	0	16	12	258	0,36	0,40
SOFC 5	/	/	8	4	12	20	44	17	/	8	0	11	8	38	4	14	24	0	16	12	240	0,34	0,45
SOFC 6	30	/	8	4	12	20	/	68	39	8	0	11	8	19	6	14	24	0	64	12	347	0,49	0,58
SOFC 7	/	/	8	4	12	20	/	68	39	8	0	11	8	19	6	14	24	0	64	12	317	0,44	0,59
ORC 1	30	/	24	/	36	5	33	17	52	8	0	44	4	76	6	14	24	0	64	4	441	0,62	0,70
ORC 2	60	36	8	/	36	5	/	0	/	8	24	44	6	38	6	14	24	0	16	4	329	0,46	0,54
ORC 3	/	/	8	/	36	5	/	0	/	8	0	44	4	38	8	14	24	16	16	4	225	0,32	0,47
Ideale Machine	60	72	24	8	48	20	44	68	52	8	24	44	8	76	8	14	24	32	64	16	714	1,00	1,00

Tabel 50: Volledige exceltabel met weegfactoren voor beste milieu-impact

	Aankooprij	Levensduur	Brandstofflexibiliteit	CO2 Terugverdiertijd	Conformiteit PHR	FESR	Geluidsniveau	Geproduceerde eenheden	Groote buffervat	Importtax	Ingenomen Volume	Opstarttijd	Restproducten	Servicemogelijkheden	Transportvervulling	Vereiste Aansluitingen	Onderhoudsinterval	Gamma	Kant en klaarheid	Exergiebehoud	Som	Relatieve som	Relatieve som zonder onbekenden
ICE 1	12	20	24	/	48	57	28	36	11	1	12	30	18	0	12	2	14	36	12	32	405	0,55	0,61
ICE 2	9	20	12	/	48	57	7	9	22	4	/	30	18	12	36	2	14	36	16	32	384	0,52	0,59
Stirling 1	9	20	36	48	64	19	28	9	/	4	12	40	54	12	36	2	14	27	8	16	418	0,57	0,61
Stirling 2	9	30	24	48	64	38	28	27	22	4	9	40	54	24	36	2	14	0	12	16	461	0,63	0,63
Stirling 3	12	/	12	48	64	57	28	9	/	1	9	40	54	18	12	2	14	0	8	16	364	0,50	0,56
Stirling 4	9	30	24	48	64	38	14	27	22	4	/	40	54	24	36	2	14	27	16	16	469	0,64	0,65
Stirling 5	/	/	36	48	64	38	/	0	22	4	0	40	54	18	36	2	14	18	16	16	386	0,53	0,59
Stirling 6	3	/	12	48	48	38	/	0	44	4	0	40	36	6	24	2	14	18	16	16	329	0,45	0,50
PEMFC 1	0	/	24	64	32	57	21	18	33	1	0	20	72	0	12	2	14	18	8	32	408	0,56	0,59
PEMFC 2	0	30	12	64	16	38	21	0	33	1	3	20	72	0	12	2	14	27	16	48	409	0,56	0,56
PEMFC 3	/	30	12	64	32	38	14	9	/	1	3	20	72	0	12	2	14	27	4	32	366	0,50	0,54
PEMFC 4	/	30	12	64	16	76	7	9	/	1	3	20	72	0	12	2	14	27	4	48	397	0,54	0,59
PEMFC 5	0	/	12	64	32	57	14	27	/	1	0	20	72	0	12	2	14	0	4	32	343	0,47	0,53
PEMFC 6	6	/	12	64	32	76	21	0	33	4	/	20	72	6	36	2	14	27	16	32	453	0,62	0,67
PEMFC 7	9	40	12	64	32	76	28	36	33	1	0	20	72	0	12	2	14	9	16	32	488	0,67	0,67
PEMFC 8	9	40	24	64	32	76	28	36	33	1	/	20	72	0	12	2	14	0	16	32	491	0,67	0,68
PEMFC 9	6	40	12	64	32	76	28	18	44	4	/	20	72	12	36	2	14	0	16	32	508	0,69	0,71
PEMFC 10	/	/	24	64	32	76	14	0	33	4	/	20	72	12	36	2	14	27	16	32	458	0,63	0,69
SOFC 1	6	40	12	32	16	76	28	36	33	1	9	10	72	0	12	2	14	0	16	48	453	0,62	0,62
SOFC 2	3	30	24	32	16	76	28	18	/	1	3	0	72	24	12	2	14	0	4	64	423	0,58	0,61
SOFC 3	6	40	24	32	32	76	28	18	/	4	0	0	72	12	24	2	14	0	8	32	424	0,58	0,62
SOFC 4	12	30	12	32	16	76	7	0	/	1	/	10	72	0	12	2	14	0	4	48	338	0,46	0,50
SOFC 5	/	/	12	32	16	76	28	9	/	4	0	10	72	12	24	2	14	0	4	48	353	0,48	0,56
SOFC 6	6	/	12	32	16	76	/	36	33	4	0	10	72	6	36	2	14	0	16	48	409	0,56	0,62
SOFC 7	/	/	12	32	16	76	/	36	33	4	0	10	72	6	36	2	14	0	16	48	403	0,55	0,62
ORC 1	6	/	36	/	48	19	21	9	44	4	0	40	36	24	36	2	14	0	16	16	331	0,45	0,53
ORC 2	12	20	12	/	48	19	/	0	/	4	12	40	54	12	36	2	14	0	4	16	265	0,36	0,44
ORC 3	/	/	12	/	48	19	/	0	/	4	0	40	36	12	48	2	14	18	4	16	233	0,32	0,43
Ideale Machine	12	40	36	64	64	76	28	36	44	4	12	40	72	24	48	2	14	36	16	64	732	1,00	1,00

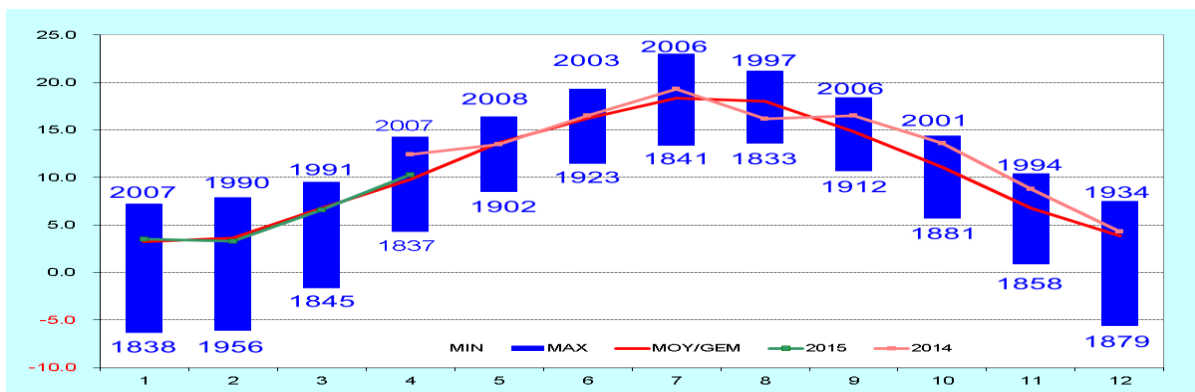
### 3. Economische analyse micro-WKK's

#### 3.1. Methodiek

Gedurende een volledig jaar hebben 3 gezinnen hun aardgas-en elektriciteitstanden doorgegeven. Deze waarden vertegenwoordigen het verbruik van een hele dag. Om deze dagwaarden om te vormen naar verbruiken per uur werd ook hun verwarmingsregime opgevraagd. Gedurende de uren van verwarming, de piekvraaguren, wordt uiteraard meer verbruikt dan tijdens de andere uren. Voor de omvorming naar de warmtevraag per uur wordt een inschatting van het uurverbruik gemaakt aan de hand van het standaard lastprofiel.

Bij het standaard lastprofiel wordt uitgegaan van het verbruik van een gemiddeld Vlaams gezin. Elk uur van het jaar krijgt een percentage van het jaartotaal toegewezen. Wanneer dit percentage vermenigvuldigd wordt met het totale jaarverbruik wordt het verbruik voor dat uur bekomen. Uit deze cijfers valt af te leiden dat de vraag tijdens de piekuren tot 4 keer de vraag is van de daluren. Deze inschatting wordt overgenomen voor de opgevolgde gezinnen. Een bijkomende veronderstelling die gemaakt wordt, is dat de verwarming tijdens het eerste uur van verwarmen dubbel zo veel vermogen vraagt als tijdens de volgende verwarmingsuren om de woning op temperatuur te brengen. Deze twee aannames leiden uiteindelijk tot een bepaald percentage van de dagvraag die toegekend wordt aan elk uur.

Op het moment van schrijven is er nog geen volledig jaar opgevolgd geweest. De gezinnen zijn namelijk begonnen op 30 mei 2014. De ontbrekende gegevens worden ingeschat voor elk gezin. Hiervoor wordt gekeken naar de gemiddelde temperatuur die de ontbrekende maanden hadden in het vorige jaar. Deze worden vergeleken met de gemiddelde temperatuur van de al opgemeten maanden. Indien de temperatuur overeenkomt, worden de gegevens van deze reeds opgemeten maand omgekeerd ingevuld voor de ontbrekende maand. Bijvoorbeeld als er gegevens zijn startende van 1 juni 2014 tot maart 2015 ontbreken de gegevens van de maanden april en mei van 2015 om een volledig jaar te hebben. De gemiddelde temperatuur van april en mei in 2014 worden bijgevolg opgezocht (zie Figuur 46). Moest de gemiddelde temperatuur van april 2014 in de buurt liggen van de gemiddelde temperatuur in november 2015 dan worden de waarden van november 2015 omgekeerd ingevuld in april 2015. Dit omdat het in november kouder wordt terwijl het tijdens april normaal enkel warmer wordt.



Figuur 46: Gemiddelde maandtemperaturen 2014/2015

### 3.1.2. Gegevens opgevolgde gezinnen

#### 3.1.2.1. Gezin 1

Het eerste gezin bestaat uit 2 volwassenen met 3 adolescenten die een leeftijd hebben tussen de 18 en 23 jaar. De woning is gelegen in de gemeente Zandvoorde en is gebouwd in het jaar 1998 als nieuwbouw.



*Figuur 47: Vrijstaande woning gezin 1*

Het verwarmingsregime is het volgende (uren waarop de verwarming aan staat) :

- Weekdagen:               7u-8u  
                                  16u30-22u30
- Weekends:                8u-22u30

#### 3.1.2.2. Gezin 2

Dit gezin bestaat uit 2 volwassenen met 2 kleine kinderen tussen 2 en 5 jaar. Het huis heeft een volume van 550 m<sup>3</sup> en gebruikt een condensatieketel als verwarmingsinstallatie. Het huis is gebouwd in 1961 en een eerste keer gerenoveerd in 2009.



*Figuur 48 : Halfopen bebouwing gezin 2*

Het verwarmingsregime is als volgt :

- Weekdagen:               6u30-8u30  
                                  12-13u  
                                  17u30-23u
- Weekends:                8u30-23u

### 3.1.2.3. Gezin 3

Dit gezin bestaat uit 2 volwassenen met 2 kinderen tussen de 10 en 12 jaar. Het huis heeft een volume van 525 m<sup>3</sup> en onderging gedurende het jaar een verandering van de ketel. Voorheen werd een 15 jaar oude ketel van Buderus gebruikt in combinatie met een boiler van 160 liter. De nieuwe installatie is een condensatieketel van Atag. Het huis is gebouwd in het jaar 1999 als nieuwbouw en is sindsdien niet gerenoveerd geweest.



Figuur 49: Vrijstaande woning gezin 3

Het verwarmingsregime is als volgt :

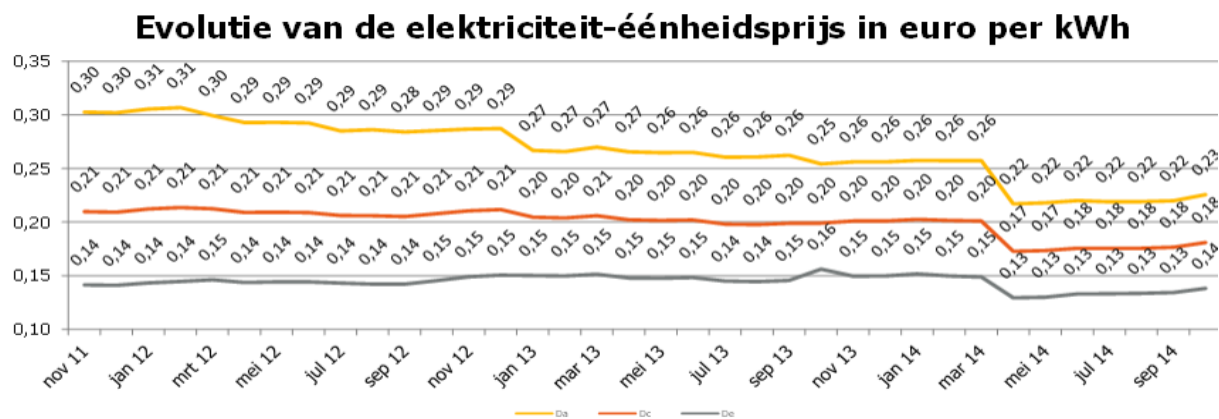
- Weekdagen :               6u-7u45  
                                      15u45-22u45
- Weekends:                 7u-23u

## 3.2. Aannames

### 3.2.1. Aankooprijks stroom en gas

De WKK zal normaal te weinig warmte en stroom produceren om te voldoen aan de volledige vraag gedurende een jaar. Dit verschil in warmte en/of stroom moet aangekocht worden aan een bepaalde prijs. Voor de aankooprijks worden cijfers van de VREG gebruikt voor een gezin dat een gemiddeld verbruik heeft. De mazoutprijs wordt vastgelegd op 0,6647 euro per liter. Dit is gebaseerd op de prijs die op de site van *Informazout* staat.

<b>Aankooptarieven [€]</b>	
Tarief elektriciteit :	0,2 per kWh
Tarief aardgas :	0,07 per kWh
Tarief stookolie :	0,082 per kWh

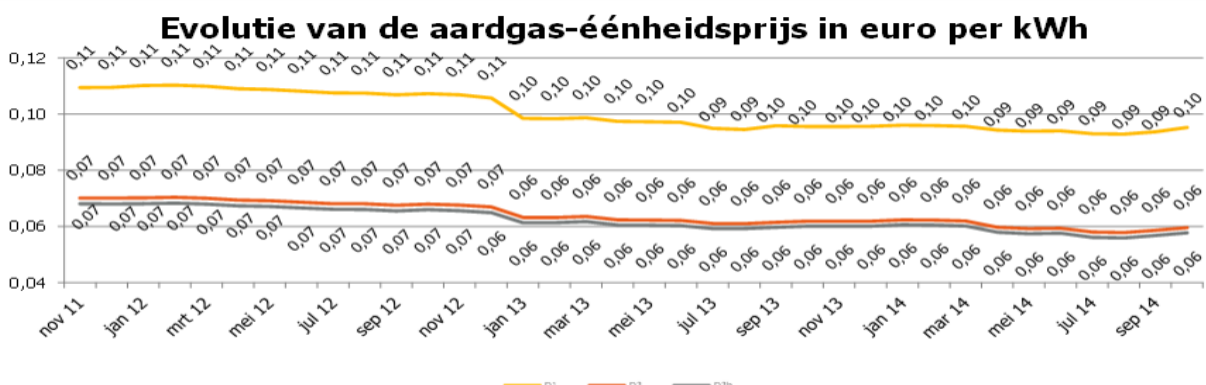


Figuur 50 : Gemiddelde elektriciteitsprijs per kWh (VREG)

Voor elektriciteit zijn er verschillende lijnen :

- laag verbruik (Da – 600 kWh enkelvoudig verbruik op jaarbasis, 1 persoon),
- een gemiddeld verbruik (Dc – 1.600 kWh dagverbruik en 1.900 kWh nachtverbruik op jaarbasis, 3 personen)
- een hoog verbruik (De – 3.600 kWh dagverbruik, 3.900 kWh nachtverbruik en 12.500 kWh uitsluitend nachtverbruik op jaarbasis, 4 personen)

De prijs voor een gemiddeld verbruik is volgens de VREG 18 eurocent per kWh, in de verdere berekeningen wordt 20 eurocent per kWh aangenomen.



Figuur 51 : Gemiddelde aardgasprijs per kWh (VREG)

Voor aardgas zijn er dezelfde categorieën, maar hebben ze de benaming

- D1 (laag verbruik – 2.326 kWh op jaarbasis),
- D3 (gemiddeld verbruik – 23.260 kWh op jaarbasis)
- D3b (hoog verbruik – 34.890 kWh op jaarbasis)

Het gemiddelde verbruik ligt hier op 23260 kWh per jaar. In Vlaanderen ligt het gemiddelde aardgasverbruik echter iets lager waardoor verder gerekend wordt met een tarief van 7 eurocent per kWh.

### 3.2.2. Prijsstijging stroom en gas

In de toekomst wordt verwacht dat de energieprijzen enkel nog maar zullen stijgen in België. Het federaal planbureau (FPB) maakte in 2014 een studie naar de afgelegde evolutie van de prijzen voor aardgas en elektriciteit in België en de omliggende buurlanden Nederland, Frankrijk en Duitsland onder de naam *De prijs van elektriciteit en aardgas voor ondernemingen in België*.

In de studie staat te lezen dat voor de huishoudelijke markt de elektriciteitsprijs tijdens het eerste semester van 2014 gemiddeld op 21 eurocent per kWh lag. Dit is dus in overeenstemming met de gemiddelde prijs die de VREG geeft voor de residentiële markt. Ten opzichte van de buurlanden heeft België dus een hoge elektriciteitsprijs daar enkel Duitsland een hogere gemiddelde prijs heeft.

	Huishoudelijk*	gwh/jr:	<0,02	0,02 - 0,5	0,5 - 2	2 - 20	20 - 70	70 - 150
België	21,0		17,9	14,5	10,9	9,6	7,7	6,8
Duitsland	29,8		22,6	18,7	15,9	13,8	11,6	10,6
Frankrijk	15,9		13,3	11,4	10,0	8,6	7,5	6,8
Nederland**	18,7		16,2	14,6	10,4	9,4	8,0	7,8

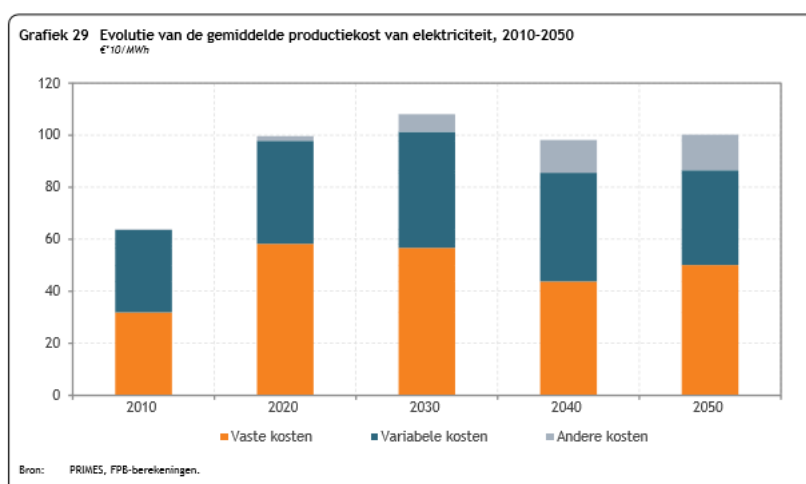
Figuur 52: Gemiddelde prijs van elektriciteit per gebruikersinterval in eurocent per kWh

	gwh/jr:	<0,02	0,02 - 0,5	0,5 - 2	2 - 20	20 - 70	70 - 150	Gemiddeld*
België		3,5%	3,1%	2,2%	2,0%	0,8%	1,6%	2,2%
Duitsland		3,9%	6,7%	7,1%	6,7%	5,2%	4,0%	5,6%
Frankrijk		3,5%	6,8%	8,9%	7,7%	4,9%	4,2%	6,0%
Nederland**		1,9%	2,7%	0,3%	1,1%	0,2%	1,5%	1,3%

Figuur 53: gemiddelde prijsstijging van elektriciteit per jaar per gebruikersinterval tussen 2007 en 2014

Tijdens de laatste 7 jaar valt een stijging van de elektriciteitsprijs op te merken in elk van de onderzochte landen. In België steeg deze gemiddeld 3,5 % per jaar voor de residentiële markt. Een percentage wat ook in de buurlanden voorkomt.

In een andere studie die FPB maakte in oktober 2014 *'Het Belgische energiesysteem in 2050 : Waar naartoe?'* worden voorspellingen gemaakt voor de energiemarkt in België. Er wordt uitgegaan van een scenario waar de kerncentrales sluiten in 2020 en uiteindelijk de hoofdbrok van de productiecapaciteit in 2050 zal bestaan uit enerzijds hernieuwbare energiebronnen en anderzijds uit regelbare aardgascentrales. De productiekost van elektriciteit zal sterk stijgen met 70% tot 2030 en daarna zwak dalen tot 2050 (zie Figuur 54).



Figuur 54 : totale prijsstijging in de toekomst



De productiekosten nemen ongeveer 40% in van de uiteindelijke prijs die de consument moet betalen. Ook netwerkkosten en de taksen opgelegd door de overheid maken deel uit van de uiteindelijk aankoopprijs voor de consument. In deze thesis wordt verondersteld dat ook de netwerkkosten zullen stijgen aangezien de netwerkbeheerders de reeds gemaakte kosten voor het opkopen van de groenestroomcertificaten tijdens de boom van de zonnepanelen mogen doorrekenen van de VREG. Het stijgingspercentage van 3,5% tussen 2007 en 2014 wordt omgevoerd tot een percentage van 3% voor de toekomst.

	gwh/jr:	<0,02	0,02 - 0,5	0,5 - 2	2 - 20	20 - 70	70 - 150
<i>Energiecomponent</i>							
België		7,1	6,3	6,0	5,8	5,7	5,8
Duitsland		9,9	6,9	6,1	5,6	5,2	4,9
Frankrijk		7,3	5,7	5,0	4,4	4,3	4,4
Nederland		7,7	6,7	6,0	5,7	5,5	5,6
<i>Netwerkkosten</i>							
België		8,8	6,1	3,1	2,5	1,5	0,9
Duitsland		7,9	4,3	3,0	2,4	1,8	1,3
Frankrijk		4,1	3,2	1,6	1,4	1,4	0,9
Nederland		4,1	3,1	2,3	1,8	1,6	1,3
<i>Heffingen</i>							
België		1,9	1,9	1,8	1,7	1,2	0,7
Duitsland		6,8	5,6	5,4	4,8	4,2	3,5
Frankrijk		2,6	2,2	1,9	1,6	1,2	0,2
Nederland		0,1	2,2	1,1	0,9	0,3	0,1

Bron: Eurostat

Figuur 55 : Prijscomponenten elektriciteit in eurocent per kWh

In de studie die de prijsevoluties van de afgelopen 7 jaar analyseert, worden ook de aardgasprijzen besproken. Tijdens het eerste semester van 2014 lag de aardgasprijs gemiddeld op 7 cent per kWh, wat overeenkomt met de cijfers die gebruikt zijn uit de publicatie van de VREG. De stijging van de aardgasprijs gedurende de laatste 7 jaar was gemiddeld 4% per jaar.

	Huishoudelijk*	gwh/jr:	<0,3	0,3 - 2,8	2,8 - 28	28 - 278	278 - 1 111	>1 111
België	6,6		5,1	4,0	3,2	2,8	2,6	2,4
Duitsland	6,8		5,0	4,9	4,5	3,5	3,1	3,0
Frankrijk	7,0		5,6	4,9	3,9	3,1	3,0	:
Nederland**	7,8		6,2	5,8	4,3	3,4	2,9	:

Bron: Eurostat  
 \*) Interval 6 - 56 mwh/jr, btw inbegrepen \*\*) Voorlopige data

Figuur 56: gemiddelde prijs voor aardgas per gebruikersinterval in 2014 in eurocent per kWh

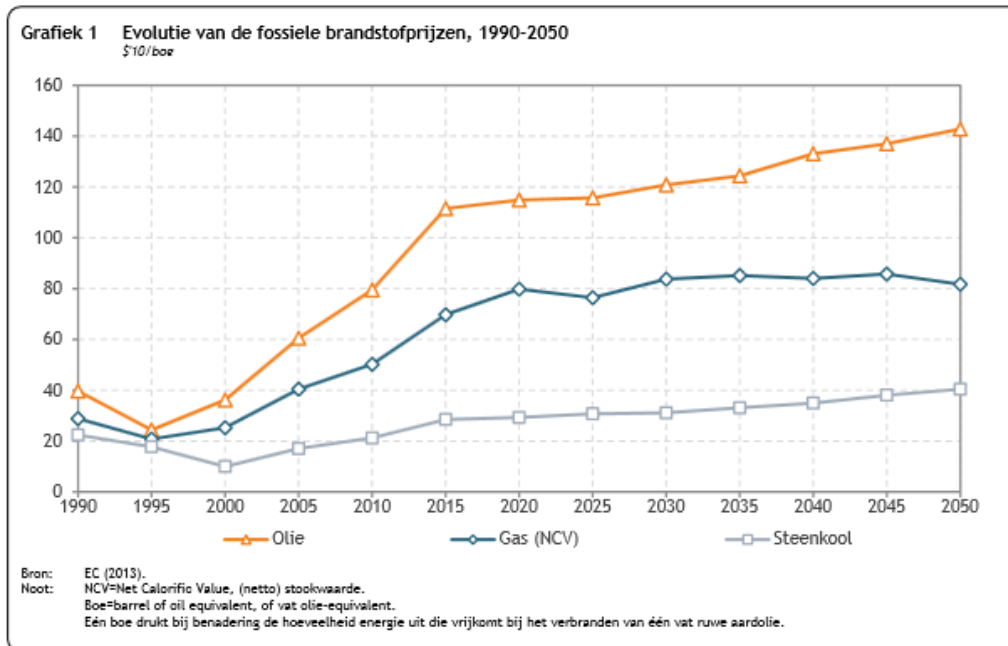
	gwh/jr:	<0,3	0,3 - 2,8	2,8 - 28	28 - 278	278 - 1 111	Gemiddeld*
België		4,0%	2,2%	1,7%	1,0%	0,2%	1,8%
Duitsland		1,3%	2,8%	2,3%	2,8%	2,9%	2,2%
Frankrijk		4,7%	5,5%	3,8%	2,0%	2,5%	3,7%
Nederland**		1,8%	2,2%	3,1%	2,8%	2,0%	2,4%
<i>Ongewogen gemiddelde</i>		3,0%	3,1%	2,7%	1,9%	1,9%	

Bron: Eurostat  
 \*) Ongewogen gemiddelde over de vijf gebruiksintervallen \*\*) Gebaseerd op voorlopige data voor 2014/51

Figuur 57: prijsstijging van aardgas per gebruikersinterval per jaar tussen 2007 en 2014

In de studie die voorspellingen doet tot 2050 wordt uitgegaan van een scenario waar schaliegas op grote schaal geëxploiteerd kan worden. Hierdoor stijgt de prijs nog tot 2030 maar daarna stabiliseert

ze. Als stijgingspercentage gedurende de komende 20 jaar wordt dan ook 1% gebruikt bij de berekening van de toekomstige cash flows.



*Figuur 58: prijsstijging van aardgas in de toekomst*

Samengevat kan uit de studies geconcludeerd worden dat de elektriciteitsprijs de komende jaren sterker zal stijgen dan de aardgasprijs. Dit kan enkel in het voordeel spelen van WKK.

### 3.2.3. Disconteringsvoet

Discontering wordt gebruikt om de kost en opbrengst van verschillende investeringen, zoals in energiebesparende maatregelen, vergelijkbaar te maken. Dit is nodig omdat de gemaakte investeringskost en opbrengsten niet op hetzelfde moment komen, waardoor hun huidige (de 'contante') waarde verschillend is. De disconteringsvoet is een indicatie voor de extra 'kosten' die een investering moet dekken. Het is een percentage waarmee toekomstige kosten en baten van een investering in feite afgewaardeerd worden om ze zo in huidige waarde uit te drukken. Dit is nodig vanwege een aantal omstandigheden:

- Kapitaalkosten: voor een investering moet vaak vermogen gebruikt worden waarvoor kapitaalkosten worden gemaakt (dividend op eigen vermogen, te betalen rente op leningen).
- Opportuïteitskosten: het geld van een investering kan ook opbrengsten opleveren als het voor het beste investeringsalternatief gebruikt wordt, dit zijn de opportuïteitskosten.
- Algemeen risico-opslag: de realisatie van kosten en baten in de toekomst is per definitie onzeker, zodat de investeerder daar een extra vergoeding voor wil.

In het verleden werd voor de NPV-bepaling van zonnepaneelinstallaties 5% gebruikt. Gezien de lage inflatie en rente op een spaarboekje in België wordt in deze thesis een percentage van 4% genomen. Dit percentage wordt ook in verschillende andere studies naar CO<sub>2</sub>-besparende maatregelen teruggevonden (*Schepers, 2010*) en zal ook hier gebruikt worden om verderop de NPV te bepalen per toestel.

#### **3.2.4. Prijs warmtekrachtcertificaten**

Iedere elektriciteitsleverancier in Vlaanderen moet jaarlijks een aandeel aan (primaire) energie besparen via kwalitatieve WKK. In 2015 bedroeg dit minimum 10,5% van de aan de eindafnemers geleverde elektriciteit. Om aan deze verplichting te voldoen, kunnen elektriciteitsleveranciers zelf primaire energie besparen door gebruik te maken van kwalitatieve warmtekrachtinstallaties en daarvoor WKC aan te vragen bij de VREG of door WKC's aan te kopen op de markt. De gemiddelde marktwaarde van een WKC bedraagt voorlopig 31 euro in 2015.

Indien de elektriciteitsleverancier niet voldoende WKC heeft ingeleverd bij de VREG, moet hij een administratieve boete betalen voor ieder ontbrekend certificaat. Deze administratieve boete bedraagt 41 euro per ontbrekend certificaat voor de warmtekrachtcertificaten die moeten worden ingeleverd tot en met 31 maart 2015. Voor alle warmtekrachtcertificatenverplichtingen na 31 maart 2015 bedraagt de boete 38 euro.

### 3.3. Cashflowberekening van de micro-WKK's

#### 3.3.1. Vereenvoudigde cashflowberekening

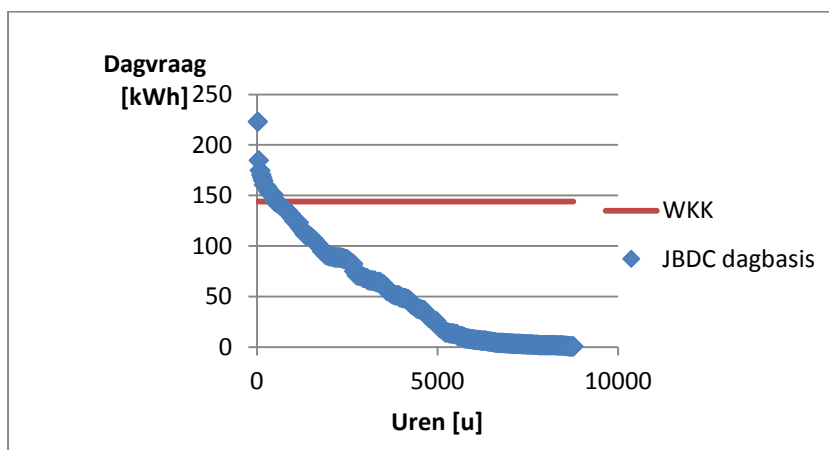
##### 3.3.1.1. Werkwijze

Bij de vereenvoudigde simulatie wordt de omvorming van dagverbruiken naar uurwaarden niet toegepast.

Een jaarbelastingduurcurve wordt opgesteld met de thermische dagvraag in kWh. Deze curve zet de vraag van elke dag (in kWh) uit van groot naar klein. Hierop wordt de thermische energie geplaatst die de WKK kan leveren gedurende 24 uur. Zo wordt een constante lijn geplaatst op de dagverbruiken.

Waar de thermische vraag groter is dan de maximale thermisch energie die de WKK kan leveren op dagbasis moet bijgesprongen worden door de piekbrander. Als de WKK gedurende een volledig etmaal meer warmte kan leveren dan er gevraagd wordt, is de veronderstelling gemaakt dat de piekbrander niet moet bijspringen en de WKK de volledige vraag aankan op elk moment door gebruik te maken van een gepast buffervat.

In dit scenario moet er dus een buffervat zijn dat de piekbrander overbodig maakt bij lage thermische dagvraag. Het buffervat moet ten alle tijde in staat zijn om, in combinatie met de WKK, de piekvraag te kunnen leveren. In de praktijk wordt er bij ontwerpberekeningen immers ook voor gezorgd dat het buffervat groot genoeg is om zoveel mogelijk draaiuren te verzekeren.



Figuur 59 : Voorbeeld vereenvoudigde methode Stirling 1

Hierna worden de draaiuren bepaald. Waar de thermische vraag groter is dan de energie die de WKK kan leveren gedurende een etmaal, draait de WKK de volle 24 uur en levert de piekbrander de rest van de warmtevraag. Is de thermische vraag van een dag bijvoorbeeld maar een vierde van de maximale energie die de WKK kan leveren gedurende 24 uur dan zal de WKK verondersteld worden maar 6 uur te werken die dag. De som van deze draaiuren per dag maakt dan het aantal draaiuren per jaar.

### 3.3.1.2. Cashflowberekening vereenvoudigde methode

Aan de hand van het aantal draaiuren kan de warmte en elektriciteit berekend worden die de WKK plaatselijk produceert en dus niet meer aangekocht moet worden. Hiermee kan de uitgespaarde primaire energie berekend worden en de hoeveelheid warmtekrachtcertificaten waar de installatie recht op heeft.

Cashflow Jaar 1						
Vermeden kost	Aankoop stroom	Aankoop gas piekbrander	Aankoop aardgas voor WKK	Opbrengst WKC	Onderhoud	Totaal [€]
2457,161995	-510,5008667	-29,98757222	-1597,01	93	-77,5	335,1626333

Figuur 60 : Voorbeeld vereenvoudigde cashflow STIRLING 1

De vermeden kost is de prijs die met de vorige installatie betaald werd voor de gescheiden aankoop van stroom en gas. Deze kost wordt vervangen door de stroom en warmte die de WKK produceert plus eventuele tekorten die nog altijd gescheiden moeten aangekocht worden.

Afhankelijk van het elektriciteitsverbruik moet er op jaarbasis stroom aangekocht worden ondanks de elektrische productie van de WKK. Dit is vertegenwoordigd door de post 'Aankoop stroom'. Indien er meer stroom opgewekt wordt dan er lokaal verbruikt wordt op jaarbasis dan is deze post gelijk aan nul.

Het gas dat de piekbrander (met verondersteld rendement van 90%) nodig heeft om bij te springen bij grote warmtevraag moet aangekocht worden en is een kost die ook elk jaar gemaakt moet worden. Dit is vertegenwoordigd door de post 'Aankoop gas piekbrander'.

Wanneer een micro-WKK geplaatst wordt zal meer aardgas verbruikt worden dan voorheen. Al het gas dat aangekocht moet worden is een kost die moet gemaakt worden onder de noemer 'Aankoop aardgas voor WKK'.

De WKK zorgt voor een primaire energiebesparing die recht geeft op WKC die verkocht worden aan de minimum gegarandeerde prijs van 31 euro per certificaat. De bandingfactor voor de certificaten is bepaald op 1, dus voor elke MWh primaire energiebesparing wordt 1 certificaat uitgereikt en dit wordt maandelijks bepaald. Wanneer er binnen een maand net niet genoeg primaire energiebesparing gebeurd is om een certificaat te kunnen bemachtigen dan wordt de reeds verwezenlijkte besparing doorgeschoven naar de volgende maand.

Een klassieke condensatietketel op aardgas moet bij wet minstens om de twee jaar onderhouden worden waardoor WKK's die ook maar om de twee jaar (of meer) onderhouden moeten worden geen meerprijs worden aangerekend voor onderhoud. Een onderhoud om de 2 jaar van een condensatietketel wordt op 125 euro geschat. Als de WKK's jaarlijks moeten onderhouden worden en de kost hiervoor ligt hoger dan 62,5 euro, wordt deze meerkost per jaar aangerekend.

### 3.3.2. Gedetailleerde simulatie

#### 3.3.2.1. Werkwijze

Bij deze simulatie wordt de omvorming van dagverbruiken naar uurwaarden wel toegepast. Gedurende de dag zullen er piekmomenten zijn in de warmtevraag waarvoor de WKK niet volledig kan instaan. In sommige gevallen kan het tekort aan geproduceerde warmte uit het buffervat getrokken worden en in andere gevallen, bij zeer grote vraag, zal ook dit niet voldoende zijn en moet de piekbrander bijspringen.

De functie van een correct gedimensioneerd buffervat is het frequent opstarten en uitschakelen van de WKK bij kleine warmtevraag te voorkomen. Er wordt bij de berekening uitgegaan van een 90/70 verwarmingsregime waarbij een buffervat van 300 liter bijgevolg maximaal 7 kWh energie kan opslaan. Deze energie wordt eerst aangesproken bij kleine warmtevraag. Bijgevolg zal de temperatuur in het vat hierdoor dalen.

Om niet telkens de opgeslagen energie in het buffervat volledig op te gebruiken bij opeenvolgende uren van kleine warmtevraag, wordt gesimuleerd dat de WKK terug in werking treedt wanneer de temperatuur in het buffervat daalt tot 80°C. De WKK kan op deze manier minstens 3,5 kWh aan warmte in het buffervat opslaan en voor de meeste micro-WKK's in deze studie betekent dat een productietijd van meer dan 30 minuten. Op deze manier blijft de energie in het vat voldoende hoog om significant bij te kunnen springen wanneer een zeer grote warmtevraag voorkomt.

Concreet zal de energie in het buffervat dus aangesproken worden vanaf het moment dat er genoeg in zit om te voldoen aan de warmtevraag. Zakt de temperatuur hierdoor echter tot onder de 80°C dan zal de WKK terug werken totdat de temperatuur in het buffervat weer gestegen is tot boven de 80°C. Is de warmtevraag groter dan de energie die de WKK kan leveren samen met de warmte die in het buffervat zit, dan springt die piekbrander bij om aan de vraag te kunnen voldoen.

#### 3.3.2.2. Cashflowberekening gedetailleerde berekening

Dezelfde aankooprijzen worden gehanteerd als bij de vereenvoudigde methode. Het verschil tussen beide methodes zit in het feit dat bij de gedetailleerde methode er ook piekvragen zijn bij de dagen met laag totaal dagverbruik die er voor kunnen zorgen dat piekbrander moet aanslaan. Iets waar in de vereenvoudigde berekening geen rekening mee gehouden werd.

<u>Cashflow Jaar 1</u>						
Vermeden kost	Aankoop stroom	Aankoop gas piekbrander	Aankoop aardgas voor WKK	Opbrengst WKC	Onderhoud	Totaal [€]
2457,161995	-553,325458	-129,9116187	-1513,114423	93	-77,5	276,3104956

*Figuur 61 : Voorbeeld gedetailleerde cashflow STIRLING 1*

In de gedetailleerde cashflow is dan ook een hogere prijs voor de aankoop van gas voor de piekbrander te zien en een hogere prijs voor de aankoop van elektriciteit aangezien de WKK minder draaiuren heeft.

### 3.3.3. Resultaten simulaties

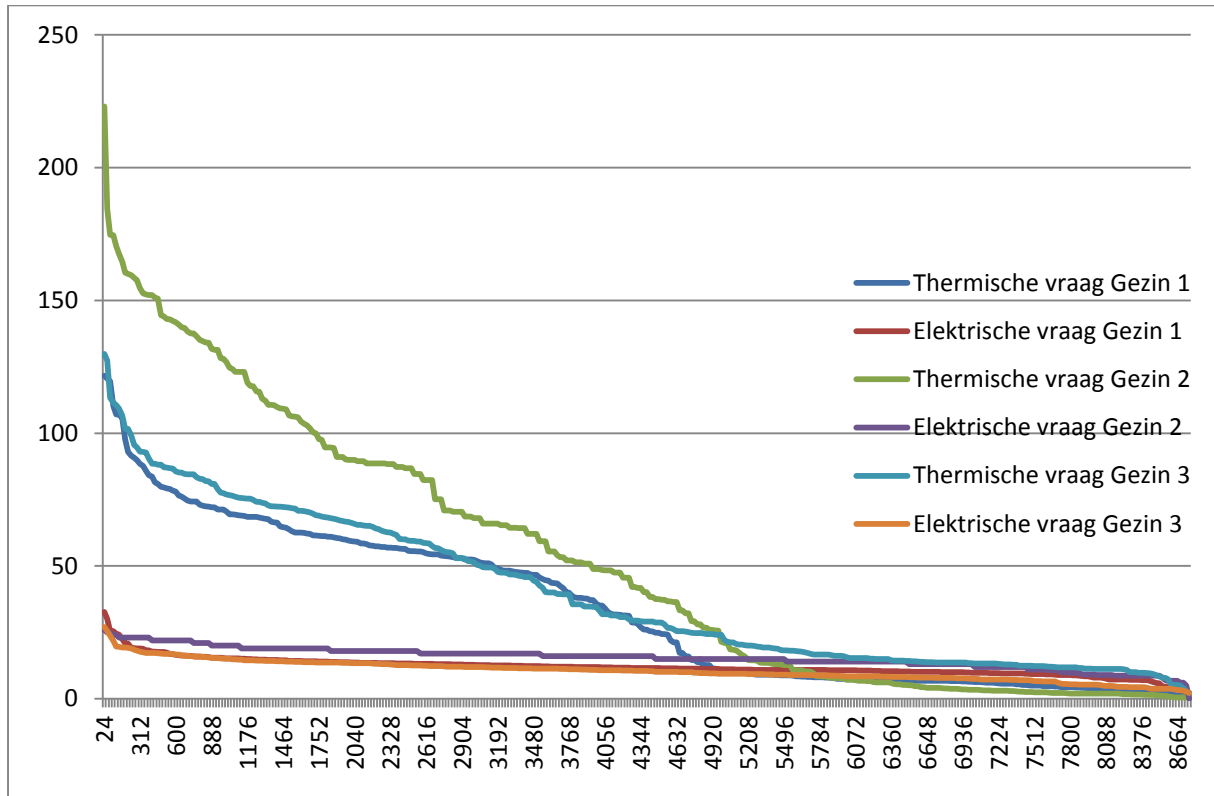
#### 3.3.3.1. Cashflow

In wat volgt zijn de resultaten te zien van de vereenvoudigde cashflowberekening. De cashflows van de gedetailleerde berekening liggen voor alle toestellen iets lager en resulteren in iets langere simple payback times.

Tabel 51: Cashflows in Vlaams WKC-systeem

Productnaam	Cashflow gezin 1 [€]	Cashflow gezin 2[€]	Cashflow gezin 3 [€]
ICE 1	526,1	509,6	354,0
ICE 2	526,1	509,6	354,0
Stirling 1	199,8	351,6	236,1
Stirling 2	176,3	286,9	208,3
Stirling 3	297,2	475,8	349,7
Stirling 4	232,6	384,3	274,4
Stirling 5	250,1	434,4	294,9
Stirling 6	113,5	236,4	135,4
PEMFC 1	270,0	474,9	58,0
PEMFC 2	190,8	386,4	-55,0
PEMFC 3	231,4	416,3	11,7
PEMFC 4	291,4	515,5	62,7
PEMFC 5	327,3	503,9	131,0
PEMFC 6	473,6	434,5	301,9
PEMFC 7	507,8	491,4	364,0
PEMFC 8	501,9	447,0	324,3
PEMFC 9	156,0	94,5	219,7
PEMFC 10	531,5	665,7	380,2
SOFC 1	452,7	429,9	261,9
SOFC 2	94,4	326,9	-191,1
SOFC 3	511,9	655,4	356,9
SOFC 4	379,8	485,0	80,9
SOFC 5	69,8	250,2	-143,8
SOFC 6	457,4	415,6	268,5
SOFC 7	457,4	415,6	268,5
ORC 1	-65,2	29,8	-54,8
ORC 2	98,0	211,1	117,2
ORC 3	90,9	75,3	18,5

Uit de bovenstaande cijfers voor de cashflows valt af te leiden dat de 3 gezinnen elk een verschillende elektrische en thermische vraag hebben, zowel op dagbasis als op jaarbasis (zie Figuur 62). Gezin 1 heeft een jaarlijkse elektrische vraag van 4365,5 kWh en thermische vraag van 12306 kWh. Gezin 2 heeft een elektrische vraag van 5648,75 kWh en thermische vraag van 18963 kWh. Gezin 3 heeft een elektrische vraag van 3864,8 kWh en thermische vraag van 14177 kWh.



Figuur 62: Verbruiken gezinnen uitgezet

Algemeen kan besloten worden dat voor gezin 3, dat een gemiddeld elektriciteitsverbruik en lage warmtevraag heeft, de technologieën met een kleine PHR minder aantrekkelijk zullen zijn. De toestellen die een thermisch vermogen hebben dat ongeveer dubbel zo groot is als het elektrisch vermogen zullen de grootste cashflows genereren.

Gezin 2 heeft een 'hoog' elektriciteitsverbruik en dit zal vooral bij de brandstofcellen tot grote cashflows leiden omdat dan de kost voor elektriciteit sterk gedrukt wordt. De thermische vraag (die op het gemiddelde Vlaams verbruik ligt) zorgt er mede voor dat brandstofcellen met een thermische vermogen groter dan 1 kW (vooral PEMFC 10 en SOFC 3) de grootste cashflows creëren. De karakteristieken van ICE 2 lenen zich ook zeer goed tot grote cashflows omdat het thermische vermogen van 2,5 kW ervoor zorgt dat ook de thermische vraag goed afgedekt wordt.

Gezin 1 heeft ook het meeste baat bij micro-WKK's met een PHR rond de 0,5, net zoals bij gezin 2. Het groter dan gemiddelde elektriciteitsverbruik zorgt er terug voor dat de brandstofcel uitgesproken het meest geschikt is. Daarnaast creëert de ICE 2 hier een grote cashflow door zijn goede verhouding tussen thermisch en elektrisch vermogen. Uit de cijfers valt af te leiden dat micro-WKK's die een PHR hebben die ligt tussen de 0,4 en 0,7 de grootste cashflows zullen hebben door de verhouding tussen de aardgasprijs en elektriciteitsprijs voor residentiële verbruikers.



### 3.3.3.2. SPB

Tabel 52: simple payback time in het huidige systeem

Productnaam	SPB gezin 1 [Jaar]	SPB gezin 2 [Jaar]	SPB gezin 3 [Jaar]
ICE 1	1,9	2,0	2,8
ICE 2	11,4	11,8	16,9
Stirling 1	20,0	11,4	16,9
Stirling 2	22,7	13,9	19,2
Stirling 3	8,1	5,0	6,9
Stirling 4	36,6	22,2	31,0
Stirling 5	/	/	/
Stirling 6	141,0	67,7	118,2
PEMFC 1	262,9	149,5	1223,1
PEMFC 2	372,2	183,7	-1290,7
PEMFC 3	/	/	/
PEMFC 4	/	/	/
PEMFC 5	216,9	140,9	541,9
PEMFC 6	28,5	31,1	44,7
PEMFC 7	17,4	18,0	24,3
PEMFC 8	16,9	18,9	26,1
PEMFC 9	76,9	127,0	54,6
PEMFC 10	/	/	/
SOFC 1	24,9	26,2	43,0
SOFC 2	257,0	74,2	-126,9
SOFC 3	35,2	27,5	50,4
SOFC 4	5,3	4,1	24,7
SOFC 5	/	/	/
SOFC 6	30,6	33,7	52,1
SOFC 7	/	/	/
ORC 1	-184,2	402,3	-219,1
ORC 2	5,1	2,4	4,3
ORC 3	/	/	/

De eenvoudige terugbetaaltijd is gelijk aan het investeringsbedrag gedeeld door de gegenereerde cashflow. Dit geeft een eerste indicatie over de termijn waarop de investering zichzelf terugbetaalt. Het bedrag dat terugverdiend moet worden, is de meerkost t.o.v. een nieuwe condensatieketel. Er wordt echter geen rekening gehouden met de tijdswaarde van geld en de eventuele prijsstijgingen in de toekomst. Niet alle fabrikanten hebben de prijs van hun micro-WKK meegedeeld waardoor niet van elk toestel een SPB bepaald kon worden.

Voor sommige toestellen worden negatieve cash flows bekomen. Dat is te verklaren via het feit dat de vermeden kost van de stroom die nu lokaal geproduceerd wordt niet opweegt tegen het verhoogde aardgasgebruik en de verhoogde onderhoudskost. Een micro-WKK zal dus zeker niet voor elk gezin een positief effect hebben op de energierekening.

Uit de resultaten valt af te leiden dat de meeste toestellen een zeer lange terugbetaaltijd hebben. Dit komt door de hoge investeringskost en in mindere mate door de beperkte cashflow die gehaald wordt. Enkel de toestellen die een aankoop prijs onder de 10 000 euro hebben, halen een aanvaardbare simpel terugverdiëntijd. De aankoop prijs van ICE 1 ligt laag omdat er door subsidies in het verleden zeer veel toestellen verkocht zijn geweest waardoor kostreducties konden gemaakt worden. De meerkost is amper 1000 euro en die wordt op minder dan 2 jaar tijd terugverdiend. Wanneer de terugverdiëntijd tot 7 jaar mag oplopen, kan de aankoop prijs ook stijgen tot iets onder 10000 euro. De 10000 euro grens moet zeker te bereiken zijn daar de ICE 2, die op dezelfde technologie draait, een tijd lang een actie deed waarmee de prijs gedrukt werd tot deze 10 000 euro.

De ORC 2 heeft een speciaal financieringsysteem dat het mogelijk maakt de toestellen goedkoper te verkopen. Dit is ook nodig want uit de simulaties blijkt dat maar eerder beperkte cash flows kunnen gegenereerd worden door het beperkte elektrische rendement.

Stirling 3 is een product dat al in verschillende landen wereldwijd verkocht wordt en dat in de toekomst misschien zijn prijs nog zal kunnen laten zakken ten gevolge van massaproductie. SOFC 4 zou ook een korte terugbetaaltermijn hebben maar de prijs die de fabrikant gaf, is een doel die men zich stelde in de ontwikkelingsfase en is dus nog geen aankoop prijs die in de praktijk gehanteerd wordt.

De toestellen die op het eerste zicht interessant leken door hun 'grote' gegenereerde cashflow hebben door hun aankoop prijs toch een grote terugbetaaltermijn. Brandstofcellen zijn momenteel nog in volle ontwikkeling met een hoge prijs tot gevolg. Momenteel zijn de Stirling 3 en ORC 2 de meest aantrekkelijke opties. ICE 1 is in het land van fabricage ook zeker interessant maar de prijs waaraan het toestel verkocht zou kunnen worden in België is moeilijk in te schatten.

De aankoop prijs lijkt vooralsnog nog altijd de belangrijkste factor voor de lengte van de terugbetalingstermijn te zijn en niet de grootte van de jaarlijkse cashflows. In Vlaanderen wordt er momenteel geen investeringssteun gegeven voor de aankoop van een micro-WKK maar in Brussel wel. Dit is dan ook één van de voorstellen die gemaakt worden om de terugbetalingstermijn te verkorten in Vlaanderen.

### 3.3.3.3. NPV

De netto contante waarde (NPV) van de toestellen wordt berekend over 10 jaar. De meeste fabrikanten kunnen namelijk maar een levensduur van 10 jaar garanderen. Moest de NPV berekend worden over een te verwachten levensduur van 15 jaar dan zou de situatie er rooskleuriger uitzien. In veel gevallen zou er echter nog altijd een negatieve NPV bekomen worden waardoor de investering nog altijd niet aan te raden zou zijn.

Tabel 53: NPV over 10 jaar in het huidige systeem

Productnaam	NPV gezin 1 [€]	NPV gezin 2[€]	NPV gezin 3 [€]
ICE 1	4299,0	4256,9	2724,2
ICE 2	-701,0	-681,1	-2275,8
Stirling 1	-1912,9	-1071,6	-1531,9
Stirling 2	-2006,4	-862,9	-1628,5
Stirling 3	605,7	2297,5	1101,5
Stirling 4	-5838,2	-4354,2	-5387,4
Stirling 5	/	/	/
Stirling 6	-14832,6	-13721,3	-14632,6
PEMFC 1	-67846,0	-65876,5	-69778,3
PEMFC 2	-68531,0	-66615,9	-70734,4
PEMFC 3	/	/	/
PEMFC 4	/	/	/
PEMFC 5	-67375,2	-65641,3	-69183,9
PEMFC 6	-8625,5	-8953,3	-10213,0
PEMFC 7	-3697,9	-3832,6	-5015,2
PEMFC 8	-3330,9	-3817,8	-4968,6
PEMFC 9	-10267,7	-10799,2	-9658,5
PEMFC 10	/	/	/
SOFC 1	-6579,8	-6758,3	-8025,4
SOFC 2	-22675,6	-20440,5	-25229,3
SOFC 3	-12814,9	-11419,8	-14255,4
SOFC 4	2065,5	3115,1	-967,0
SOFC 5	/	/	/
SOFC 6	-9291,7	-9621,4	-10996,2
SOFC 7	/	/	/
ORC 1	-12284,3	-11344,9	-12139,9
ORC 2	676,6	1815,7	905,8
ORC 3	/	/	/

Het vertrekpunt is hier dus de meerkost ten opzichte van de aankoop van een nieuwe condensatieketel. Dit negatieve startbedrag wordt vermeerderd met de (meestal) positieve cashflows die elk jaar gegenereerd worden. Deze toekomstige cashflows worden teruggerekend naar hun actuele waarde via de disconteringsvoet en opgeteld bij het negatieve startbedrag. Dit wordt voor de komende 10 jaar gedaan en wanneer de uitkomst positief blijkt te zijn dan is de investering de moeite waard om te maken.

In de simulatie met het huidige Vlaamse subsidiesysteem zouden maar 4 toestellen na 10 jaar de meerkost terugverdiend hebben. ICE 1 , Stirling 3, SOFC 4 en ORC 2

Het meest interessante toestel is de ICE 1. Door zijn beperkte aankoop prijs en 'grote' cash flow kan hij al tijdens de eerste jaren zijn meerprijs compenseren. De technologie is goed gekend dus onderhoud aan het toestel kan gemakkelijk verlopen. Door de goede grootte van het thermisch vermogen (2,5 kWt) worden veel draaiuren verzekerd wat ook veel opgewekte stroom met zich meebrengt. Voor gezinnen die met een grote elektriciteitsvraag zitten (>3500 kWh/jaar) kan dus veel bespaard worden op de elektriciteitsrekening terwijl ook een groot deel van de thermische vraag wordt afgedekt. Het enige nadeel dat het toestel heeft, is dat wel nog een gepast buffervat moet geïnstalleerd worden dat niet in de prijs zit inbegrepen.

Gezinnen die met een grote elektriciteitsvraag maar kleinere thermische vraag zitten, kunnen best een beroep doen op SOFC 4. Passiefhuizen treden hier dan natuurlijk op de voorgrond. Zowel het thermisch als elektrisch vermogen is beperkt wat ervoor zorgt dat de WKK bijna continue draait. Wanneer bijvoorbeeld meer dan 4000 draaiuren gemaakt worden, wordt in totaal meer dan 3000 kWh stroom geproduceerd. Als het elektrische verbruik van een gezin echter klein is, wordt al snel teveel stroom geproduceerd die niets meer opbrengt maar waarvoor wel extra aardgas moet gekocht worden. Zo zal voor gezin 3 dit toestel minder geschikt zijn.

Gezinnen met een grote thermische vraag zijn het best af met de Stirling 3. Het grotere thermische vermogen zorgt voor een goede dekking van de warmtebehoefte en een groot aantal draaiuren. De beperkte aankoop prijs in combinatie met een goede cashflow zorgt ervoor dat na 10 jaar het toestel zeker terugbetaald is. Dit is dan ook te zien bij gezin 2.

## 3.4. Voorstellen om tot kortere SPB-termijnen te komen

### 3.4.1. Brusselse systeem voor certificaten overnemen

In het Brusselse systeem wordt er met groenestroomcertificaten gewerkt ook al draait de micro-WKK niet op biobrandstof. Er wordt namelijk gewerkt met vermeden CO<sub>2</sub>-uitstoot die gepaard gaat met de elektriciteitsproductie van de micro-WKK. Daarnaast is er ook een investeringsteun te bekomen, mede omdat er aangepaste meters vereist zijn om in aanmerking te komen voor de groenestroomcertificaten. Deze investeringsteun is gelijk aan 3500 euro vermenigvuldigd met de vierkantswortel van het elektrisch vermogen. De te installeren meters kosten echter ook 1000 euro waardoor de effectieve investeringsteun het verschil is van deze twee waarden.

Tabel 54: Cashflows in Brussels WKC-systeem

Productnaam	Cashflow gezin 1 [€]	Cashflow gezin 2 [€]	Cashflow gezin 3 [€]
ICE 1	706,0	707,0	554,5
ICE 2	706,0	707,0	554,5
Stirling 1	328,6	532,5	383,3
Stirling 2	273,7	418,5	318,7
Stirling 3	464,5	709,8	541,8
Stirling 4	373,6	592,2	435,8
Stirling 5	402,0	638,0	469,0
Stirling 6	251,8	356,4	293,7
PEMFC 1	390,5	581,6	198,9
PEMFC 2	289,1	487,7	62,2
PEMFC 3	331,7	520,8	128,3
PEMFC 4	454,0	657,4	261,9
PEMFC 5	472,2	651,2	299,7
PEMFC 6	571,4	531,0	365,1
PEMFC 7	618,7	724,1	460,7
PEMFC 8	594,2	542,8	370,9
PEMFC 9	152,7	94,1	214,1
PEMFC 10	761,0	895,6	640,5
SOFC 1	535,4	505,4	385,6
SOFC 2	632,4	1058,3	485,5
SOFC 3	734,2	872,5	609,9
SOFC 4	490,7	595,6	243,8
SOFC 5	1560,3	1825,2	1549,2
SOFC 6	538,1	487,1	365,8
SOFC 7	538,1	487,1	365,8
ORC 1	85,3	232,9	117,7
ORC 2	189,3	331,7	220,7
ORC 3	211,8	248,9	156,5

Tabel 55 : Toename Cashflow Brussel t.o.v. Vlaanderen

Productnaam	Toename gezin 1 [%]	Toename gezin 2 [%]	Toename gezin 3 [%]
ICE 1	34,2	56,6	38,7
ICE 2	34,2	56,6	38,7
Stirling 1	64,5	62,3	51,5
Stirling 2	55,2	53,0	45,8
Stirling 3	56,3	54,9	49,2
Stirling 4	60,6	58,8	54,1
Stirling 5	60,7	59,1	46,9
Stirling 6	121,9	116,9	50,8
PEMFC 1	44,6	242,7	22,5
PEMFC 2	51,6	213,0	26,2
PEMFC 3	43,3	995,5	25,1
PEMFC 4	55,8	317,6	27,5
PEMFC 5	44,3	128,8	29,2
PEMFC 6	20,7	20,9	22,2
PEMFC 7	21,8	26,6	47,3
PEMFC 8	18,4	14,4	21,4
PEMFC 9	-2,1	-2,5	-0,5
PEMFC 10	43,2	68,5	34,5
SOFC 1	18,3	47,2	17,6
SOFC 2	570,2	354,0	223,7
SOFC 3	43,4	70,9	33,1
SOFC 4	29,2	201,6	22,8
SOFC 5	2136,9	1177,4	629,5
SOFC 6	17,6	36,2	17,2
SOFC 7	17,6	36,2	17,2
ORC 1	230,9	314,9	680,8
ORC 2	93,3	88,3	57,2
ORC 3	133,0	744,8	230,7

De berekening van de Brusselse certificaten is gebaseerd op de CO<sub>2</sub>-uitstoot die vermeden wordt bij de elektriciteitsproductie van de WKK. Per MWh stroom die de WKK produceert wordt ook een bepaalde hoeveelheid warmte geproduceerd. Er wordt uitgerekend hoeveel energiebesparing deze cogeneratie oplevert ten opzicht van een referentiescenario van gescheiden productie met een elektrisch rendement van 55% en thermisch rendement van 90%. Zo wordt per MWh elektriciteit uitgerekend hoeveel kg CO<sub>2</sub> bespaard wordt. Per besparing van 217 kg CO<sub>2</sub> wordt 1 certificaat uitgereikt dat momenteel een waarde heeft van 84 euro. Er is een bovengrens bepaald van 2 certificaten die toegekend mogen worden per MWh stroom die opgewekt wordt. Door de verplichte meters te installeren kan makkelijk bepaald worden hoeveel certificaten elke maand moeten uitgereikt worden. De enige vereiste is dat de relatieve besparing per MWh stroom  $\left(\frac{Uitstoot_{ref}-Uitstoot_{WKK}}{Uitstoot_{ref}}\right)$  groter moet zijn dan 5%.

Dit systeem van certificaten levert voor nagenoeg alle micro-WKK's een grotere cashflow en kortere SPB op. In combinatie met de investeringsteun worden sommige modellen wel de moeite waard om aan te kopen als gekeken wordt naar de NPV na 10 jaar. Zo zijn er in het Vlaamse systeem maar 4 toestellen met een positieve NPV na 10 jaar terwijl dit in het Brusselse systeem al gestegen is naar 7 toestellen.

*Tabel 56: NPV na 10 jaar in het Brusselse systeem*

<b>Productnaam</b>	<b>NPV gezin 1 [€]</b>	<b>NPV gezin 2[€]</b>	<b>NPV gezin 3 [€]</b>
ICE 1	8247,8	8368,2	7851,6
ICE 2	3247,8	3368,2	2851,6
Stirling 1	1644,2	3541,4	2162,5
Stirling 2	1272,6	2686,1	1723,7
Stirling 3	4428,9	6677,2	6076,7
Stirling 4	-2209,7	-186,4	-1625,1
Stirling 5	/	/	/
Stirling 6	-11234,3	-6578,4	-10863,1
PEMFC 1	-64397,6	-62529,4	-64394,7
PEMFC 2	-65250,0	-63312,8	-64005,4
PEMFC 3	/	/	/
PEMFC 4	/	/	/
PEMFC 5	-63716,1	-61964,6	-63831,8
PEMFC 6	-5823,8	-6157,3	-5208,7
PEMFC 7	-786,7	376,7	-477,4
PEMFC 8	-691,7	-1130,8	-4756,5
PEMFC 9	-9395,0	-9903,8	-9646,4
PEMFC 10	/	/	/
SOFC 1	-3997,9	-4235,7	-3689,2
SOFC 2	-15032,5	-11239,7	-16469,4
SOFC 3	-8529,7	-7176,6	-9709,9
SOFC 4	5083,0	6124,8	3822,9
SOFC 5	/	/	/
SOFC 6	-6695,9	-5559,5	-6442,1
SOFC 7	/	/	/
ORC 1	-7765,1	-6429,4	-6465,1
ORC 2	3917,2	5276,4	5229,9
ORC 3	/	/	/

### 3.4.2. Vaste investeringssteun toekennen

In de omliggende buurlanden worden wel subsidies toegekend om de hoge aankoop prijs te helpen verlagen. Zo is er in Duitsland het 'mini-KWK impulsprogram' dat micro-WKK's tot 20 kW wil stimuleren. Er is een basissubsidie voorzien van 1900 euro voor toestellen met een elektrisch vermogen tot 1kW (BAFA, 2015) en hier komt 300 euro bij voor elektrische vermogens tot 4 kW. Indien er ook nog eens condenserend gewerkt wordt in de micro-WKK is er een bijkomende subsidie die oploopt tot een vierde van de basissubsidie. Om micro-WKK's met grote elektrische rendementen extra te stimuleren, krijgen systemen met elektrische rendementen hoger dan 31% (in de klasse tot 1 kWe) een extra subsidie die gaat tot 60% van de basissubsidie. Zodoende krijgt elk toestel die opgenomen is in deze thesis zeker minstens 1900 euro steun, en meestal meer dan 2345 euro. Ook in Nederland, in de provincie Gelderland, kent men al een steun toe van 2000 euro aan 1 type stirling-WKK. In de onderstaande tabel is de SPB berekend wanneer een vaste investeringsteun van 2000 euro wordt toegekend onafhankelijk van de technologie of productspecificaties.

Tabel 57: Simple Payback Time met investeringssteun van 2000 euro

Productnaam	SPB gezin 1 [Jaar]	SPB gezin 2 [Jaar]	SPB gezin 3 [Jaar]
ICE 1	0,0	0,0	0,0
ICE 2	7,6	7,8	11,3
Stirling 1	10,0	5,7	8,5
Stirling 2	11,3	7,0	9,6
Stirling 3	1,3	0,8	1,1
Stirling 4	28,0	17,0	23,8
Stirling 5	/	/	/
Stirling 6	123,3	59,2	103,4
PEMFC 1	255,5	145,3	1188,7
PEMFC 2	361,7	178,6	1254,4
PEMFC 3	/	/	/
PEMFC 4	/	/	/
PEMFC 5	210,8	136,9	526,7
PEMFC 6	24,3	26,5	38,1
PEMFC 7	13,5	13,9	18,8
PEMFC 8	12,9	14,5	19,9
PEMFC 9	64,1	105,8	45,5
PEMFC 10	/	/	/
SOFC 1	20,5	21,6	35,4
SOFC 2	235,8	68,1	116,4
SOFC 3	31,3	24,4	44,8
SOFC 4	0,0	0,0	0,0
SOFC 5	/	/	/
SOFC 6	26,2	28,9	44,7
SOFC 7	/	/	/
ORC 1	153,5	335,3	182,6
ORC 2	0,0	0,0	0,0
ORC 3	/	/	/



### 3.4.3. Overtollige stroom laten opkopen door leveranciers

Als bij kleinschalige installaties de WKK meer elektriciteit opwekt dan er jaarlijks verbruikt wordt, is het voorlopig nog niet interessant om deze kleine hoeveelheden stroom te verkopen. Er moet dan vooreerst een teller geplaatst worden die productie en afname apart opmeet. Alle stroom die de WKK dan zou produceren wordt verkocht aan een lagere prijs dan de prijs die men betaalt voor de afname. De geproduceerde stroom is dus niet meer evenveel waard als de afgenomen stroom zoals het geval is bij een terugdraaiende teller.

Bij een scenario waar zoals bij een terugdraaiende teller de opgewekte stroom eerst het eigen verbruik compenseert en daarna de overgebleven stroom nog verkocht kan worden aan een tarief van bijvoorbeeld 4 eurocent per kWh zou ook deze teveel geproduceerde stroom nog een geldwaarde kunnen opleveren. Deze maatregel zou dan voornamelijk WKK's met grote PHR of groot aantal draaiuren bevoordelen. Dit systeem wordt in Groot-Brittannië toegepast via de 'Feed-In Tariff' waarbij eigenaars van micro-WKK ongeveer 18 eurocent krijgen per opgewekte kWh stroom en 6 eurocent per geëxporteerde kWh (*OfgemE-serve, 2015*).

Tabel 58: Toename cashflow door opkopen overtollige stroom

Productnaam	Toename Gezin1 [%]	Toename Gezin 2 [%]	Toename Gezin 3 [%]
ICE 1	0,5	0,0	12,8
ICE 2	0,5	0,0	12,8
Stirling 1	0,0	0,0	0,0
Stirling 2	0,0	0,0	0,0
Stirling 3	0,0	0,0	0,0
Stirling 4	0,0	0,0	0,0
Stirling 5	0,0	0,0	0,0
Stirling 6	0,0	0,0	0,0
PEMFC 1	16,0	0,0	184,6
PEMFC 2	29,7	2,3	239,3
PEMFC 3	18,7	0,0	915,0
PEMFC 4	22,1	2,9	232,1
PEMFC 5	12,1	0,0	76,3
PEMFC 6	0,0	0,0	61,2
PEMFC 7	0,0	0,0	43,4
PEMFC 8	0,3	0,0	76,3
PEMFC 9	0,0	0,0	69,2
PEMFC 10	4,5	0,0	19,2
SOFC 1	1,6	0,0	16,8
SOFC 2	231,3	48,5	179,6
SOFC 3	5,1	0,0	21,4
SOFC 4	9,2	0,0	219,3
SOFC 5	447,5	117,8	277,6
SOFC 6	0,3	0,0	25,6
SOFC 7	0,3	0,0	25,6
ORC 1	0,0	0,0	0,0
ORC 2	0,0	0,0	0,0
ORC 3	0,0	0,0	0,0

### 3.4.4. Alternatieve financieringsmogelijkheden

#### 3.4.4.1. Flow Energy: Flow Finance

##### 3.4.4.1.1. Hoe werkt het?

Key facts	
Finance your Flow boiler	The revolutionary Flow boiler costs £3675*
Sign a five year finance agreement with Zopa	A loan of £3675 over 5 years will cost you £75.5 per month. The APR is 8.9% The total cost after 5 years is £4529.89, which includes £674.89 interest at 6.7% fixed and a £180 fee. The total amount of credit is £3855. This is a representative example.
Pay for installation	A standard installation costs £1800* but every home is different and we'll provide a personalised quote for you following your home survey. You may be able to add the cost of installation to your loan too.
Switch your home energy to Flow on a competitive boiler tariff	You pay for all the gas and electricity used in your home, including any that comes from the Flow boiler
Assign Feed-in Tariff payments to Flow	The electricity from the Flow boiler is eligible for the Feed-in Tariff – a government scheme to reduce carbon emissions
Receive monthly discounts on your home energy bill of £80	We'll deliver this discount for five years. Over the five year period the total discount you'll receive will be £4800

Figuur 63: Key facts Flow finance

Om de klant te ontzien van de grote kost die de aankoop van de Flow Boiler vertegenwoordigt, wordt er bij Flow Finance een lening van 3675 pond aangegaan voor 5 jaar bij Zopa. Deze lening zal bestaan uit maandelijkse afbetalingen van 75,5 pond waardoor het totaal terugbetaald bedrag na 5 jaar 4529,89 pond zal bedragen.

Wanneer een Flow Boiler geïnstalleerd wordt onder het Flow Finance pakket, geeft Flow Energy een korting van 80 pond elke maand op de energierekening om de afbetaling bij de bank te compenseren. Over 5 jaar tijd maakt dit een korting van 4800 pond. Dit is meer dan de prijs van de lening die is aangegaan voor de aankoop van de boiler bij Zopa, echter zonder de installatie van de boiler. De installatie van de boiler kost standaard 1800 pond maar dit kan oplopen afhankelijk van het specifieke huis. Indien de klant dit wil kan voor de installatiekost opnieuw een lening aangegaan worden bij Zopa.

Per maand moet dus 75,5 pond afbetaald worden aan Zopa voor de lening (als enkel het aankoopbedrag geleend werd) maar krijg de klant een korting van 80 pond op de maandelijkse rekeningen van Flow Energy. Deze maandelijkse korting loopt even lang als de afbetalingen aan Zopa, namelijk 5 jaar. In ruil hiervoor moet de klant zich aansluiten bij Flow Energy voor minstens 5 jaar en hun tarieven aannemen. Flow Energy krijgt de stroom die de micro-WKK opwekt en ook de Feed-In tarieven die de overheid geeft voor de opwekking van stroom via de WKK gedurende de 5 jaar van het contract. Deze bedragen ongeveer 12 eurocent per kWh en zijn een maatregel van de overheid om de CO<sub>2</sub>-uitstoot te beperken.

Na afloop van de 5 jaar is de lening afbetaald en zullen de maandelijkse kortingen op de energierekening stoppen. Flow Energy blijft recht hebben op de helft van de Feed-In tarieven en op de helft van de gegenereerde stroom en de andere helft is 'winst' voor de klant.

Er is een garantie van 2 jaar voorzien voor de boiler en een gratis onderhoud het eerste jaar. Op de generator is een garantie voorzien van 2 jaar maar deze kan oplopen tot 10 jaar als de klant bij Flow Energy blijft na afloop van het 5-jarige contract. Wanneer overgeschakeld wordt naar Flow Energy zullen de prijzen vastgelegd worden voor het eerste jaar. Na dit eerste jaar wordt opnieuw een vaste prijs vastgelegd voor het komende jaar met de belofte dat ze goedkoper zal zijn dan het gemiddelde van de standaard variabele tarieven van de 6 grootste leveranciers in de UK.

#### 3.4.4.1.2. Hoe kan Flow de maandelijkse korting geven?

Ten eerste bepalen ze zelf de tarieven waaraan de klant energie kan kopen. Flow Energy belooft dat deze goedkoper zijn dan het gemiddelde van de standaard variabele tarieven van de 6 grootste leveranciers in de UK. De prijs van variabele contracten ligt echter hoger dan de prijs van vaste contracten.

Ten tweede zijn ze eigenaar van de stroom die de boiler opwekt gedurende de 5 jaar van het contract en moeten ze deze niet meer aankopen. De klant daarentegen betaalt nog voor deze stroom. Flow maakt dus pure winst op de stroom die de WKK produceert.

Ten derde krijgen ze van de overheid Feed-In tarieven. Deze bedragen ongeveer 18 eurocent per kWh dat de WKK opwekt. Hierdoor zou Flow Energy jaarlijks tussen de 300 en 500 pond kunnen opstrijken. Na afloop van de 5 jaar blijft Flow Energy recht hebben op de helft van de Feed-In tarieven en op de helft van de gegenereerde stroom.

Uiteraard zijn er ook de inkomsten die komen uit de installatiekosten en de aankoop van de boiler die de klant heeft gemaakt. Als laatste werken ze exclusief met Zopa voor de leningen die uitgereikt worden waardoor er hier ook ergens wel een voordeel voor Flow Energy zal aan verbonden zijn.

#### 3.4.4.1.3. Wanneer vervalt de verplichting van de 80 euro korting op de energierekening?

Als de klant :

- verandert naar een energieleverancier die niet Flow Energy is
- niet langer Flow Energy als ontvanger van de Feed-In tarieven aanduidt
- niet meer kan betalen voor de gas- en elektriciteitsfacturen
- de Flow Boiler vervangt
- verandert van huis
- niet de maandelijkse meterstanden doorgeeft

#### 3.4.4.1.4. Is de lening bij Zopa marktrepresentatief?

De klant wordt geïntroduceerd aan de formule Zopa Limited, die een persoonlijke lening zal uitreiken voor de aankoop van de Flow Boiler. De lening van 3675 pond over 5 jaar tijd zal een maandelijks aflossingsbedrag hebben van 75.5 pond. De JKP bedraagt hierbij 8,9%. De totale kost na 5 jaar is dan 4529,89 pond waarvan 674,89 pond interest aan 6.7% vast en een vergoeding van 180 pond.

De JKP van 8,9% is niet merkkelijk meer dan bij een Belgische bank zou verkregen op een persoonlijke lening van 5000 euro. Enkel de looptijd verschilt want bij een Belgische bank kan voor zo'n klein bedrag niet op 5 jaar geleend worden maar maximum op 3 jaar.

#### 3.4.4.1.5. Opmerkingen bij Flow Finance

Flow Energy beweert tot 500 pond te kunnen besparen met de Flow Boiler maar dat is enkel zo bij echt grote verbruikers. Huizen zouden al 32000 kWh gas moeten verbruiken. Dat is bijna het dubbele van een gemiddeld Vlaams verbruik.

Flow Energy belooft goedkoper te zijn dan het gemiddelde van de variabele tarieven van de 6 grootste leveranciers in de UK. Variabele tarieven zijn echter duurder dan de goedkoopste vaste tarieven. Hierdoor zouden klanten die zich aansluiten bij de Flow Energy voor de aankoop van hun energie meer kunnen betalen in vergelijking met de goedkoopste tarieven.

Er is maar een garantie van 2 jaar op de boiler. Als er dus grote reparatiekosten optreden in de laatste 3 jaar van het contract draait de klant hiervoor op.

Een laatste kritische noot is het feit dat als er iets zou gebeuren met Flow Energy als bedrijf, heel veel klanten zonder de maandelijks korting van 80 pond op de energiefactuur zouden komen te staan terwijl de lening wel moet blijven afbetaald worden.

### ***3.4.4.2. Remeha Evita: Huursysteem***

#### 3.4.4.2.1. Hoe werkt het?

De Remeha Evita kost ongeveer 10 000 euro in Nederland om aan te kopen. Er kan echter ook gekozen worden om de ketel te huren waarbij een maandelijks huurbedrag moet betaald worden en de ketel eigenlijk nooit echt bezit wordt van de huurder. Alle inwoners van Nederland kunnen aanspraak maken om een Evita te huren van Remeha. Naast de maandelijks huur, die niet gewijzigd mag worden gedurende de 12 jarige duur van het contract, wordt eenmalig een aanbetaling van € 2.000 in rekening gebracht. Inwoners van de provincie Gelderland krijgen deze aanbetaling terug van de provincie.

Er zijn dus geen aanschafkosten en ook de service en onderhoud zijn inbegrepen in de huurprijs. De huurperiode loopt over 12 jaar. Daarna stoppen de 'afbetalingen' maar is de ketel nog altijd eigendom van Remeha. De ketel heeft een levensverwachting van 15 jaar waardoor tijdens de laatste drie jaar de besparingen van de ketel voor de klant zijn. Dit zou volgens Remeha nog een bedrag van 1000 euro moeten opleveren op 3 jaar tijd.

#### 3.4.4.2.2. Wat na de 12 jarige huurperiode?

Na de eerste 12 jaar is de klant geen huur meer verschuldigd maar stopt ook het inbegrepen onderhoud. Er kan voor het onderhoud daarna nog een apart 3-jarig onderhoudscontract met Remeha afgesloten worden. Remeha maakt sowieso na het 12de jaar een afspraak met de klant om de oude ketel te verwijderen, of een nieuw onderhoudscontract aan te gaan.

#### 3.4.4.2.3. Kan het contract tussentijds gestopt worden?

Wanneer de huurovereenkomst tijdens de contractperiode beëindigd moet worden, is er een afkoopsom die moet worden betaald aan Remeha. De afkoopsom is simpelweg gelijk aan het totaal van de nog te betalen maandbedragen binnen het contract. Na betaling van de afkoopsom wordt de huurovereenkomst beëindigd en maakt Remeha een afspraak met de klant om de ketel te verwijderen en eventueel een nieuwe ketel te plaatsen.

#### 3.4.4.2.4. Wat met de installatiekosten?

Bij de maandelijkse brutohuur van de ketel is de installatie inbegrepen. De brutohuur bedraagt € 62 per maand inclusief BTW. De enige voorwaarde is dat het bestaande leidingswerk geschikt is voor de aansluiting van de Evita (aardgas 22 mm, water, condensafvoer, rookgasafvoer en aanvoer en retour c.v) en dat deze zich binnen 1m van de toekomstige Evita bevinden.

Wanneer de installatie niet wordt meegenomen in de huur is het bruto maandbedrag € 57,- inclusief BTW. De installatiekosten worden dan apart aangeboden door de installateur. Dit kan echter alleen als een gecertificeerde Evita installateur de installatie verricht.

## Algemeen besluit

Wanneer de toestellen die interessant leken vanuit technisch opzicht opgezocht worden in de tabellen die de SPB en NPV weergeven in het huidige systeem dan valt op dat ze economisch gezien niet tot de beste behoren. De terugverdientermijnen zijn voor nagenoeg alle toestellen te groot waardoor er weinig gezinnen de stap zullen zetten om een micro-WKK te installeren in plaats van een nieuwe condensatieketel. Deze conclusie weerspiegelt zich dan ook in de realiteit.

Wordt als voorbeeld de brandstofcellen genomen, die het beste scoren wanneer een positieve invloed op het milieu beoogd wordt. Wanneer ze geanalyseerd worden naar SPB en NPV dan lijkt hun hoge aankoopprijs het grootste struikelblok. Het feit dat het meestal nog om prototypes gaat is de grootste oorzaak voor de hoge prijs. Het huidige subsidiesysteem in Vlaanderen geeft geen investeringsteun waardoor gezinnen deze grote meerkost mijden. Een subsidiesysteem gebaseerd op investeringsteun zoals in Duitsland, met bepaalde vereisten naar elektrisch rendementen en condenserende werking, zou een betere ondersteuning kunnen geven om op die manier een klimaat te creëren waarin brandstofcellen interessant worden.

Ook in de UK wordt een ander subsidiesysteem gebruikt gebaseerd op een 'Feed In Tarif'. Gedurende de eerste 10 jaar van een installatie krijgt de eigenaar per kWh die de micro-WKK opwekt 0,135 pond (=0,18 euro) en per geëxporteerde kWh 0.0485 pond (=0,06 euro). Deze tarieven komen bovenop de besparing die gemaakt wordt op de energierekening en verhoogt dus drastisch de jaarlijkse cashflows. Zo zou bijvoorbeeld Stirling 1 bij gezin 2 zijn jaarlijkse cashflow meer dan verdubbeld zien en slinkt de SPB van meer dan 11 jaar tot 5 jaar.

Het huidige Vlaamse steunmechanisme met warmtekrachtcertificaten is niet optimaal om de verkoop van micro-WKK te bevorderen. Het percentage dat de steun inneemt t.o.v. de totale cashflow is te klein om op die manier de terugverdientermijn te verkorten naar een aanvaardbare 7 jaar. In het verleden werd al aan zonne-energie grote steun gegeven via de groenestroomcertificaten terwijl net die technologie het net meer belast. Micro-WKK zorgt er tegenover voor dat stroom lokaal geproduceerd wordt wanneer de vraag en dus de belasting het grootst is. Dit positief effect van micro-WKK wordt momenteel nog onderkend terwijl het belastende effect van zonnepanelen meer in de aandacht komt. Een capaciteitstarief zou binnenkort aan de orde zijn maar technologieën die het net ontlasten krijgen voorlopig nog geen voordeel.

Indien er geen budget kan vrijgemaakt worden om directe investeringsteun of verhoogde productiesteun te geven, zou een huurmechanisme zoals in sommige buurlanden al mogelijk is een oplossing kunnen bieden. Dit zou dan echter moeten uitgaan van privébedrijven zoals gasleveranciers en fabrikanten van micro-WKK's waardoor de overheid hier maar een beperkte rol kan in spelen.

De toestellen die momenteel al beschikbaar zijn in België komen in deze studie niet als beste naar voor. Andere toestellen die in de buurlanden wel al te koop zijn en daar ook in redelijke aantallen verkocht worden, zouden op termijn zeker ook in Vlaanderen niet misstaan. Het voorbeeld bij uitstek hiervoor is de ICE 2. Na contact met de fabrikant blijkt dat het toestel nog minstens 1 jaar zijn deugdelijkheid moet bewijzen in het buurland vooraleer een export naar België overwogen zal worden.

Fabrikanten zijn zeer op hun hoede om imagoverlies te lijden wanneer een toestel niet adequaat zou blijken te zijn. Wanneer de aankoop prijs van dit toestel zou kunnen zakken naar 10000 euro kan het op iets meer dan 7 jaar terugverdiend worden. Dit kan enerzijds gebeuren vanuit de fabrikant zelf (zoals tijdelijk al eens gebeurde via een actie in het verleden) of anderzijds door een investeringssteun vanuit de Vlaamse overheid. Een steun van 1900 euro zoals in Duitsland al gegeven wordt kan genoeg zijn om de ICE 2 te lanceren in Vlaanderen.

Ook de Stirling 3 is met zijn aankoop prijs van 8400 euro een interessant toestel. Er worden er al verkocht in Nederland, Rusland, Korea en binnenkort ook in Groot-Brittannië. De grootste troef van het toestel is zijn prijs die tot 25% goedkoper is dan deze van de concurrenten. Volgens de fabrikant draaien de proeftoestellen nu reeds 2 jaar zonder problemen in Nederland waardoor beslist is dat de expansie naar Groot-Brittannië in 2015 zou moeten gebeuren. Hierna is men van plan om via Nederlands ook de Duitse markt te betreden maar van de Belgische markt is voorlopig nog geen sprake. De installatie is gelijkaardig aan deze van andere stirling-WKK's waardoor er op papier weinig zaken zouden mogen zijn die een importeur tegenhouden om het toestel te importeren.

SOFC 4 komt uit de simulaties als beste brandstofcel naar voor maar het betreft echter een prototype en zijn prijs en specificaties zijn slechts richtwaarden die de fabrikant hoopt te bereiken. De brandstofcel-WKK's die op korte termijn te koop zullen zijn in de buurlanden hebben allemaal een prijs die hoger is dan 15 000 euro waardoor ze jammer genoeg niet terug te verdienen zijn binnen de 10 jaar.

Als laatste heeft ook ORC 2 zijn beperkte aankoop prijs veel potentieel maar aangezien deze technologie gelinkt is aan een gasleverancier die de kopers van de WKK aan zich bindt, wordt het moeilijker om een export naar Vlaanderen te forceren.

Concluderend kan gesteld worden dat er zeker toestellen zijn die al te koop zijn in het buitenland (ICE 2 , Stirling 3,...) die ook in Vlaanderen zouden kunnen renderen. Een verhoogde investeringssteun zoals in Duitsland of verhoogde productiesteun zoals in Groot-Brittannië zou dit dan ook in belangrijke mate kunnen ondersteunen.

## Referentielijst

- Adopted, I. (2014). CLIMATE CHANGE 2014 SYNTHESIS REPORT.
- Araoz Ramos, J. A. (2015). Thermodynamic analysis of Stirling engine systems: Applications for combined heat and power.
- Ávila-Neto, C. N., Dantas, S. C., Silva, F. A., Franco, T. V., Romanielo, L. L., Hori, C. E., & Assis, A. J. (2009). Hydrogen production from methane reforming: Thermodynamic assessment and autothermal reactor design. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1(6), 205-215. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2009.12.003>
- Mini-KWK-Anlagen Liste der förderfähigen KWK-Anlagen bis einschließlich 20 kWel (2015).
- Balcombe, P., Rigby, D., & Azapagic, A. (2015). Environmental impacts of microgeneration: Integrating solar PV, Stirling engine CHP and battery storage. *Applied Energy*, 139, 245-259. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.11.034
- Basishandboek Warmte-Krachtkoppeling*. (2015). Cogen Vlaanderen. Leuven, België.
- Beith, R. (2011). *Small and micro combined heat and power (CHP) systems: Advanced design, performance, materials and applications*: Elsevier.
- Beschikking nr.406/2009/EG van het Europees parlement en de raad*. (2009).
- BESCHIKKING Nr. 406/2009/EG VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 23 april 2009 inzake de inspanningen van de lidstaten om hun broeikasgasemissies te verminderen om aan de verbintenissen van de Gemeenschap op het gebied van het verminderen van broeikasgassen tot 2020 te voldoen (2009).
- Blum, L., Deja, R., Peters, R., & Stolten, D. (2011). Comparison of efficiencies of low, mean and high temperature fuel cell systems. *international journal of hydrogen energy*, 36(17), 11056-11067.
- Bollen, A., Van Humbeeck, P., & Lamote, A. (2011). *Energie voor een groene economie- Boekdeel 2 : Hernieuwbare energie : beleid en evaluatie*. Gent: Academia Press.
- Bouvenot, J. (2014). Gas Stirling engine  $\mu$ CHP boiler experimental data driven model for building energy simulation. *Energy & Buildings*, 84, pp.117–131.
- Braun, R. J., Klein, S. A., & Reindl, D. T. (2006). Evaluation of system configurations for solid oxide fuel cell-based micro-combined heat and power generators in residential applications. *Journal of power sources*, 158(2), 1290-1305. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.064>
- Calò, E., Giannini, A., & Monteleone, G. (2010). Small stationary reformers for H<sub>2</sub> production from hydrocarbons. *international journal of hydrogen energy*, 35(18), 9828-9835.
- Carter, D. (2012). Fuel Cell Residential Micro-CHP Developments in Japan *Fuel cell today*. Retrieved from: [www.fuelcelltoday.com](http://www.fuelcelltoday.com)
- D'hulster, P. (2014). *Cursus Warmtekrachtkoppeling*. KULAB. Oostende.
- Darrow, K. (2014). *Catalog of CHP technologies : Section 6. Technology Characterization – Fuel Cells* Retrieved from [http://www.epa.gov/chp/documents/catalog\\_chptech\\_6.pdf](http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_chptech_6.pdf).
- De Paepe, M., D'Herdt, P., & Mertens, D. (2006). Micro-CHP systems for residential applications. *Energy conversion and management*, 47(18), 3435-3446.
- Devogelaer, D., & Gusbin, D. (2014). Het Belgische energiesysteem in 2050: Waar naartoe? : Federaal Planbureau
- Dodds, P. E., Staffell, I., Hawkes, A. D., Li, F., Grünewald, P., McDowall, W., & Ekins, P. (2015). Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(5), 2065-2083. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.059>
- Dörr, D. H. (Producer). (2013, 16/02/2015). Recent progress in gas appliances [Powerpoint] Retrieved from <http://www.edgar-program.com/uploads/fckconnector/3fb330ee-99fa-438e-acd6-95067d7d5d4d>
- Duerinck, J., Wetzels, W., Cornelis, E., Moorkens, I., & Valkering, P. (2014). Potentieel studie hernieuwbare energie 2030 in Vlaanderen VITO.
- Dwyer, S. (2012). Japan continues to lead as fuel cell units emerge. *Cogeneration & On-Site Power Production* (May - June 2012), 6.



- Elmer, T., Worall, M., Wu, S., & Riffat, S. B. (2015). Fuel cell technology for domestic built environment applications: State of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42(0), 913-931. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.080>
- Energieagentschap, V. (2011). Actieplan van het Energierenovatieprogramma 2020 voor het Vlaamse woningbestand. *Monitoringrapport oktober*.
- Freese, H., & Fennema, E. (2014). Higher Efficiencies for micro CHP using fuel cells (pp. 23): RVO.
- Gandiglio, M., Lanzini, A., Santarelli, M., & Leone, P. (2014). Design and optimization of a proton exchange membrane fuel cell CHP system for residential use. *Energy and Buildings*, 69(0), 381-393. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.022>
- Gazis, E., & Harrison, G. P. (2011, 19-23 June 2011). *Life cycle energy and carbon analysis of domestic Combined Heat and Power generators*. Paper presented at the PowerTech, 2011 IEEE Trondheim.
- Greening, B. P. (2014). *Life cycle environmental and economic sustainability assessment of micro-generation technologies in the UK domestic sector*. University of Manchester.
- Halliday, J., Peters, M., Powell, J., & Ruddell, A. (2005). Fuel cells: Providing heat and power in the urban environment *Tyndall Centre Technical Report 32*.
- Higuchi, R. (Producer). (2013, 09/03/2015). Gas alternatives: Heat pumps and cogeneration systems :The Netherlands [Powerpoint] Retrieved from <https://www.bsria.co.uk/download/product/?file=AoxIPxFjlyA%3D>
- Honda. (2015). Performing more work with less fuel - Exlink. Retrieved 02/12/2014, from <http://world.honda.com/powerproducts-technology/exlink/>
- Hubert, C.-E., Achard, P., & Metkemeijer, R. (2006). Study of a small heat and power PEM fuel cell system generator. *Journal of power sources*, 156(1), 64-70.
- Inventaris warmte-krachtkoppeling Vlaanderen 1990-2013 (2014). België: VITO.
- Kasuh, T. (Producer). (2013, 10/10/2014). Why does Japan believe in domestic fuel cell? Adaptation to European market? . [Powerpoint] Retrieved from [http://www.marcogaz.org/downloads/EGATEC2013/Day2-May31/PS5/PS5f\\_6\\_Kasuh.pdf](http://www.marcogaz.org/downloads/EGATEC2013/Day2-May31/PS5/PS5f_6_Kasuh.pdf)
- Kim, C.-S. (Producer). (2010, 03/11/2014). R&D status and prospects on fuel cells in Korea. [Powerpoint] Retrieved from [http://fuelcellseminar.com/wp-content/uploads/kim\\_10\\_19\\_2010.pdf](http://fuelcellseminar.com/wp-content/uploads/kim_10_19_2010.pdf)
- Kim, D., Kim, J., Koo, C., & Hong, T. (2014). An Economic and Environmental Assessment Model for Selecting the Optimal Implementation Strategy of Fuel Cell Systems—A Focus on Building Energy Policy. *Energies*, 7(8), 5129-5150.
- Kim, J. W. (Producer). (2013, 03/02/2015). Recent Achievements in Hydrogen and Fuel Cells in Korea. [Powerpoint] Retrieved from <http://hydrogenius.kyushu-u.ac.jp/cie/event/ihdf2013/pdf/2-3kim.pdf>
- Lin, W., Yuan, J., & Sundén, B. (2010). *Waste Heat Recovery System for Fuel Cell System*. Paper presented at the International Green Energy Conference.
- Liu, J. A. (2006). *Kinetics, catalysis and mechanism of methane steam reforming*. Worcester Polytechnic Institute.
- McPhail, S. J., Leto, L., & Boigues-Muñoz, C. (2013). *International Status of SOFC deployment 2012-2013*. Rome.
- Mini-KWK-Impulsprogramm: Ab 2015 deutlich mehr Förderung für Nano- und Mikro-BHKW. (2014). Retrieved 05/05/2014, 2015, from <http://www.bhkw-infothek.de/nachrichten/21897/2014-12-30-mini-kwk-impulsprogramm-ab-2015-deutlich-mehr-foerderung-fuer-nano-und-mikro-bhkw/>
- OfgemE-serve. (2015). *Feed-in Tariff Payment Rate Table for Non-Photovoltaic Eligible Installations for FIT (1 April 2014 to 31 March 2015)* Ofgem e-serve.
- Osaka Gas Co., L. (2013). Development status and future prospects for residential and commercial use of SOFC systems Retrieved from: [www.gas.or.jp/en/newsletter/images/22/dl/pdf01.pdf](http://www.gas.or.jp/en/newsletter/images/22/dl/pdf01.pdf)

- Pachauri, R. K., & Meyer, L. A. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 151). Geneva, Switzerland: IPCC.
- Pehnt, M. (2008). Environmental impacts of distributed energy systems—The case of micro cogeneration. *Environmental Science & Policy*, 11(1), 25-37. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2007.07.001>
- Pilatowsky, I., Romero, R., Isaza, C., Gamboa, S., Sebastian, P., & Rivera, W. (2011). Thermodynamics of Fuel Cells *Cogeneration Fuel Cell-Sorption Air Conditioning Systems* (pp. 25-36): Springer.
- Qiu, G., Shao, Y., Li, J., Liu, H., & Riffat, S. B. (2012). Experimental investigation of a biomass-fired ORC-based micro-CHP for domestic applications. *Fuel*, 96(0), 374-382. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.028>
- Ren, H., & Gao, W. (2010). Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan. *Energy and Buildings*, 42(6), 853-861. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.007>
- RICHTLIJN 2012/27/EU VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 25 oktober 2012 betreffende energie-efficiëntie, tot wijziging van Richtlijnen 2009/125/EG en 2010/30/EU en houdende intrekking van de Richtlijnen 2004/8/EG en 2006/32/EG (2012).
- Schepers, B. L. (2010). *200-200 in 2020 : overzicht van het warmtepotentieel in Nederland*. Delft: CE Delft.
- Six, D., & Dexters, A. (2009). Oriënterende studie micro-warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen. Mol: VITO.
- Staffell, I. (2009). A review of small stationary fuel cell performance. *University of Birmingham, UK*.
- Staffell, I. (2010). *Fuel cells for domestic heat and power: are they worth it?* (Ph.D.), University of Birmingham. Retrieved from <http://etheses.bham.ac.uk/641/>
- Staffell, I. (2015). Zero carbon infinite COP heat from fuel cell CHP. *Applied Energy*, 147, 373-385.
- Staffell, I., & Green, R. (2013). The cost of domestic fuel cell micro-CHP systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(2), 1088-1102.
- Staffell, I., Ingram, A., & Kendall, K. (2012). Energy and carbon payback times for solid oxide fuel cell based domestic CHP. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(3), 2509.
- Stygar, M., & Brylewski, T. (2015). Contemporary low-emissions hydrogen-based energy market in Poland: Issues and opportunities, part I. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(1), 1-12.
- Sudtharalingam, S., Leach, M., Brett, D. J. L., Staffell, I., Bergman, N., Barton, J. P., . . . Matian, M. (2010). UK microgeneration. Part II: technology overviews. *Proceedings of the ICE - Energy*, 163, 143-165. doi: 10.1680/ener.2010.163.4.143
- Table of quantified emission limitation or reduction commitments for the purpose of determining respective emission levels allocated to the European Community and its member states in accordance with article 4 of the Kyoto protocol (2002).
- Tuyen, N. D. (2012). Modelling a SOFC Power Unit Using Natural Gas Fed Directly. In H. A. Al-Megren (Ed.), *Advances in Natural Gas Technology* (pp. 498-524): InTech.
- Tuyen, N. D., & Fujita, G. (2012). *Modelling a SOFC Power Unit Using Natural Gas Fed Directly*: INTECH Open Access Publisher.
- UNFCCC. (2008). *Kyoto protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount*.
- UNFCCC, U. (2009). *Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amount*: eSocialSciences.
- van der Linden, J. (2014). Working Paper 10-14-De prijs van elektriciteit en aardgas voor ondernemingen in België-Samenstelling, niveau en evolutie ten opzichte van de buurlanden.
- Vanneste, D., Thomas, I., Goossens, L., De Decker, P., Laureys, J., Laureyssen, I., . . . Wevers, W. (2001). *Woning en woonomgeving in België. Huisvestingsmonografie op de resultaten van de SEE*.
- Walker, I. (2014). European Fuel Cell mCHP supply chain analysis (pp. 64): ENE.FIELD.

- Walker, I., Ruf, L., & Serna, S. d. I. (2014). Fuel Cell mCHP European supply chain analysis report ENE.FIELD.
- Wetzels, W., Aernouts, K., & Jespers, K. (2014). Inventaris warmte-krachtkoppeling Vlaanderen 1990-2013 Mol: VITO.
- Wikipedia. (2015a). Atkinson cycle. Retrieved 02/12/2014, from [http://en.wikipedia.org/wiki/Atkinson\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Atkinson_cycle)
- Wikipedia. (2015c). Organic Rankine Cycle. Retrieved 05/04/2014, from [http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_Rankine\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle)
- Wikipedia. (2015e). Rankine Cycle. Retrieved 05/04/2014, from [http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle)
- Wikipedia. (2015g). Stirling Engine. Retrieved 02/12/2014, from [http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine)
- Wikipedia. (2015i). Viertaktmotor. Retrieved 02/12/2014, from <http://nl.wikipedia.org/wiki/Viertaktmotor>
- WKK-Wegwijzer. (2014). Cogen Vlaanderen. Leuven.
- Yokokawa, H. (Producer). (2014). Recent Activities in Japan on SOFC Stack/System Development [Powerpoint]

## Bijlagen

De onderzochte 28 toestellen uit deze thesis hebben in de meeste gevallen een brochure die uitgebracht geweest is door hun fabrikant. In de volgende pagina's komen deze aan bod. Enkel de eerste pagina en de technische specificaties zijn telkens afgedrukt. De volledige brochures staan op de CD-ROM die ook bijgevoegd is. Op deze CD-ROM staan tevens alle excel berekeningen per toestel en de digitale versie van deze thesis.

Bepaalde toestellen hebben echter geen brochure die te vinden is in een pdf versie en vermelden hun technische specificaties enkel op hun website :

### **Honda : ECOWILL**

<http://world.honda.com/power/cogenerator/>

### **GS Fuelcell : ECOGENER**

<http://gsfc.en.ec21.com/>

### **Panasonic : ENE-FARM**

<http://news.panasonic.com/press/news/official.data/data.dir/2013/10/en131021-5/en131021-5.html>

### **Asia Hydrogen Energy : PROME 7S**

<http://www.ah2e.com/#!h2fuel/cclw>