



# ***Microwarmtekrachtkoppeling ( $\mu$ WKK) in private woningen***

***Een economische, ecologische en energetische analyse***

**Tine De Cleene**

promotor :  
Prof.dr.ir Frans LEMEIRE

co-promotor :  
Mevrouw Tine COMPERNOLLE

## VOORWOORD

---

Deze eindverhandeling vormt het sluitstuk van mijn opleiding Handelsingenieur aan de Universiteit Hasselt. De keuze van het onderwerp 'Microwarmtekrachtkoppeling in private woningen' kwam voort uit mijn sterke interesse in de milieuproblematiek en sluit tevens perfect aan bij mijn afstudeerrichting Technologie-, Innovatie- en Milieumanagement.

Deze eindverhandeling is mede kunnen slagen door de hulp, medewerking en steun van een aantal personen. Hen zou ik via deze weg willen bedanken.

Allereerst gaat mijn dank uit naar mijn promotor, prof. dr. ir. Frans Lemeire, voor zijn deskundige begeleiding, advies en kritiek tijdens de totstandkoming van dit werkstuk. Daarnaast wil ik mijn copromotor, mevr. Tine Compernelle, bedanken voor haar ideeën en de bereidheid om steeds mijn vragen te beantwoorden.

Voorts wil ik mijn dank betuigen aan prof. Annick Dexters van de Katholieke Hogeschool Limburg om mij op weg te helpen met deze eindverhandeling en vooral de praktijkstudie. Verder een woord van dank aan D. Pollet van Baxi en J. Jageneau om mij van technische gegevens van de gebruikte installaties te voorzien.

Tenslotte wens ik mijn ouders, vriendinnen en vrienden te bedanken voor hun onvoorwaardelijke morele steun gedurende mijn hele studentenloopbaan.

Tine De Cleene  
Mei, 2010

## **SAMENVATTING**

---

In het kader van duurzame ontwikkeling is het tegengaan van de opwarming van de aarde één van de grootste uitdagingen die we onder ogen moeten zien. Het Intergovernmental Panel on Climate Change stelde in de periode 1996-2005 een gemiddelde temperatuurstijging van 0,74°C vast. Deze temperatuurstijging is met grote waarschijnlijkheid te wijten aan menselijke activiteiten en zal wereldwijd gevolgen hebben, gaande van extreme weersomstandigheden tot snelle verspreiding van ziekten.

Teneinde deze opwarming tegen te gaan, zullen de emissies van broeikasgassen drastisch gereduceerd moeten worden. Gezien het Kyoto-protocol in 2012 afloopt, werd in december 2009 een nieuwe klimaatconferentie gehouden in Kopenhagen. Het resultaat van deze klimaatop was echter teleurstellend. Er werden geen concrete doelstellingen per land overeengekomen. Enkele maanden later bevestigde België dat ze de politieke verbintenissen die de Europese Unie aangaat, zal naleven. Dit houdt een CO<sub>2</sub>-reductie van 20% in tegen 2020 ten opzichte van het niveau van 1990.

Als grootste energieverbruikers van Vlaanderen hebben de transformatiesector en de residentiële sector een groot potentieel om een energiebesparing en bijhorende CO<sub>2</sub>-reductie te bewerkstelligen. Een interessante innovatie op dit gebied is warmtekrachtkoppeling. Hierbij worden zowel warmte als elektriciteit opgewekt in één installatie die zich binnen het gebouw bevindt. In vergelijking met de klassieke gescheiden opwekking wordt er bespaard op brandstof die nodig is om warmte en elektriciteit te produceren wat bijgevolg een reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot met zich meebrengt. Zowel de primaire, secundaire als tertiaire sector in Vlaanderen maken in stijgende lijn gebruik van deze techniek. Enkel de residentiële sector blijft achter. Hieronder vallen grotere gebouwen zoals appartementsblokken en hotels maar ook private woningen. Het is in dit laatste segment dat deze eindverhandeling zich situeert. In de private residentiële sector spreekt men, door de kleinschaligheid, van microwarmtekrachtkoppeling ( $\mu$ WKK). Installaties met een elektrisch vermogen kleiner dan 50 kWe worden gezien als  $\mu$ WKK's. Een  $\mu$ WKK met een vermogen van 1 kWe echter kan een huishouden al van voldoende warmte voorzien.

Momenteel zijn er vijf technologieën die wat betreft elektrisch vermogensbereik in aanmerking komen voor residentiële  $\mu$ WKK. Dit zijn de zuigermotoren met inwendige

verbranding, microturbines, de Organic Rankine Cycle systemen, Stirlingmotoren en brandstofcellen.  $\mu$ WKK's op basis van een Stirlingmotor staan op dit moment het verst in technologische ontwikkeling. De overige technologieën bevinden zich nog in een te hoge vermogensrange of ondervinden nog de belemmering van een te grote investeringskost.

De huidige kostprijs van een  $\mu$ WKK met Stirlingmotor ligt evenwel nog zeer hoog, gaande van 6000 tot 12 000 EUR. Ten opzichte van een referentie HR-ketel betekent dit een meerprijs van 4000 – 10 000 EUR. Deze meerprijs zal hoofdzakelijk terugverdiend worden door de elektriciteitsproductie. Producenten streven naar een terugverdientijd van 5 à 7 jaar.

Een belangrijke reden waarom de overheid  $\mu$ WKK zou moeten stimuleren, zijn de externe kosten die de huidige energievoorziening met zich meebrengt. Daarnaast zijn er nog andere argumenten die pleiten voor een tussenkomst van de overheid: de economische en technologische toekomstvisie, transgenerationale en transnationale solidariteit, het technologisch en sociaal-economisch multiplicatoreffect, het technologisch effect en de verminderde afhankelijkheid.

Wie een oude verwarmingsketel vervangt door een  $\mu$ WKK kan genieten van een investeringssubsidie waarbij 40% van de investeringsuitgaven in aanmerking komen voor belastingvermindering. Bovendien verleent de overheid een interestverlaging van 1,5% wanneer een lening wordt aangegaan voor energiebesparende maatregelen. Op het saldo van de betaalde intresten wordt tevens bovenvermelde belastingvermindering toegekend.

Een extra ondersteuningsmechanisme dat een  $\mu$ WKK-project in de huidige economische context haalbaar maakt, zijn de warmtekrachtcertificaten. Voor iedere MWh bespaarde primaire energie verkrijgt de eigenaar van een  $\mu$ WKK een certificaat. De marktwaarde schommelt momenteel rond de 40 EUR.

In de rendabiliteitsanalyse wordt nagegaan of de implementatie van een  $\mu$ WKK in een gemiddelde Vlaamse woning op dit moment economisch haalbaar is. Met behulp van synthetische lastprofielen wordt het warmtevraagprofiel en vervolgens de geschikte  $\mu$ WKK-installatie bepaald. De resultaten van de economische analyse geven aan dat een  $\mu$ WKK in de huidige Vlaamse context rendabel is met een geschatte terugverdientijd van ongeveer 4 jaar. De sensitiviteitsanalyse bevestigt deze rendabiliteit maar stelt de bekomen resultaten

iets minder positief voor. Indien de warmtekrachtcertificaten en/of de investeringssubsidie zouden wegvallen, wordt de investering in een  $\mu$ WKK aanzienlijk minder interessant.

De aanschaf van een  $\mu$ WKK brengt tevens ecologische en energetische voordelen met zich mee. Zo bespaart een  $\mu$ WKK aanzienlijk op primaire energie. In deze eindverhandeling wordt een jaarlijkse primaire energiebesparing van 5,44 MWh bekomen. Bovendien bewerkstelligt de gekozen  $\mu$ WKK een CO<sub>2</sub>-reductie van 1165,85 kg per jaar.

Ter volledigheid worden nog enkele randvoorwaarden besproken waaraan een  $\mu$ WKK moet voldoen om economisch en ecologisch rendabel te zijn. Omtrent het marktpotentieel kan gesteld worden dat enkel huizen met een voldoende grote warmtevraag in aanmerking komen voor  $\mu$ WKK. Enkel dan kan de  $\mu$ WKK voldoende uren draaien om jaarlijks een relevante hoeveelheid elektriciteit op te wekken. Het is immers de elektriciteitsproductie die zowel voor de energiebesparing, de CO<sub>2</sub>-reductie als de kostenbesparing zorgt.

Daarnaast is de algemene regeling van de  $\mu$ WKK van cruciaal belang om de technologie te doen slagen en van de voordelen te genieten. In dit opzicht dient de  $\mu$ WKK-installatie zo weinig mogelijk start en stops te kennen en mag de bijbrander enkel op piekmomenten ingeschakeld worden om de elektriciteitsproductie te maximaliseren.

Tot slot dient vermeld te worden dat residentiële  $\mu$ WKK concurrentie zal ondervinden van andere technologieën die voor een huishouden warmte produceren, energie besparen en/of emissies reduceren. Voorbeelden hiervan zijn warmtepompen, zonnepanelen en thermophotovoltaïcs.

## **LIJST VAN BEGRIPPEN**

---

### **Buffervat**

Een buffervat wordt gebruikt om overtollig geproduceerde warmte tijdelijk op te slaan. In een volgende periode kan aan de warmtevraag voldaan worden met de opgeslagen warmte in het buffervat (A. Dexters, persoonlijke communicatie, 12 februari, 2010).

### **CO<sub>2</sub>-intensiteitsfactor**

Dit is de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die uitgestoten wordt per eenheid verstoekte brandstof en wordt doorgaans in kg CO<sub>2</sub>/kWh weergegeven (Cogen Vlaanderen, 2006).

### **Condenserende ketel**

Een condenserende ketel is een verwarmingsketel op aardgas die door de condensatie van de waterdamp in de rookgassen een hoger rendement realiseert ten opzichte van een conventionele gasketel (J. Jageneau, persoonlijke communicatie, 19 april 2010).

### **Deellast**

Wanneer een WKK-installatie op deellast werkt, wordt niet het volledige vermogen benut. Er wordt dan minder brandstof aan de motor gegeven. Dit beïnvloedt het elektrisch rendement in de negatieve zin (A. Dexters, persoonlijke communicatie, 12 februari, 2010).

### **Distributienetbeheerder**

Een distributienetbeheerder zorgt ervoor dat de elektriciteit van het transportnet tot bij de eindverbruiker gebracht wordt (Vlaamse Milieumaatschappij [VMM], 2007a).

### **HR-ketel**

Een HR-ketel of hoog rendementsketel is een verwarmingsketel op aardgas die door de condensatie van de waterdamp in de rookgassen een hoger rendement realiseert ten opzichte van een conventionele gasketel. Het verschil met een condenserende gasketel situeert zich in de vertrek- en retourtemperatuur van de warmte en de temperatuur van de rookgassen. Deze liggen lager bij een condenserende ketel (J. Jageneau, persoonlijke communicatie, 19 april 2010).

### **Jaarbelastingsduurcurve**

In deze curve worden voor een heel jaar de uurlijkse waarden van de energievraag gerangschikt volgens grootte. Op deze manier kan de grootte van een WKK-installatie bepaald worden (Cogen Vlaanderen 2006).

### **Kwalitatieve WKK**

Een kwalitatieve WKK wordt gedefinieerd als een WKK-installatie die een primaire energiebesparing van ten minste 10% oplevert ten opzichte van de referentie voor de gescheiden productie van warmte en elektriciteit (Vlaamse overheid, 2006).

### **Onder- en bovenwaarde van een brandstof**

De hoeveelheid warmte die vrijkomt uit de chemische bindingsenergie noemt men de bovenwaarde of verbrandingswaarde van een brandstof. De onderwaarde of de netto-stookwaarde van een brandstof is de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij verbranding zonder de warmte nodig voor de opwarming van de brandstof en de verdamping van gassen mee te rekenen (A. Lemeire, persoonlijke communicatie, 9 november 2009).

### **Primaire energie**

Onder primaire energie verstaat men die energie die niet ontstaan is door omzetting van een andere vorm van energie. Dit is de bovenwaarde van de brandstof wat overeenkomt met de warmte-inhoud van deze brandstof (Cogen Vlaanderen, 2004).

### **Smart grid**

Een smart grid is een energienetwerk dat centrale energieopwekking feilloos combineert met decentrale energieproductie enerzijds en fluctuerende energievragen en – opslagmogelijkheden anderzijds (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek [VITO], 2009b).

### **Synthetische lastprofielen**

Synthetische lastprofielen zijn cijferreeksen, opgesteld op basis van historische gegevens, en geven aan welke fractie van de jaarlijkse warmtevraag er per uur gemiddeld gevraagd wordt (Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt [VREG], 2010c)

### **Tapwaterfunctie**

Een verwarmingsketel met geïntegreerde tapwaterfunctie voorziet een woning van zowel



warmte als sanitair warm water (J. Jageneau, persoonlijke communicatie, 19 april 2010).

### **Warmtekrachtcertificaat**

Een warmtekrachtcertificaat toont aan dat een kwalitatieve WKK in een jaar 1MWh primaire energie bespaart door een hoeveelheid warmte en elektriciteit te produceren

### **Weersafhankelijke temperatuurregeling**

Een weersafhankelijk temperatuurregeling van een verwarmingsketel reageert niet op de binnentemperatuur zoals een thermostatische regeling maar stuurt de ketel aan op basis van de buitentemperatuur. Wanneer het koud is, laat deze de brander aangaan totdat een hogere watertemperatuur bereikt is. Bij zacht weer is een lagere watertemperatuur voldoende (J. Jageneau, persoonlijke communicatie, 19 april 2010).

## LIJST VAN AFKORTINGEN

---

### Algemeen

μWKK	Microwarmtekrachtkoppeling
BNP	Bruto nationaal product
CHP	Combined heat and power of warmtekrachtkoppeling
DTVT	Verdisconteerde terugverdiëntijd
HR	Hoog rendement
HRe	Hoog rendement elektriciteit
IR	Interne rendementsvoet
JBDC	Jaarbelastingsduurcurve
NCW	Netto contante waarde
OLO	Lineaire obligatie
PEB	Absolute primaire energiebesparing
PHR	Power to heat ratio of kracht-warmte verhouding
Ppm	Parts per million
REG	Rationeel energiegebruik
RPE	Relatieve primaire energiebesparing
STEG	Stoom- en gascentrale
TPV	Thermophotovoltaics
WKC	Warmtekrachtcertificaat
WKK	Warmtekrachtkoppeling

## Organisaties

CREG	Commissie voor de Regulering van de Elektriciteits- en Gasmarkt
FOD	Federale Overheidsdienst
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MEC	Microgen Engine Corporation
MIRA	Milieurapport
NBB	Nationale Bank van België
VEA	Vlaams Energieagentschap
VITO	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek
VMM	Vlaamse Milieumaatschappij
VREG	Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt
WWF	World Wide Fund

## Grootheden

k	kilo	1 000
M	mega	1 000 000
G	giga	1 000 000 000
T	tera	1 000 000 000 000
P	peta	1 000 000 000 000 000

(VMM, 2007a)

## LIJST VAN FIGUREN

---

Figuur 2.1: Theoretische CO <sub>2</sub> -besparingen voor verschillende kracht-warmteverhoudingen (Carbon Trust, 2007) .....	27 -
Figuur 3.1: Schema vergelijking WKK en gescheiden opwekking.....	30 -
Figuur 4.1: Warmtebronnen in een $\mu$ WKK-installatie met zuigermotor.....	35 -
Figuur 4.2: Schematische voorstelling van een microturbine .....	37 -
Figuur 4.3: De Stirlingcyclus (alfa-opstelling).....	41 -
Figuur 5.1: Leercurve $\mu$ WKK .....	51 -
Figuur 5.2: Het systeem van warmtekrachtcertificaten .....	59 -
Figuur 5.3: Verloop van het aantal WKC's in de tijd .....	61 -
Figuur 5.4: Evolutie van de gemiddelde prijs per WKC per maand vanaf november 2005 (VREG, 2010b).....	62 -
Figuur 6.1: Aandeel van de Vlaamse sectoren in de broeikasemissies 2006-2007 (MIRA, 2009b).....	67 -
Figuur 6.2: Impact van de totale brandstofbenuttigingsgraad op de emissies van vervuilende elementen (Belding, 1982) .....	68 -
Figuur 8.1: Jaarlijks warmtevraagprofiel van een gemiddelde Vlaamse woning .....	81 -
Figuur 8.2: Jaarbelastingsduurcurve op basis van de warmtevraag .....	83 -
Figuur 8.3: Productiecurve op basis van de warmtevraag .....	83 -
Figuur 8.4: Jaarbelastingsduurcurve met grootst mogelijke rechthoek.....	84 -
Figuur 8.5: Evolutie van de elektriciteitsprijs in Vlaanderen voor een verbruik van 3500 kWh/j (Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas [CREG], 2010a) ..	90 -
Figuur 8.6: Evolutie van de aardgasprijs in Vlaanderen voor een verbruik van 23 260 kWh/j (CREG, 2010b).....	91 -
Figuur 8.7: Kansverdeling kostprijs $\mu$ WKK .....	106 -
Figuur 8.8: Kansverdeling elektriciteitsprijs.....	107 -
Figuur 8.9: Kansverdeling gasprijs.....	107 -

Figuur 8.10: Kansverdeling elektrisch rendement $\mu$ WKK .....	- 108 -
Figuur 8.11: Kansverdeling thermisch rendement $\mu$ WKK.....	- 108 -
Figuur 8.12: Kansverdeling prijs WKC's .....	- 109 -
Figuur 8.13: Kansverdeling verdisconteringsvoet.....	- 109 -
Figuur 8.14: Kansverdeling NCW .....	- 110 -
Figuur 8.15: Bijdrage van input-parameters aan variatie NCW .....	- 111 -
Figuur 8.16: Kansverdeling DTVT (7 jaar).....	- 112 -
Figuur 8.17: Kansverdeling DTVT (5 jaar).....	- 112 -
Figuur 8.18: Bijdrage van input-parameters aan variatie DTVT.....	- 113 -
Figuur 8.19: Kansverdeling IR.....	- 113 -
Figuur 8.20: Bijdrage van input-parameters aan variatie IR .....	- 114 -

## LIJST VAN TABELLEN

---

Tabel 4.1: Kerncijfers van zuigermotoren met inwendige verbranding .....	- 36 -
Tabel 4.2: Kerncijfers van microturbines .....	- 38 -
Tabel 4.3: Kerncijfers van ORC-installaties .....	- 39 -
Tabel 4.4: Kerncijfers van de Stirlingmotor .....	- 44 -
Tabel 4.5: Kerncijfers van brandstofcellen .....	- 46 -
Tabel 8.1: Overzicht investeringskosten $\mu$ WKK en HR-ketel (in EUR).....	- 89 -
Tabel 8.2: Technische karakteristieken van de gekozen $\mu$ WKK .....	- 92 -
Tabel 8.3: Berekening gas- en elektriciteitsbesparing.....	- 94 -
Tabel 8.4: Investeringssubsidie bij $\mu$ WKK (in EUR) .....	- 95 -
Tabel 8.5: Interestpercentage groene lening bij enkele grote banken (ING, 2010; Fortis, 2010; AXA, 2010; Dexia, 2010) .....	- 96 -
Tabel 8.6: Aflossingsschema groene lening (in EUR) .....	- 97 -
Tabel 8.7: Extra belastingvermindering op de betaalde interesten .....	- 97 -
Tabel 8.8: Opbrengsten aan WKC's.....	- 99 -
Tabel 8.9: Berekening verdisconteerde terugverdiëntijd (in EUR).....	- 101 -
Tabel 8.10: Berekening globale CO <sub>2</sub> -emissie balans .....	- 104 -
Tabel 9.1: Samenvatting economische analyse.....	- 118 -
Tabel 9.2: Samenvatting Monte Carlo-simulatie.....	- 118 -

## INHOUDSOPGAVE

<b>Voorwoord.....</b>	<b>- I -</b>
<b>Samenvatting .....</b>	<b>- II -</b>
<b>Lijst van begrippen.....</b>	<b>- V -</b>
<b>Lijst van afkortingen .....</b>	<b>- VIII -</b>
<b>Lijst van figuren .....</b>	<b>- X -</b>
<b>Lijst van tabellen .....</b>	<b>- XII -</b>
<b>DEEL I : INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING.....</b>	<b>- 1 -</b>
<b>1 Inleiding en probleemstelling .....</b>	<b>- 2 -</b>
1.1 Inleiding.....	- 2 -
1.2 Praktijkprobleem .....	- 5 -
1.3 Centrale onderzoeksvraag .....	- 7 -
1.4 Deelvragen.....	- 7 -
1.5 Afbakening van het onderzoeksdomein .....	- 8 -
1.6 Onderzoeksopzet.....	- 9 -
<b>DEEL II : ALGEMENE BEGRIPPEN OVER (<math>\mu</math>)WKK .....</b>	<b>- 11 -</b>
<b>2 Thermodynamica .....</b>	<b>- 12 -</b>
2.1 Energie .....	- 12 -
2.1.1 Elektromagnetische energie.....	- 12 -
2.1.2 Energie van materie .....	- 12 -
2.1.2.1 Globale kinetische energie.....	- 13 -
2.1.2.2 Warmte-energie .....	- 14 -
2.1.3 Potentiële energie .....	- 14 -
2.1.3.1 Gravitatie-energie.....	- 14 -
2.1.3.2 Elektrische energie.....	- 14 -
2.1.3.3 Kernenergie .....	- 15 -
2.1.4 Eenheden van energie .....	- 15 -
2.2 Soorten systemen .....	- 15 -
2.2.1 Open systeem.....	- 16 -
2.2.2 Gesloten systeem.....	- 16 -
2.2.3 Geïsoleerd systeem .....	- 16 -

2.2.4	Adiabatisch systeem .....	- 16 -
2.3	De hoofdwetten van de thermodynamica.....	- 17 -
2.3.1	Nulde hoofdwet van de thermodynamica .....	- 17 -
2.3.2	Eerste hoofdwet van de thermodynamica .....	- 17 -
2.3.3	Tweede hoofdwet van de thermodynamica .....	- 18 -
2.3.3.1	Macroscopische definitie van entropie .....	- 19 -
2.3.3.2	Microscopische definitie van entropie .....	- 19 -
2.3.3.3	Paradox van de entropie en de temperatuur .....	- 19 -
2.3.3.4	Gevolgen van entropiestijging.....	- 20 -
2.3.4	Derde hoofdwet van de thermodynamica .....	- 20 -
2.3.5	Vierde hoofdwet van de thermodynamica .....	- 20 -
2.4	Reversibele processen.....	- 21 -
2.5	Isentropische procesen .....	- 21 -
2.6	Exergie en anergie .....	- 22 -
2.7	Thermodynamische prestatie maatstaven.....	- 24 -
2.7.1	Het mechanisch rendement .....	- 24 -
2.7.2	Het elektrisch rendement .....	- 24 -
2.7.3	Het thermisch rendement.....	- 25 -
2.7.4	Het energetisch rendement van een WKK.....	- 25 -
2.7.5	Het exergetisch rendement van een WKK.....	- 26 -
2.7.6	De kracht-warmteverhouding .....	- 26 -
<b>3</b>	<b>Het concept warmtekrachtkoppeling .....</b>	<b>- 28 -</b>
3.1	Omschrijving en definitie.....	- 28 -
3.2	Conventionele wijze van energievoorziening .....	- 29 -
3.3	WKK als alternatief.....	- 29 -
3.4	WKK versus conventionele energievoorziening .....	- 30 -
3.5	WKK-indeling.....	- 32 -
<b>4</b>	<b><math>\mu</math>WKK: technologische aspecten .....</b>	<b>- 33 -</b>
4.1	Overzicht van de technologieën.....	- 33 -
4.2	Zuigermotoren met inwendige verbranding.....	- 34 -
4.2.1	Werkingsprincipe.....	- 34 -
4.2.2	Voor- en nadelen .....	- 35 -
4.2.3	Kerncijfers.....	- 36 -
4.3	Microturbines.....	- 37 -



4.3.1	Werkingsprincipe.....	- 37 -
4.3.2	Voor- en nadelen .....	- 37 -
4.3.3	Kerncijfers.....	- 38 -
4.4	Organic Rankine Cycle systemen .....	- 38 -
4.4.1	Werkingsprincipe.....	- 38 -
4.4.2	Voor- en nadelen .....	- 39 -
4.4.3	Kerncijfers.....	- 39 -
4.5	Stirlingmotoren .....	- 39 -
4.5.1	Werkingsprincipe.....	- 39 -
4.5.2	De Stirlingcyclus .....	- 41 -
4.5.3	Voor- en nadelen .....	- 42 -
4.5.4	Implementatie .....	- 43 -
4.5.5	Kerncijfers.....	- 43 -
4.6	Brandstofcellen .....	- 44 -
4.6.1	Werkingsprincipe.....	- 44 -
4.6.2	Voor- en nadelen .....	- 45 -
4.6.3	Kerncijfers.....	- 46 -
4.7	$\mu$ WKK's in vlaanderen .....	- 46 -
<b>5</b>	<b><math>\mu</math>WKK: economische aspecten .....</b>	<b>- 48 -</b>
5.1	Investeringskosten .....	- 48 -
5.2	Elektriciteits- en gasprijzen .....	- 49 -
5.3	Subsidies .....	- 49 -
5.3.1	Argumenten voor subsidies vanuit de overheid .....	- 49 -
5.3.1.1	Vermeden externe kosten .....	- 49 -
5.3.1.2	Economische en technologische toekomstvisie .....	- 50 -
5.3.1.3	Solidariteit .....	- 52 -
5.3.1.4	Technologisch multiplicatoreffect.....	- 54 -
5.3.1.5	Sociaal-economisch multiplicatoreffect .....	- 55 -
5.3.1.6	Technologisch effect .....	- 56 -
5.3.1.7	Verminderde afhankelijkheid .....	- 57 -
5.3.2	Bestaande subsidiemaatregelen .....	- 57 -
5.3.2.1	Investeringssubsidie .....	- 57 -
5.3.2.2	Groene lening .....	- 58 -
5.4	Warmtekrachtcertificaten .....	- 58 -
5.5	Economische rendabiliteitsmaatstaven .....	- 63 -

5.5.1	De netto contante waarde .....	- 63 -
5.5.2	De verdisconteerde terugverdientijd .....	- 64 -
5.5.3	De interne rendementsvoet .....	- 64 -
5.6	Monte Carlo-simulatie .....	- 65 -
<b>6</b>	<b>μWKK: energetische en ecologische aspecten .....</b>	<b>- 66 -</b>
6.1	Primaire energiebesparing .....	- 66 -
6.2	Emissiereductie .....	- 66 -
6.2.1	De energiesector .....	- 66 -
6.2.2	De huishoudens .....	- 68 -
6.3	Soorten emissies .....	- 69 -
6.4	Emissiebalans .....	- 70 -
6.4.1	Globale emissiebalans .....	- 70 -
6.4.2	Lokale emissiebalans .....	- 71 -
6.5	Voorwaarden voor emissiereductie .....	- 71 -
<b>7</b>	<b>Randvoorwaarden, barrières &amp; risico's .....</b>	<b>- 72 -</b>
7.1	Marktpotentieel .....	- 72 -
7.2	Impact op het elektriciteitsnet .....	- 73 -
7.3	Impact op het gasnet .....	- 75 -
7.4	Technische randvoorwaarden .....	- 75 -
7.4.1	Algemene regeling van de μWKK-installatie .....	- 75 -
7.4.2	Technische betrouwbaarheid .....	- 75 -
7.4.3	Concurrerende technologieën .....	- 76 -
<b>DEEL III: PRAKTIJKSTUDIE .....</b>	<b>- 78 -</b>	
<b>8</b>	<b>Haalbaarheid μWKK in een Vlaamse woning .....</b>	<b>- 79 -</b>
8.1	Aanpak haalbaarheidsstudie .....	- 79 -
8.2	Analyse van de energievraag .....	- 79 -
8.2.1	Warmtevraag van een woning .....	- 80 -
8.2.2	Elektriciteitsvraag van een woning .....	- 81 -
8.3	Technische dimensionering van de μWKK – installatie .....	- 82 -
8.3.1	Opstellen van de jaarbelastingsduurcurve .....	- 82 -
8.4	Marktonderzoek μWKK's .....	- 85 -
8.4.1	WhisperGen .....	- 85 -

8.4.2	Remeha .....	- 85 -
8.4.3	Vaillant .....	- 86 -
8.4.4	Baxi.....	- 86 -
8.4.5	Overige producenten .....	- 86 -
8.4.6	Keuze $\mu$ WKK.....	- 86 -
8.5	Economisch model.....	- 86 -
8.5.1	Investeringskost .....	- 87 -
8.5.1.1	Kostprijs $\mu$ WKK.....	- 87 -
8.5.1.2	Kostprijs referentieketel .....	- 87 -
8.5.1.3	Installatiekosten .....	- 88 -
8.5.1.4	BTW-tarief .....	- 88 -
8.5.1.5	Totale investeringskost .....	- 89 -
8.5.2	Werkings- en onderhoudskosten.....	- 89 -
8.5.3	Elektriciteitsprijs .....	- 90 -
8.5.4	Aardgasprijs .....	- 91 -
8.5.5	Technische karakteristieken van de gekozen $\mu$ WKK-installatie .....	- 92 -
8.5.6	Jaarlijkse meer-/minderkost gas en elektriciteit .....	- 93 -
8.5.7	Subsidiemaatregelen .....	- 95 -
8.5.7.1	Investeringssubsidie .....	- 95 -
8.5.7.2	Groene lening .....	- 96 -
8.5.8	Warmtekrachtcertificaten .....	- 97 -
8.5.9	De rentevoet .....	- 99 -
8.6	Economische rendabiliteitsmaatstaven .....	- 100 -
8.6.1	De netto contante waarde .....	- 100 -
8.6.2	De verdisconteerde terugverdientijd .....	- 101 -
8.6.3	De interne rendementsvoet .....	- 102 -
8.7	Ecologische en energetische rendabiliteit.....	- 102 -
8.7.1	De primaire energiebesparing .....	- 102 -
8.7.2	De CO <sub>2</sub> -reductie.....	- 102 -
8.7.2.1	De CO <sub>2</sub> -intensiteitsfactor van aardgas.....	- 103 -
8.7.2.2	De CO <sub>2</sub> -intensiteitsfactor van het centrale elektriciteitspark.....	- 103 -
8.7.2.3	De globale CO <sub>2</sub> -emissiebalans.....	- 104 -
8.8	Sensitiviteitsanalyse .....	- 105 -
8.8.1	Identificatie van de inputparameters waarvan de waarde onzeker is-	105 -
8.8.2	Bepaling van de kansverdeling voor de input-parameters.....	- 106 -
8.8.2.1	De kostprijs van de $\mu$ WKK.....	- 106 -
8.8.2.2	De elektriciteitsprijs.....	- 106 -

8.8.2.3	De gasprijs.....	- 107 -
8.8.2.4	Het elektrisch rendement van de $\mu$ WKK .....	- 107 -
8.8.2.5	Het thermisch rendement van de $\mu$ WKK.....	- 108 -
8.8.2.6	De prijs van de WKC's .....	- 108 -
8.8.2.7	De verdisconteringsvoet.....	- 109 -
8.8.3	Toevallige keuze van de parameterwaarden .....	- 109 -
8.8.4	Kansverdeling van economische output-parameters .....	- 109 -
8.8.4.1	Kansverdeling van de netto contante waarde.....	- 110 -
8.8.4.2	Kansverdeling van de verdisconteerde terugverdientijd.....	- 111 -
8.8.4.3	Kansverdeling van de interne rendementsvoet.....	- 113 -
8.8.4.4	Invloed op de kansverdelingen wanneer de WKC's wegvallen ...	- 114 -
8.8.4.5	Invloed op de kansverdelingen wanneer de subsidies wegvallen	- 115 -
<b>DEEL IV: CONCLUSIES .....</b>		<b>- 116 -</b>
<b>9</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>- 117 -</b>
9.1	Inhoudelijke conclusies .....	- 117 -
9.1.1	De technologische aspecten.....	- 117 -
9.1.2	De economische aspecten .....	- 118 -
9.1.3	De ecologische en energetische aspecten .....	- 119 -
9.2	Mogelijkheden voor verder onderzoek.....	- 120 -
<b>Lijst van geraadpleegde werken.....</b>		<b>- 122 -</b>
<b>Bijlagen .....</b>		<b>- 133 -</b>

# **DEEL I : Inleiding en probleemstelling**

# 1 INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING

---

## 1.1 INLEIDING

Doorheen de laatste decennia is het besef gegroeid dat er grenzen zijn aan de draagkracht van het milieu. Daarom introduceerde de Brundtlandcommissie in 1987 het begrip 'duurzame ontwikkeling' als ultieme doelstelling voor de wereldgemeenschap. Duurzame ontwikkeling behelst het tegemoetkomen aan de noden van het heden op zulke manier dat de behoeftevoorziening van de toekomstige generaties minimaal in het gedrang wordt gebracht (Dewulf, 2003).

Het tegengaan van de opwarming van de aarde is één van de grootste uitdagingen die we onder ogen moeten zien. De opwarming van de aarde of het broeikaseffect wordt gedefinieerd als de stijging van de gemiddelde temperatuur die op aarde waargenomen wordt (Rogner et al., 2007).

Om de aarde en de atmosfeer op een constante temperatuur te houden, moet inkomende zonne-energie in evenwicht gehouden worden door eenzelfde hoeveelheid uitgaande energie. Naast inkomend zonlicht heerst er een natuurlijk proces, het broeikaseffect, dat de aarde en de troposfeer opwarmt. Dit gebeurt doordat moleculen van bepaalde atmosferische gassen, broeikasgassen genaamd, de atmosfeer opwarmen door infrarode straling van de aarde te absorberen (Miller, 2005). Het gevolg van een toenemend broeikaseffect is een algemene opwarming van de aarde.

Het Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] werd door de Verenigde Naties ingesteld om de huidige wetenschappelijke, technische en sociaal-economische kennis aangaande de opwarming van de aarde te beoordelen en samen te vatten. Het probeert voorspellingen te doen omtrent de impact en gevolgen van klimaatverandering veroorzaakt door het broeikaseffect. Zo stelde het IPCC (2007) over de periode 1996-2005 een gemiddelde temperatuurstijging vast van 0,74°C.

Volgens het IPCC is het zeer waarschijnlijk dat deze temperatuurstijging te wijten is aan menselijke activiteiten. 50 miljoen jaar geleden piekte de CO<sub>2</sub>-concentratie tot 1000 ppm. De gemiddelde temperatuur lag dan ook veel hoger maar de aarde had in die tijd

15 Gton/y meer CO<sub>2</sub>-opslag dan -uitstoot. Dit CO<sub>2</sub>-gehalte daalde geleidelijk tot 290 ppm, onder meer als gevolg van het fotosynthesep proces van zeeorganismen (Kennedy & Hanson, 2006).

Sinds de industriële revolutie in de 18<sup>e</sup> eeuw wordt het natuurlijk broeikaseffect versterkt door broeikasemissies uit de antropogene sector. Zo is er onder meer een sterke stijging in het gebruik van fossiele brandstoffen waardoor grote hoeveelheden van de broeikasgassen CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> vrijkomen. Ook de menselijke ontbossing en het gebruik van anorganische meststoffen in de landbouw dragen bij tot een stijging van de concentraties van CO<sub>2</sub> en N<sub>2</sub>O (Sims et al., 2007; Miller, 2005). De aarde beschikt niet langer over extra CO<sub>2</sub> -opslagcapaciteit en het CO<sub>2</sub>-niveau stijgt in deze periode naar 380 ppm. De dag van vandaag kampt de aarde met 15 Gton meer CO<sub>2</sub> -uitstoot dan -opslag (Kennedy & Hanson, 2006). De huidige concentratie CO<sub>2</sub> bedraagt ongeveer 390 ppm en stijgt ieder jaar met 2 ppm (Stern, 2006).

De reden waarom we ons zorgen moeten maken over deze stijgende CO<sub>2</sub>-concentratie en de bijhorende opwarming van de aarde, is het feit dat we niet spreken over normale schommelingen in het lokale weer maar over een globale verandering in het klimaat, het gemiddelde weer gedurende decennia, eeuwen en millennia. De gevolgen van de klimaatverandering zijn nu al zichtbaar in tropische streken (droogtes en bosbranden) en in de poolgebieden (smelten van de ijskappen). In de komende 50 à 100 jaar verwacht het IPCC (2007) onder andere een stijging van de zeespiegel, afname van de landbouwproductiviteit, een toename van extreme weersomstandigheden, de verspreiding van ziektes zoals malaria, een zoetwatertekort en een afname van de ozonlaag.

Om de gezondheid en het economisch welzijn van onze huidige en toekomstige generaties te beschermen, is het dus noodzakelijk om onze emissies van broeikasgassen drastisch te reduceren.

Ten einde een actieplan op te stellen voor deze milieuproblematiek werd in december 1997 het Kyoto-protocol ondertekend dat in 2005 in werking trad. Het protocol betekent een belangrijke stap voorwaarts in de strijd tegen de opwarming van de aarde, aangezien het bindende en gekwantificeerde doelstellingen voor de beperking en vermindering van de uitstoot van broeikasgassen vastlegt. Naar aanleiding van dit

protocol engageert België zich om tegen 2012 de uitstoot van broeikasgassen met 7,5% te verlagen, vergeleken met het niveau van 1990 (Rogner et al., 2007).

Het Verdrag van Kyoto loopt af in 2012. Een nieuwe klimaatconferentie om de globale bewustheid en actieplannen aangaande de opwarming van de aarde actueel te houden, was dus van vitaal belang van. Deze vond plaats in december 2009 in Kopenhagen. Op deze conferentie moest de internationale gemeenschap overeenstemming vinden over een nieuwe 'global deal' ter vervanging van het Kyoto-protocol dat vastlegt hoe we de klimaatverandering in de toekomst zullen aanpakken.

Het resultaat van deze klimaatop was echter teleurstellend. Concrete, ambitieuze doelstellingen om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren, bleven uit. 13 dagen onderhandelen met 170 regeringsleiders heeft een mager 'Copenhagen Accord' opgeleverd dat geen enkele juridische waarde heeft omdat het niet unaniem werd gesteund (Klimaatop eindigt met minimaal akkoord, 2009). Er is dus ook geen sprake van een 'verdrag' zoals het Verdrag van Kyoto waarin verplichte emissie-reductiedoelstellingen werden vastgelegd.

Het 'Copenhagen Accord' bevat de intentie om de opwarming van de aarde te beperken tot 2°C tegenover het pre-industriële tijdperk. Maar met welk percentage de landen hun CO<sub>2</sub>-uitstoot gaan verminderen tegen 2020 is niet vastgelegd (Verrycken, 2009).

Wel werd op korte termijn 30 GUSD voorzien om de ontwikkelingslanden te helpen in hun strijd tegen de klimaatverandering. Zo kunnen projecten gefinancierd worden om onder andere ontbossing tegen te gaan, droogte te bestrijden en zuivere energie te ontwikkelen (Klimaatop eindigt met minimaal akkoord, 2009).

Tegen februari 2010 zouden de deelnemende landen moeten aangeven welke inspanningen ze willen leveren tegen 2020 om de CO<sub>2</sub>-uitstoot te beperken. België houdt zich eraan om de politieke verbintenissen die de Europese Unie aangaat, na te leven. De EU bevestigde dat ze het Kopenhagen-akkoord steunt en neemt het standpunt in dat de wereldwijde CO<sub>2</sub>-uitstoot nog tot uiterlijk 2020 mag groeien waarna deze tegen 2050 tot tenminste 50% onder het niveau van 1990 gedaald moet zijn. Hiertoe moeten de ontwikkelde EU-landen hun uitstoot tegen 2020 verlagen met 20% ten opzichte van het



niveau van 1990 (Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, 2009; Europa Press Releases, 2010).

## **1.2 PRAKTIJKPROBLEEM**

Om deze vooropgestelde CO<sub>2</sub>-reductie te realiseren, zal het energieverbruik drastisch moeten verminderen en/of zal er efficiënter met de eindige energiebronnen moeten omgegaan worden.

De energiebalans Vlaanderen 2008 (VITO, 2009a) toont aan dat het grootste energieverbruik voorkomt in de transformatiesector (18,8%), de residentiële sector (18,6%), de industrie (18,2%) en de transportsector (9,4%) (zie bijlage 1). Wanneer we deze energiebalans vergelijken met die van 2007 bemerken we een lichte stijging (zowel relatief als absoluut) van het energieverbruik in de residentiële sector. De andere sectoren zijn ongeveer constant gebleven. Hieruit blijkt dat er op residentieel niveau een aanzienlijk potentieel voor energiebesparing aanwezig is. Een groot deel van het energieverbruik is immers toe te schrijven aan de energiebehoeften van woningen. Hierbij denken we aan de elektriciteit en warmte voor verwarming, sanitair warm water en huishoudelijke toestellen.

Om tot een energiebesparing te komen, moet men eerst en vooral economisch en ecologisch verantwoord omgaan met de verschillende energiebronnen. Enkel door deze bronnen zuinig en efficiënt te gebruiken, kunnen we verhinderen dat toekomstige generaties niet belast worden met de negatieve gevolgen van onze huidige activiteiten. Dit rationeel energieverbruik (kortweg REG) dient op alle niveaus te gebeuren: zowel de energiebronnen, de energieomzetting als de energieconsumptie dienen met de nodige omzichtigheid aangepakt te worden (Cogen Vlaanderen, 2004).

Een volgende stap in de weg naar energiebesparing bestaat erin de rendementen van de energieproductie op te trekken, zowel in de klassieke stoom-, gas- en waterturbines als in de moderne windturbines, zonnepanelen, brandstofcellen en Stirlingmotoren.

Vervolgens is een toenemende productie van hernieuwbare energie onontbeerlijk om het hoofd te bieden aan de eindige voorraad fossiele brandstoffen. Een Europese richtlijn verplicht België om tegen 2020 13% van de energieconsumptie uit hernieuwbare energie

te halen. Ons land kampt echter met een aantal nadelen om deze doelstelling te bereiken waardoor dit aandeel nu maar 3% bedraagt (Het Europees Parlement & de Raad van de Europese Unie, 2009). Ten eerste beschikt België slechts over een beperkt potentieel voor hernieuwbare energie. Er zijn maar vier waterlopen met groot verval die een waterkrachtcentrale van elektriciteit voorzien (Energiezuinig, 2009). Bovendien biedt de korte kustlijn niet veel mogelijkheden voor windenergie. Ook het offshore windenergiepark op de Thorntonbank vormt slechts een kleine fractie van de hernieuwbare energie in België. Daarnaast maakt het gering aantal uren zonneshijns in vergelijking met andere Europese landen en de rest van de wereld dat fotovoltaïsche zonne-energie slechts een kleine bijdrage kan leveren als bron voor hernieuwbare energie (Solar 4 Power, 2009).

Het feit dat België zich hoog in de lijst van dichtbevolkte landen bevindt, levert in dit aspect geen voordeel op (World Atlas, 2010). Een grote energievraag in combinatie met weinig hernieuwbare energiebronnen verplicht ons als het ware om op andere (milieuonvriendelijkere) manieren energie te produceren.

Kernenergie vormt hier een mogelijke oplossing maar een andere interessante innovatie op dit gebied die de laatste jaren een opgang kende, is warmtekrachtkoppeling (WKK). Hierbij worden zowel warmte als elektriciteit opgewekt in één installatie die zich binnen het gebouw bevindt. In vergelijking met de klassieke gescheiden opwekking wordt er bespaard op brandstof die nodig is om warmte en elektriciteit te produceren. Deze voordelen van een WKK-installatie kunnen we op twee manieren benaderen. Bij de elektriciteitsproductie komt veel, meestal nutteloze warmte vrij. Wanneer in een WKK-installatie iets minder elektriciteit geproduceerd wordt, levert dit meer nuttige warmte op die voor verwarming gebruikt kan worden. Daarnaast kampt warmteproductie met enorme exergieverliezen. Door tegelijk elektriciteit te produceren, kunnen deze verliezen beperkt worden. WKK-installaties springen dus efficiënter om met de gegeven energie (Cogen Vlaanderen 2006).

Uit een jaarlijkse studie van het VITO (2008a) blijkt dat zowel de primaire, secundaire als tertiaire sector in Vlaanderen in stijgende lijn gebruik maken van deze techniek. Enkel de residentiële sector blijft achter. Hieronder vallen zowel grotere gebouwen zoals appartementsblokken en hotels als private woningen. Dit laatste segment biedt een enorm potentieel als je weet dat in Vlaanderen jaarlijks 100 000 – 150 000 gezinnen aan

de vervanging van hun verwarmingsketel toe zijn (Dexters, 2008). Microwarmtekrachtkoppeling ( $\mu$ WKK), dit is het principe van WKK toegepast op de residentiële sector, zou daaraan in vele gevallen een geschikte oplossing kunnen bieden. Eens de commercialisering op gang is, schatten Six en Dexters (2009) het jaarlijks potentieel op 23 000 - 46 000 eenheden.

De interesse en het onderzoek naar  $\mu$ KK is de laatste jaren enorm gestegen. Dit uit zich in enkele  $\mu$ WKK-systemen die reeds verkrijgbaar zijn op de markt. Toch moeten we constateren dat producenten slechts beperkte informatie vrijgeven betreffende de prestaties van zulke systemen en dat er bijgevolg slechts een gering aantal  $\mu$ WKK's in Vlaanderen operationeel zijn (Carbon Trust, 2007).

### **1.3 CENTRALE ONDERZOEKSVRAAG**

Uit het praktijkprobleem kunnen we afleiden dat  $\mu$ WKK op residentieel niveau weinig wordt toegepast in Vlaanderen. De volgende centrale onderzoeksvraag vormt daarom het uitgangspunt van deze eindverhandeling:

***"Een economische, ecologische en energetische analyse van residentiële  $\mu$ WKK in Vlaanderen."***

### **1.4 DEELVRAGEN**

Door het formuleren van deelvragen wordt het beantwoorden van de centrale onderzoeksvraag vereenvoudigd. Deze deelvragen spelen in op enkele specifieke aspecten van de centrale onderzoeksvraag en helpen zo om deze op een structurele manier te onderzoeken. De deelvragen in deze eindverhandeling luiden als volgt:

*1.4.1 Op welke thermodynamische concepten steunt het principe van ( $\mu$ )WKK?*

*1.4.2 Hoe wordt WKK gedefinieerd en volgens welke principes werkt een WKK-installatie?*

- 1.4.3 *Welke technologieën zijn er momenteel beschikbaar voor  $\mu$ WKK en welke technologische verwezenlijkingen worden in de (nabije) toekomst op de markt verwacht?*
- 1.4.4 *Welke voordelen en besparingen levert de implementatie van  $\mu$ WKK op economisch, energetisch en ecologisch vlak?*
- 1.4.5 *Van welke steunmaatregelen kan de eigenaar van een  $\mu$ WKK in de residentiële sector genieten?*
- 1.4.6 *Welke barrières (zowel technologische als niet-technologisch) verhinderen het onderzoek naar en de toepassing van  $\mu$ WKK's?*
- 1.4.7 *Welke factoren bepalen de economische en ecologische rendabiliteit van een  $\mu$ WKK-systeem?*

## **1.5 AFBAKENING VAN HET ONDERZOEKSDOMEIN**

Voor een duidelijk inzicht in deze eindverhandeling is het noodzakelijk dat er enkele afbakeningen gemaakt worden en dat we enige begrippen definiëren. Eerst en vooral dient opgemerkt te worden dat deze eindverhandeling handelt over '**microwarmtekrachtkoppeling**'. Dit begrip kan als volgt gedefinieerd worden:

*"Microwarmtekrachtkoppeling is de toepassing voor gezamenlijke opwekking van warmte en elektriciteit op het niveau van een huishouden hoewel het ook toepasbaar is in kleine hotels, winkels en commerciële gebouwen zoals kleine kantoren en appartementsblokken."* (COGEN Europe, z.d.; Harisson, 2004)

Uit deze definitie blijkt dat  $\mu$ WKK verschillende toepassingsgebieden heeft. In deze eindverhandeling beperken we ons echter tot de residentiële sector, meer specifiek tot het niveau van een private woning.

Hoewel er geen officiële data beschikbaar zijn, beschouwt het Vlaams Energieagentschap [VEA] (2008) WKK-systemen met een vermogen kleiner dan 50 kWe als  $\mu$ WKK-systemen.  $\mu$ WKK-systemen met een vermogen van 1 kWe kunnen een huishouden al van de benodigde warmte en elektriciteit voorzien (Entchev, 2004).

Een tweede afbakening wordt op geografisch gebied gemaakt. In deze eindverhandeling wordt enkel **Vlaanderen** in beschouwing genomen. De reden hiervoor is dat een aantal gegevens (zoals warmtekrachtcertificaten en het gemiddeld aardgasverbruik) enkel voor Vlaanderen gelden.

## **1.6 ONDERZOEKSOPZET**

Het eerste deel van deze eindverhandeling, *'Inleiding en probleemstelling'*, schetst een beeld over de huidige ( $\mu$ )WKK-problematiek, de reden waarom dit in deze eindverhandeling onderzocht gaat worden en de wijze waarop dit zal gebeuren. Het praktijkprobleem mondt uit in de centrale onderzoeksvraag *"Een economische, ecologische en energetische analyse van residentiële  $\mu$ WKK in Vlaanderen"* die verder opgesplitst wordt in een zevental deelvragen.

Het tweede deel omvat *'Algemene begrippen over ( $\mu$ )WKK'* en maakt gebruik van primaire, secundaire en tertiaire bronnen (Sekaran, 2003). De primaire bronnen zijn in dit geval vooral wetenschappelijke papers, gepubliceerd door relevante instanties en organisaties die onderzoek voeren naar warmtekrachtkoppeling. Hier komen vooral Vlaamse maar ook Belgische en Europese instellingen aan bod. Op Vlaams niveau nemen *COGEN Vlaanderen*, de *Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (VREG)* en de *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO)* het voortouw. Maar ook de *Vlaamse Milieu Maatschappij (VMM)* en *Milieurapport Vlaanderen (MIRA)* bezorgen ons nuttige informatie. Vervolgens bieden de verschillende federale overheidsdiensten ook bruikbare gegevens voor deze eindverhandeling. Tot slot vormen *COGEN Europe* en *Carbon Trust* (Groot-Brittannië) nog een belangrijke bron van informatie.

De secundaire bronnen die gehanteerd worden zijn tal van Belgische kranten, professionele vaktijdschriften en verschillende hand- en leerboeken. Ook tertiaire bronnen zoals literatuurlijsten en databanken geven toegang tot nieuwe gegevens.

Gezien de materie en de technologieën rond warmtekrachtkoppeling snel evolueren, is het noodzakelijk dat we hiermee rekening houden bij de keuze van de literatuur. In deze

eindverhandeling worden dan ook hoofdzakelijk bronnen gebruikt vanaf het jaar 2000 tot heden.

Verder zullen de deelvragen en de centrale onderzoeksvraag beantwoord worden door contact op te nemen met relevante personen en organisaties (Cogen Vlaanderen, VREG, VITO,...).

Tenslotte biedt het derde deel, de '*Praktijkstudie*', een raakvlak met de realiteit. Hierin zal de economische en ecologische rendabiliteit van een  $\mu$ WKK in Vlaanderen onderzocht worden. Er zal tevens een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd worden om de bekomen resultaten correct te interpreteren.

Dit alles zal leiden tot een aantal besluiten en aanbevelingen in het vierde deel, '*Conclusies*'. Ook zullen een aantal mogelijkheden voor verder onderzoek aangegeven worden.

# **DEEL II : Algemene begrippen over ( $\mu$ )WKK**

## 2 THERMODYNAMICA

---

Alvorens deze eindverhandeling zich toelegt op het begrip (micro)warmtekrachtkoppeling en de daarbij horende technologische, economische en ecologische aspecten is het nuttig om eerst kennis te maken met de onderliggende thermodynamische principes.

Thermodynamica ontleent haar naam aan de Griekse woorden 'θερμη' en 'δυναμις' die respectievelijk 'warmte' en 'vermogen' betekenen. We kunnen thermodynamica dan ook definiëren als de wetenschap van de omzettingen tussen warmte en andere vormen van energie (Çengel & Boles, 2002).

### 2.1 ENERGIE

Onze moderne, technologische maatschappij is ondenkbaar zonder het gebruik van energie. Door de vele manieren waarop energie gebruikt wordt, is het moeilijk om een precieze definitie te geven. In een moderne definitie bestaan er twee soorten energie:

- de energie van een foton en
- de energie van materie.

#### 2.1.1 Elektromagnetische energie

Fotonen vinden we terug in de kwantumtheorie en zijn massalozе deeltjes. Ze zijn een verschijningsvorm van elektromagnetische straling. De energie van een foton wordt als volgt gegeven:

$$E = h\nu$$

waarbij  $h$  = de constante van Planck =  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Js

$\nu$  = frequentie (aantal golven per seconde) (Giancoli, 2005)

#### 2.1.2 Energie van materie

Materie wordt in de natuurkunde gezien als de bouwsteen waaruit de (waarneembare) wereld is opgebouwd. In tegenstelling tot fotonen bezit materie wel een massa. De energie van materie wordt beschreven aan de hand van de relativiteitstheorie van Einstein:



$$E = mc^2$$

waarbij  $m$  = massa

$c$  = lichtsnelheid

Indien  $v$  = de snelheid en  $m_0$  = de rustmassa, kan de massa  $m$  ook omschreven worden als:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$m = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$
$$m \approx m_0 + \frac{m_0 v^2}{2c^2}$$

Deze laatste stap volgt uit de ontwikkeling van een oneindige reeks<sup>1</sup>. Bijgevolg is de energie van materie benaderd gelijk aan:

$$E \approx \frac{1}{2} m_0 v^2$$

waarbij  $\frac{1}{2} m_0 v^2$  = kinetische energie

### **2.1.2.1 Globale kinetische energie**

Een systeem in beweging heeft de capaciteit om arbeid te verrichten en bezit dus energie (Giancoli, 2005). Deze bewegingsenergie wordt kinetische energie genoemd en kan op twee niveaus bekeken worden.

Op macroscopisch niveau spreken we van globale bewegingsenergie waarbij alle atomaire deeltjes gezamenlijk bewegen. Het is bijgevolg een geordende vorm van energie. Deze werd door Newton in de volgende formule vastgelegd:

$$KE = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

waarbij  $m$  = massa in kg

$v$  = snelheid in m/s

---

<sup>1</sup> Indien  $|x| < 1$  geldt:  $(1 + x)^\alpha = 1 + \alpha x + \binom{\alpha}{2} x^2 + \dots$   
Indien  $|x| \ll 1$  geldt:  $(1 + x)^\alpha \approx 1 + \alpha x$

### **2.1.2.2 Warmte-energie**

Microscopische bewegingsenergie is beter gekend als warmte, waarbij de atomaire deeltjes in willekeurige richtingen bewegen. Warmte is een ongeordende energievorm omdat eenzelfde energietoestand bereikt kan worden door verschillende verdelingen van de energiekwanta over de atomaire deeltjes (Giancoli, 2005).

$$Q = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2$$

waarbij  $Q$  = warmte

$m_i$  = massa van het atomaire deeltje

$v_i$  = snelheid van het atomaire deeltje

### **2.1.3 Potentiële energie**

De potentiële energie die een systeem bezit is de (kinetische) energie die het kan krijgen als gevolg van specifieke eigenschappen. Afhankelijk van deze eigenschappen zijn er drie vormen van potentiële energie te onderscheiden: gravitatie-energie, elektrische energie en kernenergie (Lemeire, 2002).

#### **2.1.3.1 Gravitatie-energie**

De energie die een systeem bezit als gevolg van haar hoogte in een gravitationeel veld definiëren we als gravitatie-potentiële energie. In formulevorm geeft dit:

$$PE = m \cdot g \cdot h$$

waarbij  $m$  = massa in kg

$g$  = gravitatieversnelling (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$h$  = hoogte in m (Çengel & Boles, 2002)

#### **2.1.3.2 Elektrische energie**

Zowel elektrostatische als elektrodynamische energie zijn vormen van elektrische potentiële energie. De elektrostatische energie van een systeem wordt bepaald door de

plaats van de materie en door de grootte van haar elektrische lading. Een voorbeeld hiervan is chemische bindingsenergie. Elektrodynamische energie wordt veroorzaakt door bewegende materie die een wisselende elektrische invloed uitoefent op een elektrische lading in een bepaald punt (Lemeire, 2002).

### **2.1.3.3 Kernenergie**

Kernenergie is de (kinetische) energie die veroorzaakt wordt door de zwakke en sterke interacties tussen de subatomaire deeltjes in een atoomkern (Lemeire, 2002).

### **2.1.4 Eenheden van energie**

De standaardeenheid voor energie is de joule J. Aangezien  $1J = 1 kg \frac{m^2}{s^2}$ , heeft 1J betrekking op de energie van een massa van 1 kg met een snelheid van 1m/s. Vermits één joule betrekking heeft op een zeer kleine hoeveelheid energie worden vaak veelvoudigen gebruikt zoals kilojoule (kJ) en megajoule (MJ) (VMM, 2007a).

Naast de joule is ook de kilowattuur (kWh) een veel gebruikte energie-eenheid. W staat voor Watt en is de eenheid van vermogen. Daar vermogen de hoeveelheid energie (J) is die per seconde (s) wordt gebruik of opgewekt, kunnen we stellen dat  $1 W = 1 J/s$ . Daarnaast weten we dat één uur 3600 seconden bevat en 1000 wattuur gelijk is aan één kilowatt. Hieruit berekenen we dat  $1 kWh = 3,6 MJ$  (VMM, 2007a).

## **2.2 SOORTEN SYSTEMEN**

In deze studie van thermodynamica wordt regelmatig verwezen naar bijzondere systemen. Een systeem beschrijven we als elk voorwerp of geheel van voorwerpen die we willen beschouwen. Al het andere in de ruimte definiëren we als 'de omgeving' (Giancoli, 2005). Deze paragraaf is bedoeld om een onderscheid te maken tussen de verschillende systemen.

Een thermodynamisch systeem kan op twee manieren energie uitwisselen met de omgeving. Enerzijds kan er energie-uitwisseling plaatsvinden door de toe- of afvoer van

een bepaalde hoeveelheid warmte  $\Delta Q$ . Anderzijds kan de toe- of afvoer van uitwendige arbeid  $\Delta W$  voor energie-uitwisseling zorgen (Giancoli, 2005). De verschillende categorieën van systemen worden hier kort besproken.

### **2.2.1 Open systeem**

Een open systeem kan zowel energie als materie uitwisselen met haar omgeving. Wanneer we een open systeem bestuderen, moeten we dus rekening houden met deze invloeden van de omgeving. De meeste mechanische systemen in de thermodynamica zijn open systemen. Voorbeelden hiervan zijn turbines, compressoren en warmtewisselaars (Giancoli, 2005).

### **2.2.2 Gesloten systeem**

In een gesloten systeem kan geen materie maar wel energie met de omgeving uitgewisseld worden (Giancoli, 2005). Bij het bestuderen van een gesloten systeem hebben we te maken een constante hoeveelheid materie maar moeten we rekening houden met o.a. de omgevingstemperatuur en het warmtetransport dat hier vandaan komt. De  $\mu$ WKK's op basis van een Stirlingmotor waar deze eindverhandeling zich op baseert vallen onder de gesloten systemen: er vindt geen stofuitwisseling met de omgeving plaats, enkel energieuitwisseling (Energik, 2004).

### **2.2.3 Geïsoleerd systeem**

Dit systeem is een bijzonder geval van een gesloten systeem. Noch materie noch energie kunnen met de omgeving uitgewisseld worden (Giancoli, 2005). De hoeveelheid energie van zo'n systeem is dus steeds constant.

### **2.2.4 Adiabatisch systeem**

In een adiabatisch systeem kan er geen uitwisseling van warmte plaatsvinden. Er bestaan zowel adiabatisch open als adiabatisch gesloten systemen. Hier kan respectievelijk wel en geen materie uitgewisseld worden door de grenzen van het systeem. Uitwisseling van arbeid is in een adiabatisch systeem wel mogelijk (Giancoli, 2005).

## **2.3 DE HOOFDWETTEN VAN DE THERMODYNAMICA**

Wanneer men een systeem vanuit thermodynamisch standpunt bestudeert, zal men steeds uitgaan van de hoofdwetten van de thermodynamica. Deze leggen de basis voor de fundamentele concepten in de thermodynamica. Hoewel vooral de eerste en tweede hoofdwet relevant zijn voor het principe van warmtekrachtkoppeling worden de nulde, derde en vierde hoofdwet ter volledigheid ook gegeven.

### **2.3.1 Nulde hoofdwet van de thermodynamica**

*"Wanneer twee systemen onafhankelijk van elkaar in thermisch evenwicht zijn met een derde systeem, zijn ze ook in thermisch evenwicht met elkaar."* (Çengel & Boles, 2002)

Dit wil zeggen dat er geen spontane warmte-uitwisseling plaatsvindt. De drie systemen hebben dezelfde temperatuur. Impliciet definieert de nulde hoofdwet dus dat temperatuur als een indicator dient voor thermisch evenwicht.

De vreemde nummering van 'nulde' hoofdwet is historisch van aard. Het is een basisprincipe dat al lang werd aangenomen maar het belang ervan werd pas ingezien na de formulering van de eerste, tweede en derde hoofdwet. Vermits dit principe als een basis dient voor de volgende wetten en dus hieraan moet voorafgaan, kreeg het de nulde plaats toegemeten (Çengel & Boles, 2002).

### **2.3.2 Eerste hoofdwet van de thermodynamica**

*"Energie kan niet uit het niets ontstaan noch vernietigd worden. Het kan enkel van vorm veranderen."* (Çengel & Boles, 2002)

Deze wet staat tevens gekend als "de wet van behoud van energie" en kan ook als volgt geformuleerd worden: de nettoverandering in de totale energie van een systeem gedurende een proces is gelijk aan het verschil tussen de totale energie die het systeem binnenkomt en de totale energie die het systeem verlaat gedurende het proces (Moran & Shapiro, 1998). Deze relatie wordt weergegeven in de energiebalans:

$$E_{in} - E_{uit} = \Delta E_{systeem}$$

In figuur 3.1 van volgend hoofdstuk zal deze energiebalans verduidelijkt worden.

Voor gesloten systemen kunnen we de eerste hoofdwet ook schrijven in termen van interne energie  $U$ : de verandering van interne energie  $\Delta U$  van een gesloten systeem is gelijk aan het verschil van toegevoegde thermische energie (warmte  $\Delta Q$ ) en de mechanische energie (arbeid  $\Delta W$ ) geleverd door het systeem op de omgeving (Giancoli, 2005):

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

waarbij we de volgende tekenovereenkomsten maken:

$\Delta Q$  is positief wanneer meer warmte wordt toegevoegd dan afgevoerd

$\Delta W$  is positief wanneer het systeem meer arbeid levert dan verbruikt

Dit betekent dat wanneer er bijvoorbeeld warmte aan een systeem wordt toegevoegd, de interne energie van het systeem zal toenemen of/en dat het systeem meer arbeid zal leveren. In geval van een WKK zal door toevoeging van warmte aan het systeem arbeid geleverd worden waardoor de motor in werking treedt. De verschillende  $\mu$ WKK-technologieën worden besproken in hoofdstuk 3.

### **2.3.3 Tweede hoofdwet van de thermodynamica**

De eerste hoofdwet geeft de voorwaarde waaraan een proces moet voldoen om plaats te vinden maar zegt niets over de richting van het proces. Voldoen aan de eerste wet garandeert echter niet *of* het proces wel degelijk zal plaatsvinden. Daarom werd de tweede hoofdwet geïntroduceerd die bepaalt dat processen altijd in een bepaalde richting plaatshebben (Çengel & Boles, 2002).

Daarnaast bepaalt de tweede hoofdwet dat energie niet alleen een kwantiteit maar ook *kwaliteit* bezit. Het is in dit opzicht dat men deze wet ook "de wet van de toenemende entropie" noemt. Entropie ( $S$ ) wordt gebruikt om de graad van wanorde van een systeem te beschrijven. Het is een maat voor de onbruikbaarheid van de energie in een systeem.

### **2.3.3.1 Macroscopische definitie van entropie**

Boltzmann heeft aangetoond dat de entropie van een macroscopisch systeem gedurende een reversibel en isothermisch proces gedefinieerd kan worden als

$$S = \frac{Q}{T}$$

waarbij  $Q$  = de toegevoegde hoeveelheid warmte tijdens een reversibel isotherm proces  
 $T$  = de absolute temperatuur (273°K) (Lemeire, 2002)

### **2.3.3.2 Microscopische definitie van entropie**

Eén macroscopische toestand kan het gevolg zijn van vele microscopische toestanden (N). Of omgekeerd: vele microscopische toestanden (N) kunnen aanleiding geven tot eenzelfde macroscopische toestand. Naarmate N groter is, neemt de wanorde van een systeem toe. In formulevorm geeft dit:

$$S = k \ln N$$

waarbij  $S$  = de entropie

$k$  = de constante van Boltzmann =  $1,38 * 10^{-23}$  J/K

$N$  = het aantal mogelijke microtoestanden om tot de globale energietoestand te komen (Lemeire, 2002)

### **2.3.3.3 Paradox van de entropie en de temperatuur**

Uit deze laatste definitie van wanorde blijkt een paradox indien we zowel een hoeveelheid materie als een hoeveelheid energie beschouwen (Lemeire, 2002).

Voor een bepaalde hoeveelheid materie geldt: indien de temperatuur stijgt, stijgt ook de energie van de materie waardoor het aantal mogelijke microtoestanden N toeneemt. Volgens de formule  $S = k \ln N$  wordt de wanorde van een hoeveelheid materie dus groter naarmate de temperatuur groter is.

Voor een hoeveelheid energie geldt deze redenering echter niet. Bij een hogere temperatuur is de energie immers verdeeld over een kleinere hoeveelheid materie en dus

minder microtoestanden  $N$ . De wanorde van een bepaalde hoeveelheid energie is bijgevolg kleiner naarmate de temperatuur groter is.

#### **2.3.3.4 Gevolgen van entropiestijging**

Wanneer de onbruikbaarheid van de energie toeneemt en de bruikbaarheid afneemt, neemt de entropie en dus ook de chaos toe (Çengel & Boles, 2002). Hoewel de hoeveelheid energie (volgens de eerste hoofdwet) in een systeem constant blijft, neemt de kwaliteit van de energie af naarmate de tijd vordert. De omzetting van bruikbare in onbruikbare energie gaat gepaard met een onherroepelijk verlies aan kwaliteit. Het begrip exergie is hier nauw mee verbonden en wordt verder in dit hoofdstuk besproken.

Algemeen kunnen we de tweede hoofdwet als volgt formuleren:

*"Een geïsoleerd systeem streeft steeds naar meer wanorde."* (Kardar, 2007)

In termen van entropie geeft dit:

$$\frac{dS}{dt} > 0$$

#### **2.3.4 Derde hoofdwet van de thermodynamica**

*"Voor een hoeveelheid materie is de wanorde des te hoger naarmate de temperatuur hoger is. De laagste temperatuur (0°K) komt overeen met volledige orde."* (Lemeire, 2002)

Deze wet creëert een absoluut referentiepunt voor de bepaling van de entropie. Dit stelt ons in staat om een waarde te geven aan de entropie in een systeem. Hoewel de entropie nul wordt bij de absolute nultemperatuur zal de energie van een systeem niet nul bedragen omwille van de nulpuntsenergie (Çengel & Boles, 2002).

#### **2.3.5 Vierde hoofdwet van de thermodynamica**

*"Voor een systeem in evenwicht bestaat er een verband tussen druk, volume en temperatuur."* (Kardar, 2007)



Voor een ideaal gas geldt de wet van Boyle-Gay Lussac:

$$pV = nRT$$

waarbij  $p$  = de druk van het systeem (Pa)

$V$  = het volume van het systeem ( $m^3$ )

$n$  = de hoeveelheid gas (mol)

$R$  = de gasconstante: 8,317 J/ (mol K)

$T$  = de absolute temperatuur: 273°K (Lemeire, 2002)

## 2.4 REVERSIBELE PROCESSEN

Moran en Shapiro (1998) omschrijven een reversibel proces als een proces dat omgekeerd kan worden zonder enig spoor na te laten op de omgeving. Met andere woorden, zowel het systeem als alle onderdelen van de omgeving kunnen exact hersteld worden in hun initiële staat nadat het proces heeft plaatsgevonden. Dit soort processen komt echter nooit voor in de natuur. We moeten ze als louter hypothetisch beschouwen: het ideale limietgeval van de overeenkomstige irreversibele processen. Door de werkelijke prestatie van een proces te vergelijken met dit theoretisch optimum wordt er inzicht verworven in het potentieel om te verbeteren.

Een proces dat niet omkeerbaar is, wordt irreversibel genoemd. Factoren die een proces irreversibel maken zijn o.a. wrijving, elektrische weerstand, chemische reacties en warmteoverdracht (Çengel & Boles, 2002).

## 2.5 ISENTROPISCHE PROCESSEN

Volgens de tweede hoofdwet neemt de wanorde in een geïsoleerd systeem steeds toe. Deze entropieverandering kan veroorzaakt worden door warmteoverdracht en factoren die een proces irreversibel maken. Dit heeft als gevolg dat elk proces in een geïsoleerd systeem onomkeerbaar is: een vorige toestand kan nooit een tweede maal bekomen worden. Men kan wel trachten de toename van de entropie zo laag mogelijk of zelfs constant te houden. Een dergelijk theoretisch proces waarbij de entropie constant blijft, noemt men een isentropisch proces. Hiervoor geldt:

$$\frac{dS}{dt} = 0$$

In de praktijk zijn de meeste systemen, zoals pompen en turbines, bij benadering adiabatisch in hun werking. Ze presteren het beste wanneer de factoren die onomkeerbaarheid veroorzaken, zoals wrijving geassocieerd met het proces, geminimaliseerd worden. Dit soort processen laten ons toe om de werkelijke prestatie van apparaten of systemen te vergelijken met de prestatie onder geïdealiseerde omstandigheden (Çengel & Boles, 2002).

## 2.6 EXERGIE EN ANERGIE

In het kader van warmtekrachtkoppeling spelen warmte en elektrische energie een belangrijke rol. Het zijn beide vormen van energie maar ze zijn niet gelijkwaardig. Om een zinvolle vergelijking te maken tussen de verschillende energievormen, dienen we rekening te houden met de omzetbaarheid van een soort energie in een andere energievorm. In dit opzicht hebben we een nieuw begrip nodig om de kwaliteit van energie te beschrijven, nl. *exergie*.

De maximale hoeveelheid geordende energie die men uit een bepaalde energievorm kan halen, noemt men de exergie  $E_x$  van die energie. De anergie  $B$  is de hoeveelheid energie die verloren gaat of nutteloos wordt tijdens een isentropisch proces (Çengel & Boles, 2002). Voor iedere energievorm geldt dus het volgende:

$$E = E_x + B$$

*Energie = exergie + anergie*

Elektrische energie is een geordende energievorm en is net zoals mechanische energie 100% omzetbaar in andere vormen en bestaat dus volledig uit exergie. Dit noemen we een hoogwaardige energievorm. Thermische energie (warmte) daarentegen is een ongeordende vorm van energie maar kan door middel van thermische motoren omgezet worden in geordende energie (exergie). Deze omzetting zal echter slechts gedeeltelijk plaatsvinden. De tweede hoofdwet stelt immers dat indien een deel van de warmte geordend wordt, het andere deel nog meer wanorde krijgt. Het resultaat is dan een gestegen wanorde van het geheel (van Kimmenaede, 1989).

Het exergieaandeel van een hoeveelheid warmte is de maximale hoeveelheid mechanische energie die uit deze warmte kan worden verkregen (Çengel & Boles, 2002). Concreet wordt dit weergegeven door de volgende formule:

$$E_x = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) * Q = \eta_c * Q$$

waarbij  $E_x$  = exergieaandeel

$T_0$  = omgevingstemperatuur

$T$  = temperatuur van de warmtebron

$Q$  = hoeveelheid warmte

$\eta_c = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$  = thermisch of Carnotrendement (van Kimmenaede, 1989)

De omzetting van anergie in exergie is niet mogelijk. Dit zou immers in strijd zijn met de definitie die we aan anergie hebben gegeven (van Kimmenaede, 1989). De omzetting van exergie in anergie is wel mogelijk maar niet wenselijk omdat dit een technisch onbruikbare vorm van energie zou opleveren.

Vermits alle natuurlijke processen irreversibel zijn, daalt de exergie van een geïsoleerde hoeveelheid energie voortdurend, een omzetting die op geen enkele manier ongedaan kan worden gemaakt. Er treedt dus een voortdurende degradatie van energie op daar exergie de energievorm is waar het in de techniek op aankomt (van Kimmenaede, 1989). In tegenstelling tot 'energieverlies' kunnen we wel zinvol spreken van 'exergieverlies'.

Deze exergieverliezen moeten zoveel mogelijk vermeden worden en het is logisch om een systeem of installatie op grond van dit aspect te beoordelen. Hiervoor gebruiken we het *exergetisch rendement*  $\eta_{ex}$  om de kwaliteit van de energieomzetting te beoordelen. Dit is een bruikbaar criterium omdat de waarde ervan enkel bepaald wordt door de verliezen die theoretisch vermeden kunnen worden (van Kimmenaede, 1989). Dit criterium wordt verder in dit hoofdstuk besproken.

## 2.7 THERMODYNAMISCHE PRESTATIEMAATSTAVEN

Rendement is een veelgebruikte term in de thermodynamica en wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de verkregen output en de daarvoor vereiste input. Met andere woorden, het geeft aan hoe efficiënt energie wordt omgezet of overgedragen tijdens een proces (Çengel & Boles, 2002). Deze parameter wordt gebruikt om de thermodynamische prestatie van een installatie te beoordelen en vergemakkelijkt de onderlinge vergelijking tussen alternatieve technologieën (COGEN Vlaanderen, 2006). De belangrijkste rendementen die in deze eindverhandeling aan bod zullen komen, worden hierna kort toegelicht.

### 2.7.1 Het mechanisch rendement

$$\eta_m = \frac{P_s}{H_f} = \frac{P_s}{w_f * H_u}$$

waarbij  $\eta_m$  = mechanisch rendement  
 $P_s$  = asvermogen van de krachtbron (in Watt)  
 $H_f = w_f * H_u$  = brandstofvermogen verbruikt in het systeem  
 $w_f$  = massadebiet van de brandstof (in kg/s)  
 $H_u$  = de onderwaarde<sup>2</sup> van de brandstof (in J/kg)

Het brandstofvermogen  $H_f$  komt niet geheel beschikbaar als effectief vermogen  $P_s$  voor de installatie. Dit verschil is te wijten aan wrijvingsverliezen en de aandrijving van hulpwerktuigen (Ouwehand, Papa, Post, & Taal, 1998).

### 2.7.2 Het elektrisch rendement

$$\eta_e = \frac{P_e}{H_f} = \frac{P_e}{w_f * H_u}$$

---

<sup>2</sup> De hoeveelheid warmte die vrijkomt uit de chemische bindingsenergie noemt men de bovenwaarde of verbrandingswaarde van een brandstof. De onderwaarde of de netto-stookwaarde van een brandstof is de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij verbranding zonder de warmte nodig voor de opwarming van de brandstof en de verdamping van gassen mee te rekenen (A. Lemeire, persoonlijke communicatie, 9 november 2009).

waarbij  $\eta_e$  = elektrisch rendement  
 $P_e$  = netto-elektrisch<sup>3</sup> vermogen geleverd door het systeem (in Watt)

Dit rendement geeft de verhouding weer tussen het nuttig geleverde elektrisch vermogen en het hiervoor benodigde brandstofvermogen (Ouwehand et al., 1998).

### 2.7.3 Het thermisch rendement

$$\eta_q = \frac{P_q}{H_f} = \frac{P_q}{w_f * H_u}$$

waarbij  $\eta_q$  = thermisch rendement  
 $P_q$  = nuttig thermisch vermogen geleverd door het systeem (in Watt)

Het thermisch rendement omschrijft welk deel van de toegevoerde warmte men onder bepaalde voorwaarden kan omzetten in mechanische energie (van Kimmenaede, 1989). Zoals eerder vermeld kan het thermisch rendement ook uitgedrukt worden in termen van temperatuurgrenzen:

$$\eta_c = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

waarbij  $\eta_c$  = thermisch rendement  
 $T_0$  = omgevingstemperatuur  
 $T$  = temperatuur van de warmtebron (van Kimmenaede, 1989)

### 2.7.4 Het energetisch rendement van een WKK

$$\eta_{WKK} = \eta_e + \eta_q = \frac{P_e + P_q}{w_f * H_u}$$

Zoals de formule vermeldt, bestaat het totale energetisch rendement van een warmtekrachtkoppelingssysteem uit de som van het elektrisch en het thermisch rendement en wordt ook de *totale brandstofbenuttigingsgraad* genoemd. Deze maatstaf kan echter misleidend zijn. Bij de bespreking van exergie merken we op dat warmte en elektriciteit niet zomaar vergelijkbaar zijn. Elektriciteit heeft immers een hogere

---

<sup>3</sup> Met 'netto' bedoelt men het bruto vermogen van een generator verminderd met het vereiste vermogen voor de hulpapparatuur en hulpsystemen (COGEN Vlaanderen, 2006).

energiekwaliteit dan warmte. Ten gevolge hiervan kunnen we warmte en elektriciteit niet zomaar optellen (Cogen Vlaanderen, 2006). De volgende maatstaf houdt hier rekening mee.

### 2.7.5 Het exergetisch rendement van een WKK

$$\zeta_{WKK} = \frac{P_e + P_q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}{E_f} = \frac{P_e + P_q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}{w_f * \varepsilon_f}$$

waarbij  $E_f = w_f * \varepsilon_f =$  energieflex van de brandstof

$\varepsilon_f =$  specifieke exergie (exergie per massa-eenheid) van de brandstof

In deze maatstaf wordt het thermisch vermogen gecorrigeerd met factor  $\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$ . Hierdoor kunnen elektriciteit en warmte op een juiste manier vergeleken worden (Cogen Vlaanderen, 2006).

### 2.7.6 De kracht-warmteverhouding

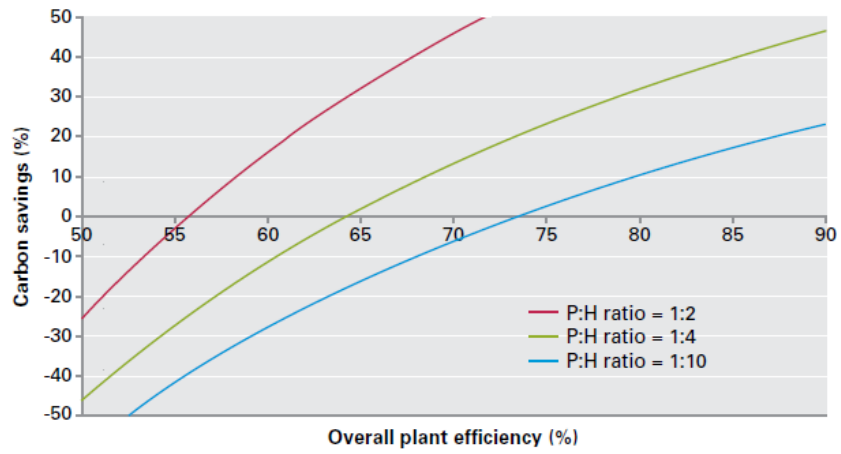
Tenslotte kan de verhouding tussen de geproduceerde hoeveelheid warmte en de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit bepaald worden. Dit noemt men de kracht-warmteverhouding of de Power to Heat Ratio (PHR) (Cogen Vlaanderen, 2006):

$$PHR = \frac{P_e}{P_q}$$

waarbij  $P_e =$  netto-elektrisch vermogen geleverd door het systeem (in Watt)

$P_q =$  nuttig thermisch vermogen geleverd door het systeem (in Watt)

De kracht-warmteverhouding van een WKK-systeem wordt beschouwd als een sleutelparameter om de potentiële emissiebesparingen te schatten. Hoe hoger de kracht-warmteverhouding, hoe groter het aandeel van de elektrische output en hoe groter bijgevolg de potentiële emissiereducties bij een gegeven energie-input (Carbon Trust, 2007). Figuur 2.1 illustreert de theoretische CO<sub>2</sub>-besparingen voor  $\mu$ WKK-systemen met verschillende kracht-warmteverhoudingen.



Figuur 2.1: Theoretische CO<sub>2</sub>-besparingen voor verschillende kracht-warmteverhoudingen (Carbon Trust, 2007)

## 3 HET CONCEPT WARMTEKRACHTKOPPELING

---

### 3.1 OMSCHRIJVING EN DEFINITIE

De conventionele manier waarop meestal voldaan wordt aan de behoeften van warmte en elektriciteit is de aankoop van elektriciteit van een energieleverancier via het lokale elektriciteitsnet en het opwekken van warmte in een verbrandingsketel door het verbranden van een bepaalde brandstof. De toepassing van WKK kan echter leiden tot een efficiëntere benutting van de brandstof in vergelijking met bovenstaande conventionele wijze. Dit voordeel van een WKK-installatie kan op twee manieren benaderd worden. Tijdens de elektriciteitsproductie in een centrale komt veel, meestal nutteloze warmte vrij. Indien in een WKK-installatie minder elektriciteit geproduceerd wordt, levert dit meer nuttige warmte op die voor verwarming gebruikt kan worden. Daarnaast kampt warmteproductie met enorme exergieverliezen. Door gelijktijdig elektriciteit te produceren, kunnen deze verliezen beperkt worden. WKK-installaties springen dus efficiënter om met de gegeven energie.

Een definitie van warmtekrachtkoppeling die in de literatuur vaak voorkomt is:

*"de gecombineerde productie van elektrische (of mechanische) en nuttige thermische energie, uitgaande van eenzelfde primaire<sup>4</sup> energiebron."* (Cogen Vlaanderen, 2006)

WKK is dus de gelijktijdige omzetting van een energiebron in zowel elektrische als thermische energie. Een andere regelmatig voorkomende benaming voor WKK is 'cogeneratie'. In de Engelstalige literatuur vinden we de termen 'Cogeneration' en 'CHP<sup>5</sup>' terug.

Een WKK-proces kan gebaseerd zijn op verschillende technologieën. Deze zullen in het volgende hoofdstuk aan bod komen. Ook de primaire energiebron kan variëren tussen een aantal brandstoffen gaande van fossiele brandstoffen tot biomassa en brandstofcellen (Cogen Vlaanderen, 2006).

---

<sup>4</sup> Onder primaire energie verstaat men die energie die niet ontstaan is door omzetting van een andere vorm van energie (Cogen Vlaanderen, 2004).

<sup>5</sup> CHP staat voor Combined Heat and Power.



### **3.2 CONVENTIONELE WIJZE VAN ENERGIEVOORZIENING**

De energievraag van een huis of bedrijf bestaat hoofdzakelijk uit warmte en elektriciteit. Elektriciteit is, in tegenstelling tot warmte, gemakkelijk te transporteren en wordt daarom centraal opgewekt door de leverancier. De benodigde warmte wordt lokaal bij de gebruiker geproduceerd. Hier spreekt men dan ook van gescheiden opwekking van warmte en kracht.

Het probleem bij gecentraliseerde energiecentrales is dat ze grote hoeveelheden warmte in de atmosfeer lozen via koeling en uitlaatgassen. Deze geloosde warmte zou (voor een deel) benut kunnen worden om aan de warmtebehoefte in of nabij zo'n centrale te voldoen. Dit zou de brandstofbenuttigingsgraad van een centrale aanzienlijk kunnen doen stijgen. Door het niet recupereren van deze restwarmte kennen de conventionele centrales slechts een brandstofbenutting van ruwweg 35 tot maximaal 60% (Cogen Vlaanderen, 2006).

Ook situeert zich een probleem bij de opwekking van warmte door een brandstof te verbranden in boilers of ketels die dichtbij de gebruiker gelegen zijn. In het vorige hoofdstuk bemerkten we reeds dat warmte een laagwaardige energievorm is waarvan de kwaliteit afneemt naarmate de temperatuur daalt. In deze toestellen wordt de warmte opgewekt op een relatief lage temperatuur (ongeveer 90°). Dit betekent dat een energievorm van hoge kwaliteit (de brandstof) wordt omgezet in een energievorm van lage kwaliteit (warmte op lage temperatuur). Hieruit kunnen we concluderen dat er aanzienlijke kwaliteits- of exergie verliezen gepaard gaan met de gescheiden warmteproductie (Cogen Vlaanderen, 2006). Dit past uiteraard niet in het kader van efficiëntie brandstofbenutting vermits er kostbare exergie verloren gaat.

In de volgende paragraaf illustreren we hoe warmtekrachtkoppeling tegemoet kan komen aan deze tekortkomingen.

### **3.3 WKK ALS ALTERNATIEF**

In tegenstelling tot de bovenvermelde centrale elektriciteitsproductie, worden bij warmtekrachtkoppeling zowel warmte als elektriciteit bij de gebruiker opgewekt.

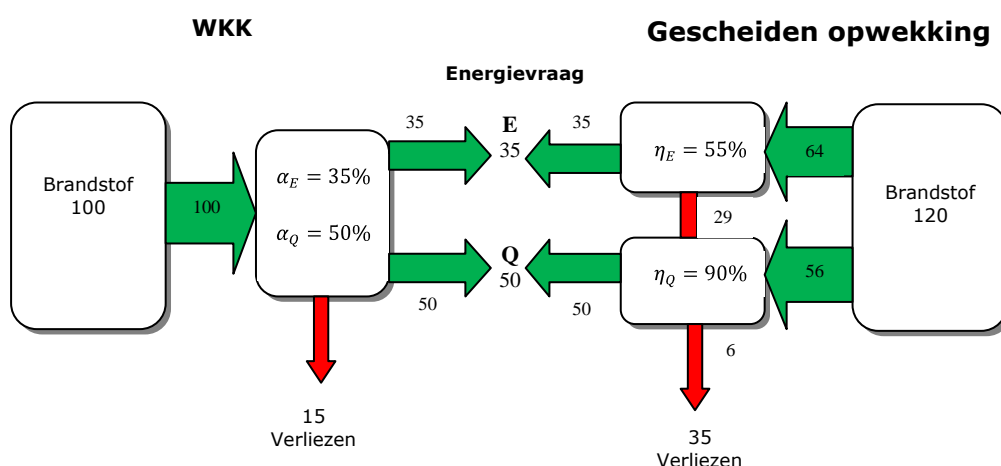
Bovendien worden deze twee energievormen uit één primaire brandstof en in één installatie voortgebracht.

Bij warmtekrachtkoppeling wordt de hoogwaardige energie (warmte op hoge temperatuur, 1200°C) die vrijkomt bij het verbranden van de brandstof eerst gebruikt voor het produceren van mechanische energie, die vervolgens via een alternator wordt omgezet in elektriciteit. Hierna blijft laagwaardige restwarmte (500°C) over die dan gebruikt wordt voor de verwarming van sanitair water of voor een verwarmingscircuit. Op deze manier bekomt men dus een hoger exergetisch rendement (Cogen Vlaanderen, 2004; Cogen Vlaanderen, 2006).

Een WKK-installatie wordt bij voorkeur dan ook gedimensioneerd op de warmtevraag, meer specifiek op basislast en niet op pieklast zoals een verwarmingsketel. Hiertoe heeft men een jaarbelastingsduurcurve nodig. Het teveel of te weinig aan geproduceerde elektriciteit wordt via het elektriciteitsnet opgevangen. Om aan de thermische pieklast te kunnen voldoen, heeft men een bijkomende ketel of warmtebuffer nodig (Cogen Vlaanderen, 2006; Cogen Vlaanderen, 2008).

### 3.4 WKK VERSUS CONVENTIONELE ENERGIEVOORZIENING

Om een vergelijking te kunnen maken tussen de gecombineerde energieconversie in een WKK-installatie en de gescheiden productie in een elektrische centrale enerzijds en een ketel voor warmteproductie anderzijds, maken we gebruik van figuur 3.1.



Figuur 3.1: Schema vergelijking WKK en gescheiden opwekking

Een klassieke elektriciteitscentrale kent een vrij laag energetisch rendement. In België wordt er een gemiddeld rendement van 40% gehaald. De beste beschikbare technologie is echter de STEG<sup>6</sup>, die een rendement van ongeveer 55% verwezenlijkt (Cogen Vlaanderen, 2004). In dit voorbeeld gaan we uit van dit laatste rendement ( $\eta_E = 55\%$ ).

Het rendement van een klassieke verwarmingsketel ligt veel hoger en behaalt waarden van 80 tot 90% (condenserende ketels zelfs hoger) (Cogen Vlaanderen, 2004). Hier nemen we  $\eta_Q = 90\%$  als uitgangspunt.

Voor de WKK-installatie veronderstellen we in dit eenvoudig voorbeeld een thermisch rendement  $\alpha_Q$  van 50% en een elektrisch rendement  $\alpha_E$  van 35%. In de praktijkstudie van deze eindverhandeling zullen we meer accurate gegevens gebruiken. Dit voorbeeld dient louter als eerste illustratie om de energiebesparing van warmtekrachtkoppeling duidelijk te maken.

In beide gevallen staat de vraag naar elektriciteit E en warmte Q centraal. Enerzijds worden de elektriciteit en warmte geleverd door de WKK-installatie (links in de figuur), anderzijds wordt de warmte geproduceerd met behulp van een ketel terwijl de elektriciteit geleverd wordt door een centrale. Deze figuur veronderstelt impliciet dat het om een energetisch equivalente vergelijking gaat: beide systemen voldoen precies en gelijktijdig aan de energievraag (AMPERE commissie, 2000).

De elektriciteits- en warmtevraag zijn respectievelijk 35 en 50 eenheden. Rekening houdend met het elektrisch en thermisch rendement heeft de WKK-installatie een input van 100 eenheden brandstof nodig heeft. Wanneer we daarentegen naar de gescheiden productie kijken, bemerken we dat hier de brandstof-input 120 eenheden moet bedragen.

Dit voorbeeld brengt ons bij het eerste en voornaamste voordeel van warmtekrachtkoppeling nl. primaire energiebesparing. Dit is natuurlijk een ideale situatie waarbij de WKK-installatie op elk ogenblik exact de behoefte aan zowel elektriciteit als warmte kan dekken. In de praktijk is dit echter niet altijd het geval zodat er steeds een

---

<sup>6</sup> Een STEG-centrale of SToom En Gas centrale is een elektriciteitscentrale waarbij twee turbines worden aangedreven zoals de naam al zegt nl. een stoomturbine en een gasturbine (COGEN Vlaanderen, 2004).

mogelijkheid moet voorzien worden om bijkomende energie te produceren op de klassieke manier (Cogen Vlaanderen, 2004). Dit heeft als gevolg dat de primaire energiebesparing iets lager zal liggen.

### **3.5 WKK-INDELING**

Om dit hoofdstuk af te sluiten, wordt nog een indeling gemaakt van de WKK-installaties op basis van vermogen. Grootschalige WKK wordt vooral gebruikt in industriële toepassingen in de primaire en secundaire sector, beginnend met een vermogen van 1 MWe gaande tot vermogens van meer dan 250 MWe. Mini-WKK kent haar toepassingen veelal in de tertiaire sector (vooral commerciële doeleinden maar ook in scholen, ziekenhuizen,...) met vermogens tussen de 50 en 1000 kWe (VMM, 2007a). Tot slot vinden we  $\mu$ WKK terug in residentiële toepassingen. Hoewel er geen officiële data beschikbaar zijn, beschouwt het VEA (2008) WKK-systemen met een vermogen kleiner dan 50 kWe als  $\mu$ WKK-systemen. Huishoudelijke installaties situeren zich in de vermogensrange van 1 tot 5 kWe afhankelijk van de grootte van de woning, het isolatieniveau en het gedrag van de bewoners (Entchev, 2004; Cogen Vlaanderen, 2008). Het is in deze laatste categorie dat deze eindverhandeling zich situeert.

## 4 $\mu$ WKK: TECHNOLOGISCHE ASPECTEN

---

Tot hiertoe vonden WKK's hun toepassing voornamelijk in de industrie maar langzaam dringen ze ook door tot in de bebouwde omgeving en zelfs tot op het niveau van een private woning. Zoals in het vorige hoofdstuk gesteld, leggen we ons in deze eindverhandeling toe op huishoudelijke  $\mu$ WKK's met een vermogen van ongeveer 1 kWe.

### 4.1 OVERZICHT VAN DE TECHNOLOGIEËN

De term  $\mu$ WKK verwijst naar een waaier van verschillende technologiecategorieën die gekenmerkt worden door het verbruik van één brandstof om gelijktijdig warmte en elektriciteit te produceren.

Een belangrijke parameter voor alle  $\mu$ WKK-systemen is de hoeveelheid elektriciteit die gegenereerd wordt. Deze varieert tussen de verschillende technologieën, afhankelijk van het ontwerp en de basiswerking (Carbon Trust, 2007).

We onderscheiden vijf technologieën die wat betreft elektrisch vermogensbereik in aanmerking kunnen komen voor residentiële toepassingen van  $\mu$ WKK (Simader, Krawinkler & Trnka, 2006):

- **Zuigermotoren met inwendige verbranding**
- **Microturbines** zijn uitgerust met een recuperator om een elektrische output te verkrijgen. Daarnaast behoort ook een warmtewisselaar tot het systeem om de afvalwarmte uit uitlaatgassen te gebruiken.
- **Organic Rankine Cycle systemen (ORC)** zijn vergelijkbaar met de cyclus van conventionele stoomturbines. Enkel de vloeistof die de turbine aandrijft is verschillend, namelijk een organische vloeistof met een hoog moleculaire massa. Deze werkingsvloeistof maakt het mogelijk om uit warmtebronnen op lage temperatuur elektriciteit te produceren.
- **Stirlingmotoren** zijn thermische motoren waar de warmte extern geproduceerd wordt in een aparte verbrandingskamer. Ze zijn ook uitgerust met een generator en warmtewisselaar.

- **Brandstofcellen** converteren elektrochemische energie.

Geen enkele van deze technologieën is een nieuw concept. De ideeën achter de zuigermotoren met interne verbranding, de ORC systemen, de Stirlingmotor en de brandstofcellen bestaan reeds 150 jaar. Men heeft echter weinig ervaring met het gebruik van deze technologieën in  $\mu$ WKK toepassingen (Carbon Trust, 2007).

De volgende paragrafen zullen een beschrijving geven van deze portfolio aan technologieën. Hierbij benadrukken we dat enkel de technologieën die in aanmerking komen voor  $\mu$ WKK behandeld zullen worden. De meeste nadruk wordt gelegd op de Stirlingmotor omdat deze technologie het dichtst bij een marktintroductie staat. Er wordt dus geen exhaustieve opsomming van alle mogelijke WKK-technologieën gegeven.

## **4.2 ZUIGERMOTOREN MET INWENDIGE VERBRANDING**

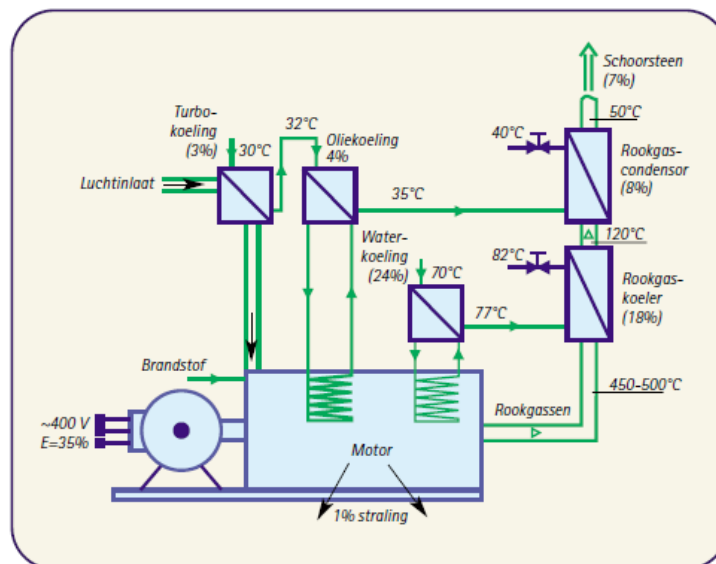
Deze motoren staan ook gekend als Internal Combustion Engines (ICE) of Reciprocating Engines. Oorspronkelijk waren deze systemen gebaseerd op motortechnologieën uit de automobielsector maar de huidige motoren zijn substantieel verbeterd om de lange levensduur te bereiken die vereist is voor betrouwbare  $\mu$ WKK-systemen. Om de economische uitvoerbaarheid van dergelijk systeem te maximaliseren, zijn echter 3000-6000 werkingsuren per jaar vereist (Carbon Trust, 2007).

Op basis van de inwendige verbrandingscyclus onderscheiden we twee typen zuigermotoren, namelijk de Otto-motor en de dieselmotor. De Otto- of gasmotor is gebaseerd op de Otto-cyclus en de dieselmotor wordt gekenmerkt door de thermodynamische dieselcyclus.

### **4.2.1 Werkingsprincipe**

Beide motortypes beschikken over cilindervormige verbrandingskamers waarin zich een zuiger bevindt. Door de ontbranding van een mengsel van lucht en brandstof in een cilinder krijgt de zuiger een heen- en weergaande beweging. Een drijfstang brengt deze intermitterende beweging over op een krukas die de lineaire beweging van de zuiger omzet in een roterende beweging. Vervolgens maakt een alternator gebruik van deze roterende beweging van de krukas om elektriciteit op te wekken.

Bijkomend produceert een verbrandingsmotor veel warmte die kan gebruikt worden om de warmtevraag te voorzien. Deze warmte wordt op diverse plaatsen en diverse temperaturen gerecupereerd. De rookgassen en de motorblokkoeler vormen de voornaamste warmtebronnen. Daarnaast komt er warmte vrij via de oliekoeling en (indien het gaat om een turbomotor) de tussenkoeler. Het is echter niet gemakkelijk om al deze soorten warmte nuttig aan te wenden vermits deze zich op verschillende temperaturen bevinden. Een ander knelpunt is de relatief lage temperatuur waarop de warmte beschikbaar is zodat de warmte meestal geproduceerd wordt in de vorm van warm water (Cogen Vlaanderen, 2004; Carbon Trust, 2007). Figuur 4.1 illustreert de verschillende warmtestromen bij een zuigermotor.



Figuur 4.1: Warmtebronnen in een  $\mu$ WKK-installatie met zuigermotor (Cogen Vlaanderen, 2004)

#### 4.2.2 Voor- en nadelen

De voordelen van zuigermotoren met inwendige verbranding ten opzichte van andere  $\mu$ WKK-technologieën zijn onder andere de lagere investeringskost (6000 - 7000 EUR), betrouwbaarheid en het feit dat het een zeer gekende en rijpe technologie is (Six & Dexters, 2009).

Toch wordt deze technologie slechts zelden gebruikt voor  $\mu$ WKK-toepassingen. Deze motoren hebben als belangrijk nadeel dat er veel bewegende onderdelen (kleppen,

zuiger, ...) aanwezig zijn. Dit zorgt er niet enkel voor dat de motor vrij veel lawaai maakt, maar bovendien veel onderhoud vergt waarvan de kosten hoog kunnen oplopen (Cogen Vlaanderen, 2004). Ook het gewicht, volume en de draaitijd die vereist is vooraleer er warmte wordt geproduceerd, spelen in het nadeel van deze motoren.

#### 4.2.3 Kerncijfers

<b>Zuigermotoren met inwendige verbranding</b>	
<i>Elektrisch vermogen</i>	1-50 000 kWe
<i>Totale brandstofbenuttigingsgraad</i>	60-95%
<i>Elektrisch rendement</i>	20-40%
<i>Kracht-warmteverhouding (PHR)</i>	0,35-2,4

Tabel 4.1: Kerncijfers van zuigermotoren met inwendige verbranding

Zuigermotoren met inwendige verbranding zijn verkrijgbaar met vermogens vanaf enkele kilowatt tot ongeveer 10 MW. De elektrische output van de meeste commercieel beschikbare eenheden ligt echter te hoog voor residentiële toepassingen (Six & Dexters, 2009).

Het elektrisch rendement wordt bepaald door het type motor. Dieselmotoren halen doorgaans een hoger elektrisch rendement dan Ottomotoren. Daarnaast speelt de vermogensgrootte van de motor een rol. Typische waarden voor het elektrisch rendement in  $\mu$ WKK-toepassingen situeren zich tussen de 20 en 40% (Cogen Vlaanderen, 2004).

De kracht-warmteverhouding van zuigermotoren ligt hoger dan deze van Stirlingmotoren. Dit maakt zuigermotoren ook nog geschikt voor  $\mu$ WKK, maar ze vereisen langere draaiperiodes om economisch haalbaar te zijn (Carbon Trust, 2007).

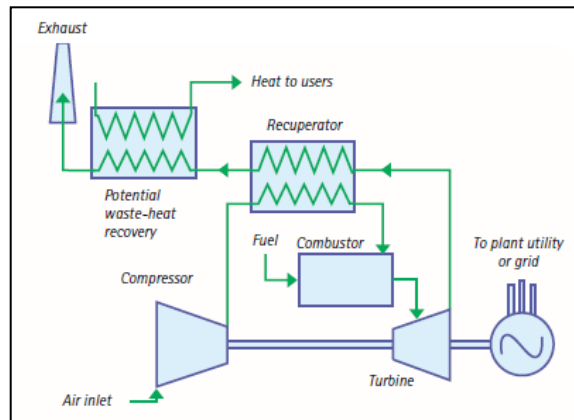


## 4.3 MICROTURBINES

### 4.3.1 Werkingsprincipe

Microturbinen verschillen weinig van de klassieke, grote gasturbinen die gebruikt wordt in vliegtuigmotoren en grote WKK-toepassingen. Ze werken dan ook volgens hetzelfde principe: de aangezogen lucht wordt eerst gecomprimeerd in een compressor en vervolgens verder verhit in een verbrandingskamer. Hierin wordt een brandstof, meestal gas, verbrand waardoor rookgassen ontstaan die geëxpandeerd worden over een turbine. Op deze manier wordt arbeid geleverd voor de aandrijving van de compressor enerzijds en voor de productie van elektriciteit via de alternator anderzijds (Cogen Vlaanderen, 2004).

Om een hoger elektrisch rendement te halen, kan de microturbine uitgerust zijn met een recuperator. Hierin wordt de gecomprimeerde lucht, alvorens naar de verbrandingskamer te stromen, opgewarmd met hete rookgassen die de turbine verlaten. De werking van de microturbine wordt in figuur 4.2 geïllustreerd.



Figuur 4. 2: Schematische voorstelling van een microturbine (Cogen Vlaanderen, 2004)

### 4.3.2 Voor- en nadelen

Aangezien alle warmte in een microturbine via rookgassen beschikbaar wordt gesteld, is er slechts één warmtewisselaar nodig wat het eenvoudiger maakt om warmte te

benutten. Verder stoot een microturbine minder schadelijk emissies uit door het continue verbrandingsproces (Cogen Vlaanderen, 2004).

Een ander voordeel situeert zich in de lage onderhoudskosten door het geringe aantal bewegende onderdelen. Ook biedt een microturbine het voordeel van brandstofflexibiliteit omdat zowel brandstoffen met lagere of niet-constante energie-inhoud verbrand kunnen worden (Cogen Vlaanderen, 2006).

De elektrische vermogens van microturbines liggen momenteel echter in de range van 25-250 kWe wat duidelijk nog te groot is om toepasbaar te kunnen zijn voor residentiële  $\mu$ WKK. De mogelijkheid van kleinere elektrische vermogens wordt onderzocht (Six & Dexters, 2009).

### 4.3.3 Kerncijfers

De voornaamste kerncijfers van microturbines worden in tabel 4.2 samengevat:

<b>Microturbines</b>	
<i>Elektrisch vermogen</i>	25-250 kWe
<i>Totale brandstofbenuttigingsgraad</i>	60-80%
<i>Elektrisch rendement</i>	12-33%
<i>Kracht-warmteverhouding (PHR)</i>	0,25-0,7

Tabel 4.2: Kerncijfers van microturbines

## 4.4 ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMEN

### 4.4.1 Werkingsprincipe

Organic Rankine Cycle (ORC)-installaties zijn een variant op de Rankine-cyclus die in klassieke stoomturbines gebruikt wordt. In de Rankine-cyclus wordt water verwarmd tot oververhitte stoom die vervolgens expandeert over een stoomturbine. Hierbij wordt arbeid aan een turbine geleverd die op haar beurt een elektriciteitsgenerator aandrijft. De oververhitting van de stoom is noodzakelijk om teveel condensatie in de turbine te vermijden (Energik, 2004).

In plaats van water worden in een Organic Rankine Cyclus organische vloeistoffen met lage verbrandingstemperaturen gebruikt als arbeidsmedium. Voorbeelden hiervan zijn pentaan, hexaan, toluen en ammoniak. Dit verbetert de warmterecuperatie en de prestaties van het systeem aanzienlijk (Six & Dexters, 2009; Energik, 2004).

#### 4.4.2 Voor- en nadelen

Een voordeel ten opzichte van de klassieke stoomcyclus is dat organische vloeistoffen bij lagere temperaturen verdampen dan stoom. Hierdoor blijft de maximale temperatuur beperkt vermits oververhitting niet meer noodzakelijk is.

Dit voordeel moet echter afgewogen worden tegen de nadelen zoals de hogere kostprijs van de vloeistof, het lagere rendement en de gevaarlijkheid van sommige stoffen zoals toluen waardoor veiligheidsvoorzieningen en gebruikssystemen de kosten van een ORC-installatie kunnen doen oplopen (Energik, 2004).

#### 4.4.3 Kerncijfers

De voornaamste kerncijfers van ORC-installaties worden in tabel 4.3 samengevat:

<b>ORC-installaties</b>	
<i>Elektrisch vermogen</i>	0,3-10 000 kWe
<i>Totale brandstofbenuttigingsgraad</i>	60-94%
<i>Elektrisch rendement</i>	3-30%
<i>Kracht-warmteverhouding (PHR)</i>	0,1-0,4

Tabel 4.3: Kerncijfers van ORC-installaties

## 4.5 STIRLINGMOTOREN

### 4.5.1 Werkingsprincipe

Stirlingmotoren werken thermodynamisch gezien volgens het gelijknamige Stirlingproces. Het zijn gesloten systemen: er vindt geen stofwisseling met de omgeving plaats, enkel energie-uitwisseling. De motor bestaat zowel uit een warm (500°C) als een koud deel

(40-70°C) en werkt volgens het principe van externe verbranding. Dit principe laat het gebruik van een groot aantal brandstofsoorten toe (vloeibaar, gasvormig, kolen maar ook biomassa). Bij toepassing in  $\mu$ WKK-systemen wordt voornamelijk natuurlijk gas gebruikt.

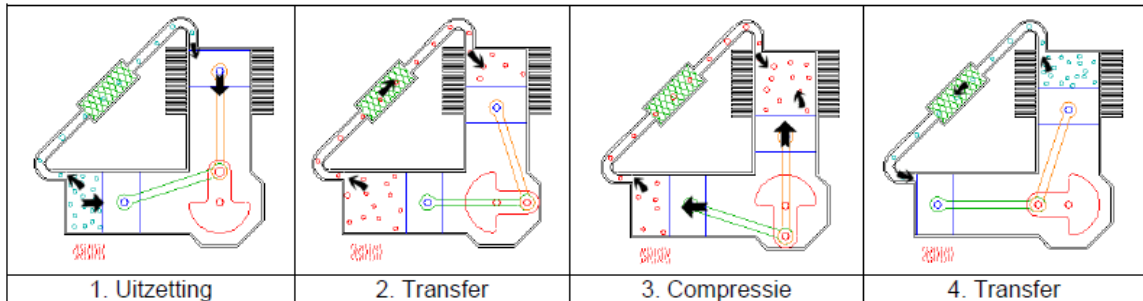
De externe warmtebron (een vlam of hete gassen) verwarmt continu het warme deel van de motor terwijl het koude deel voortdurend gekoeld wordt door water van het centrale verwarmingssysteem. Aangezien de Stirlingmotor wordt aangedreven door een temperatuurverschil is de warmteafvoer net zo belangrijk als de warmtetoevoer. Hoe lager de temperatuur van de koeling, hoe hoger het rendement. Het koude en warme deel staan steeds met elkaar in verbinding zodat ze onder dezelfde druk staan.

In de motor zelf zit een arbeidsmedium (lucht of een edelgas zoals helium) vervat dat via een regenerator vrij kan stromen tussen de warme en koude zijde van de motor. Een regenerator bestaat uit een zeer poreuze metallische structuur (bv. een spons van koperdraad) en verbetert het mechanisch rendement van de motor. De Stirlingmotor werkt volgens een gesloten thermodynamische cyclus waarbij het arbeidsmedium afwisselend expandeert bij verhitting en comprimeert bij afkoeling.

Stirlingmotoren bestaan in drie verschillende uitvoeringsvormen, gebaseerd op de configuratie van de cilinders en zuigers. Hierbij onderscheidt men de alfa-, beta- en gammamotoren. De alfa-opstelling is de originele configuratie van een Stirlingmotor. Deze wordt meestal toegepast in op zichzelf bewegende toepassingen. Hun grootste voordeel is de eenvoudige manier waarop ze kunnen samengesteld worden in compacte configuraties met meerdere cilinders, wat toelaat om een hoog specifiek vermogen te behalen. Om deze reden zullen we in de rest van de bespreking van de Stirlingmotor ook uitgaan van een alfa-opstelling.

### 4.5.2 De Stirlingcyclus

In deze cyclus zijn 4 fasen te onderscheiden die worden weergegeven in figuur 4.3:



Figuur 4.3: De Stirlingcyclus (alfa-opstelling)

- 1) De **uitzettingsslag**: het arbeidsmedium wordt in de warme kamer verhit waardoor het uitzet en arbeid verricht door een zuiger aan te drijven. Deze fase vindt plaats bij constante temperatuur en is dus een isotherm proces.
- 2) De **pompsslag**: het hete arbeidsmedium stroomt via de regenerator van de warme naar de koude kamer waarbij het warmte afgeeft aan de regenerator (voorafkoeling). Deze stap gebeurt bij constant volume (isochoor proces).
- 3) De **compressieslag**: het arbeidsmedium wordt in de koude kamer afgekoeld waardoor het inkrimpt en de zuiger dus minder arbeid moet leveren om het gas te comprimeren. Deze fase gebeurt net zoals de eerste onder isotherme omstandigheden.
- 4) De **terugpompsslag**: het koude arbeidsmedium stroomt via de regenerator van de koude naar de warme kamer waarbij het ondertussen warmte opneemt van de regenerator (voorverhitting). Tenslotte wordt het arbeidsmedium terug verwarmd tot de begintemperatuur waarna de cyclus zich weer herhaalt.

Het resultaat van deze cyclus is een netto-arbeid die gebruikt wordt om de Stirlingmotor aan te drijven. Het arbeidsmedium heeft nu terug de begintemperatuur bereikt waardoor de cyclus opnieuw kan starten.

### 4.5.3 Voor- en nadelen

De reden voor de stijgende interesse voor het gebruik van Stirlingmotors in  $\mu$ WKK-systemen is hun hoge (thermisch) rendement. Mede dankzij de regenerator is het theoretisch rendement van een Stirlingmotor gelijk aan het Carnotrendement<sup>7</sup>.

$$\eta_{Stirling} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

waarbij  $T_H$  = temperatuur van het warme deel van de motor (in °K)

$T_L$  = temperatuur van het koude deel van de motor (in °K)

Zoals eerder gesteld neemt het rendement toe wanneer het temperatuurverschil tussen het warme en koude deel van de motor toeneemt. In realiteit behaalt de Stirlingmotor slechts de helft van het theoretische rendement.

Een bijkomend voordeel is de vrije keuze van de warmtebron als gevolg van de uitwendige verbranding. De warmte die de Stirlingmotor aandrijft, kan zowel een gasvlam als een oliegestookte brander zijn maar ook laagwaardige brandstoffen zoals hout, afval en biomassa komen in aanmerking. Het feit dat er geen verbranding binnen de verzegelde cilinder plaatsvindt, zorgt er ook voor dat de motor zeer stil is.

Aangezien Stirlingmotoren een externe warmtebron gebruiken voor de energieopwekking en deze brandstof efficiënt benut wordt, produceren ze aanzienlijk minder emissies.

Bovendien vergen Stirlingmotoren weinig onderhoud doordat ze weinig bewegende onderdelen bezitten zoals kleppen en injectoren of vervangonderdelen zoals oliefilters. Volgens producenten (Sunmachine, Remeha) zou een  $\mu$ WKK-installatie 8000 werkingsuren zonder onderhoud kunnen meegaan. Een jaarlijks onderhoud wordt echter wel aangeraden.

---

<sup>7</sup> De Carnotcyclus is een theoretisch thermodynamisch kringproces waarbij alle warmte wordt toegevoerd op de hoogst mogelijke temperatuur en afgevoerd op de laagst mogelijke temperatuur. Dit heeft de grootst mogelijke omzetting van warmte in arbeid tot gevolg. Hieruit vloeit dan ook het maximaal haalbare rendement van een thermodynamische energieomzetting uit voort, het Carnotrendement. (van Kimmenaede, 1989)

Een nadeel van de Stirlingmotoren en in wezen van alle motoren met uitwendige verbranding, is de trage opstart. Het warme deel van de motor moet immers op voldoende hoge temperatuur gebracht worden vooraleer de motor op zijn nominaal vermogen komt. In realiteit duurt dit minstens twee minuten.

#### **4.5.4 Implementatie**

De voorgaande eigenschappen maken een Stirlingmotor zeer geschikt voor  $\mu$ WKK-installaties in residentiële toepassingen. Warmte is in dit geval het primaire product van de totale installatie en het opgewekte elektrisch vermogen het bijproduct.

Een typische  $\mu$ WKK-toepassing op basis van een Stirlingmotor heeft een elektrisch vermogen van 1kWe en een thermisch vermogen van 6-8 kWth. Vaak worden zulke  $\mu$ WKK-systemen uitgerust met een 'boost burner' of bijbrander om het thermisch vermogen op te drijven.

Indien de warmtevraag kleiner is dan het thermisch vermogen van de  $\mu$ WKK-eenheid is de  $\mu$ WKK doorgaans niet in werking. Een mogelijk oplossing om deellastwerking en het afkoelen van overtollige warmte te voorkomen, bestaat erin om die overtollige warmte tijdelijk op te slaan, te bufferen. Hierdoor wordt een groter deel van de warmtevraag gedekt en worden start-stopfrequenties gereduceerd. Bovendien wordt de vereiste synchroniteit tussen elektriciteits- en warmtevraag gedeeltelijk ontkoppeld. Volgens fabrikanten gebruikt men een  $\mu$ WKK-eenheid bij voorkeur met een buffervat van 200-300 liter.

#### **4.5.5 Kerncijfers**

Tot slot worden de karakteristieken van Stirlingmotoren voor residentiële toepassingen in de tabel 4.4 samengevat.

<b>Stirlingmotoren</b>	
<i>Elektrisch vermogen</i>	<1-70 kWe
<i>Thermisch vermogen (zonder bijbrander)</i>	6-8 kWth
<i>Totale brandstofbenuttigingsgraad</i>	60-95%
<i>Elektrisch rendement</i>	5-20%
<i>Kracht-warmteverhouding (PHR)</i>	0,1-0,25

Tabel 4.4: Kerncijfers van de Stirlingmotor

Ondanks het hoge thermisch rendement dat een Stirlingmotor kan behalen, ligt het elektrisch rendement aan de lage kant (5-20%). Dit impliceert dan ook een lage kracht-warmteverhouding. Voor een Stirlingmotor situeert deze verhouding zich typisch in de range van 0,1-0,25. Dit maakt deze motoren nog steeds geschikt om de volledige warmtevraag van een huishouden te dekken en een hoeveelheid elektriciteit te produceren waarvan het merendeel gebruikt wordt door het huishouden (eerder dan terug te leveren aan het net).

De totale brandstofbenuttigingsgraad van een Stirlingmotor is vergelijkbaar met het rendement van een klassieke verwarmingsketel.

(Six & Dexters, 2009; Cogen Vlaanderen, 2006; Carbon Trust, 2007; Biomass Technology Group, 2007; Knight, Ugursul, & Beausoleil-Morrison, 2005; Energik, 2004, Vlaamse Milieumaatschappij, 2007a)

Aangezien de Stirlingmotor het dichtste bij commercialisering staat en voor een deel al gecommmercialiseerd wordt, zal de rest van deze eindverhandeling gebaseerd zijn op deze technologie.

## **4.6 BRANDSTOFCELLEN**

### **4.6.1 Werkingsprincipe**

Een brandstofcel is een systeem dat via een elektrochemisch proces waterstof en zuurstof rechtstreeks converteert naar elektrische energie met water als bijproduct. In tegenstelling tot de vorige technologieën wordt hierbij geen thermodynamische cyclus van verbranding en mechanische arbeid doorlopen. Gezien de reactie exotherm is, komt



er ook warmte vrij. Om de temperatuur van de brandstofcel optimaal te houden voor de elektrochemische reacties, moet deze warmte afgevoerd worden en kan men deze in principe nuttig aanwenden. Om deze reden zijn brandstofcellen dan ook als een  $\mu$ WKK-technologie te beschouwen (Cogen Vlaanderen, 2006; Energik, 2004).

#### **4.6.2 Voor- en nadelen**

Hoewel brandstofcelgebaseerde technologieën veel minder rijp zijn dan zuigermotoren en Stirlingmotoren, hebben ze het grootste ontwikkelingspotentieel. Dit is te danken aan hun elektrisch rendement dat in theorie zeer hoog ligt (meer dan 50%) (Carbon Trust, 2007).

Ook het lage geluidsvolume, de lage onderhoudskosten en een goede deellastwerking maken brandstofcellen interessant voor  $\mu$ WKK-applicaties. Waar andere technologieën hun rendement zien dalen bij deellast, kent de brandstofcel zelfs een hoger rendement bij deellast. Een potentieel voordeel schuilt ook in het feit dat er geen  $\text{CO}_2$  wordt geproduceerd door het gebruik van waterstof als brandstof. Toch moet vermeld worden dat bij de productie van waterstofgas (door reforming van methaan of aardgas) meestal wel  $\text{CO}_2$  geproduceerd wordt (Cogen Vlaanderen, 2004). Daarnaast spelen de hoge investeringskost en de relatief korte levensduur in het nadeel van brandstofcellen (Six & Dexters, 2009).

$\mu$ WKK-eenheden op basis van brandstofcellen zijn hedendaags nog niet commercieel beschikbaar. Naast enkele technologische problemen vormt de hoge investeringskost de grootste belemmering voor de doorbraak van brandstofcellen en zijn subsidies onontbeerlijk om deze drempel te overwinnen (Cogen Vlaanderen, 2006). Een definitieve marktintroductie zal wellicht binnen de vijf jaar niet gebeuren (Six & Dexters, 2009).

### 4.6.3 Kerncijfers

<b>Brandstofcellen</b>	
<i>Elektrisch vermogen</i>	1-1000 kWe
<i>Totale brandstofbenuttigingsgraad</i>	80-90%
<i>Elektrisch rendement</i>	25-65%
<i>Kracht-warmteverhouding (PHR)</i>	0,8-2

Tabel 4.5: Kerncijfers van brandstofcellen

Het elektrisch rendement van brandstofcellen ligt een stuk hoger in vergelijking met Stirlingmotoren (5-20%). Het thermisch rendement ligt bijgevolg lager dan bij de voorgaande technologieën wat impliceert dat brandstofcellen hun toekomst vooral zullen vinden in nieuwbouwwoningen met goede isolatie en een relatief lage warmtevraag (Six & Dexters, 2009).

### 4.7 $\mu$ WKK'S IN VLAANDEREN

Wanneer we op zoek gaan naar het aantal  $\mu$ WKK-installaties (met een vermogen kleiner dan 50 kWe) in Vlaanderen, stellen we in de WKK-inventaris vast dat er slechts één  $\mu$ WKK erkend wordt. Dit zou gaan om een  $\mu$ WKK met interne verbrandingsmotor (VITO, 2009c).

Deze vaststelling wordt echter tegengesproken door de statistieken van de VREG (2010d). De lijst van kwalitatieve WKK-installaties waaraan warmtekrachtcertificaten worden toegekend, bevat immers 19  $\mu$ WKK's (op 01/03/2010):

- 16 zuigermotoren met inwendige verbranding
  - o 2 met een vermogen van 3 kWe
  - o 2 met een vermogen van 4,7 kWe
  - o 3 met een vermogen van 5,3 kWe
  - o 4 met een vermogen van 5,5 kWe
  - o 1 met een vermogen van 8 kWe
  - o 2 met een vermogen van 10 kWe
  - o 1 met een vermogen van 17 kWe

- 1 met een vermogen van 25 kWe
- 1 met een vermogen van 31 kWe
- 1 met een vermogen van 50 kWe
- 1 stoommachine met een vermogen 2 kWe
- 2 stirlingmotoren met een vermogen van 3 kWe

Hieruit blijkt dat er tot nog toe geen enkele  $\mu$ WKK voor residentieel gebruik (met een vermogen rond 1 kWe) in Vlaanderen geïnstalleerd werd.

## 5 $\mu$ WKK: ECONOMISCHE ASPECTEN

---

### 5.1 INVESTERINGSKOSTEN

De huidige kostprijs van een  $\mu$ WKK op basis van een Stirlingmotor ligt nog vrij hoog. In het praktijkgedeelte van deze eindverhandeling zal een marktonderzoek gedaan worden naar  $\mu$ WKK's die nu al commercieel verkrijgbaar zijn of in de nabije toekomst geïntroduceerd zullen worden. Voor zover producenten prijsinformatie vrijgeven, kunnen we nu reeds meegeven dat de kostprijs van deze prototypes zich in de range van 6000 – 12 000 EUR situeert.

Ten einde een zinvolle uitspraak te kunnen doen over de rendabiliteit van zo'n  $\mu$ WKK hebben we nood aan een referentiepunt. We vertrekken van de situatie dat de huidige verwarmingsinstallatie in een Vlaamse woning vervangen moet worden. De consument kan enerzijds kiezen voor een nieuwe verwarmingsketel (het referentiepunt) en heeft anderzijds de keuze tussen een aantal nieuwe technologieën waaronder  $\mu$ WKK.

De aanschaf van een nieuwe verwarmingsinstallatie is voor de consument noodzakelijk en deze kostprijs zal zich op geen enkele manier terugverdienen indien deze installatie gedurende de hele levensduur operationeel is. In deze eindverhandeling zal dan ook enkel gerekend worden met de meerprijs van de  $\mu$ WKK ten opzichte van de referentieketel. Deze meerprijs zal zich op termijn terugverdienen doordat de  $\mu$ WKK elektriciteit produceert die niet meer aangekocht dient te worden via het net.

Voor grootschalige commercialisering mikken producenten op een targetprijs zodat de meerprijs van een  $\mu$ WKK zich op 5 tot 7 jaar terugverdient (Remeha, 2010; Vaillant, 2010; Smart Power Foundation, 2008). Om dit op termijn mogelijk te maken, zullen schaalvoordelen door grootschalige serieproductie bereikt moeten worden. Voorlopig bevindt deze technologie zich nog in de beginfase en zal financiële steun de technologie voor eindgebruikers aantrekkelijk moeten maken (Six & Dexters, 2009).

## **5.2 ELEKTRICITEITS- EN GASPRIJZEN**

Daar de meerprijs van een  $\mu$ WKK ten opzichte van een conventionele ketel zich terugverdient door de elektriciteitsproductie, zal een hoge elektriciteitsprijs een positieve invloed hebben op de economische rendabiliteitmaatstaven (zie paragraaf 5.5). Een hoge prijs impliceert immers een grotere besparing op de elektriciteitsaankoop.

Een hoge gasprijs daarentegen zal de economische rendabiliteit ongunstig beïnvloeden. Aangezien een  $\mu$ WKK zowel warmte als elektriciteit opwekt uit één brandstof ligt het gasverbruik iets hoger dan bij een conventionele ketel.

Hieruit kunnen we concluderen dat de ideale situatie voor een  $\mu$ WKK zich voordoet wanneer de elektriciteitsprijs hoog ligt en de gasprijs laag. In realiteit zullen deze extremen echter niet haalbaar zijn vermits deze prijzen steeds in dezelfde richting fluctueren (Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, 2008).

## **5.3 SUBSIDIES**

### **5.3.1 Argumenten voor subsidies vanuit de overheid**

$\mu$ WKK biedt niet enkel voordelen voor de particulier, ook de maatschappij heeft baat bij de verdere ontwikkeling van de  $\mu$ WKK-technologie en haar toepassingen. Het is de taak van de overheid in een vrije markt om ervoor te zorgen dat de economie streeft naar een maatschappelijk optimum (in plaats van een privaat optimum). De volgende paragrafen geven een aantal redenen die de overheid ertoe zou moeten aanzetten om  $\mu$ WKK te stimuleren. Deze redenen zijn nauw met elkaar verbonden maar het is tevens van belang dat we de betekenis van elke reden apart goed inzien.

#### **5.3.1.1 Vermeden externe kosten**

Voor het gebruik van elektriciteit betalen we een bepaalde prijs. In deze prijs zitten arbeidskosten, investerings- en uitbatingskosten, brandstofprijzen, accijnzen en een winstmarge vervat. Waar we niet bij stilstaan, is het feit dat er bij de productie van elektriciteit emissies vrijkomen die bijdragen tot luchtverontreiniging (tenzij deze elektriciteit door middel van hernieuwbare energie werd opgewekt). Deze uitstoot van vervuilende stoffen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , roetdeeltjes, ...) kan gezondheidsproblemen en

kosten veroorzaken die op de maatschappij afgewenteld worden en slechts gedeeltelijk (in de vorm van bv. accijnzen) vervat zitten in de kostprijs. De monetaire inschatting van deze onbedoelde en ongeprijsde welvaartsveranderingen, die derden ondergaan als gevolg van een economische activiteit, worden externe kosten genoemd (Torfs, De Nocker, Schrooten, Aernouts & Liekens, 2005).

Het belangrijkste bestanddeel dat vrijkomt bij de energievoorziening door middel van fossiele brandstoffen is CO<sub>2</sub>. In hoofdstuk 1 kwam reeds ter sprake dat de wereldwijd snel gestegen emissies van CO<sub>2</sub> een versterkt broeikaseffect als gevolg hebben. Volgens het Stern-rapport (2006) kan een preventieve investering van 1% van het bruto nationaal product (BNP) per jaar de ergste gevolgen van de klimaatverandering opvangen. Indien men dit niet doet, kunnen de kosten oplopen tot 5 à 20% van het BNP (Stern, 2006).

Deze externe kosten variëren naargelang de technologie, de gebruikte brandstof in de elektriciteitscentrale, de plaats en het tijdstip. Op basis van het procentuele aandeel van elke technologie in de jaarlijkse productie van elektriciteit kan een gemiddelde marginale externe kost voor elektriciteitsproductie berekend worden. In 1990 bedroeg deze ongeveer 45 EUR/MWh en in 2002 ongeveer 19 EURO/MWh. De drie belangrijkste factoren die deze daling verklaren, zijn de afbouw van steenkool ten voordele van STEG's, de installatie van rookgaszuivering in de steenkoolcentrale van Langerlo en de opkomst van WKK op aardgas (Torfs, De Nocker, Schrooten, Aernouts & Liekens, 2005).

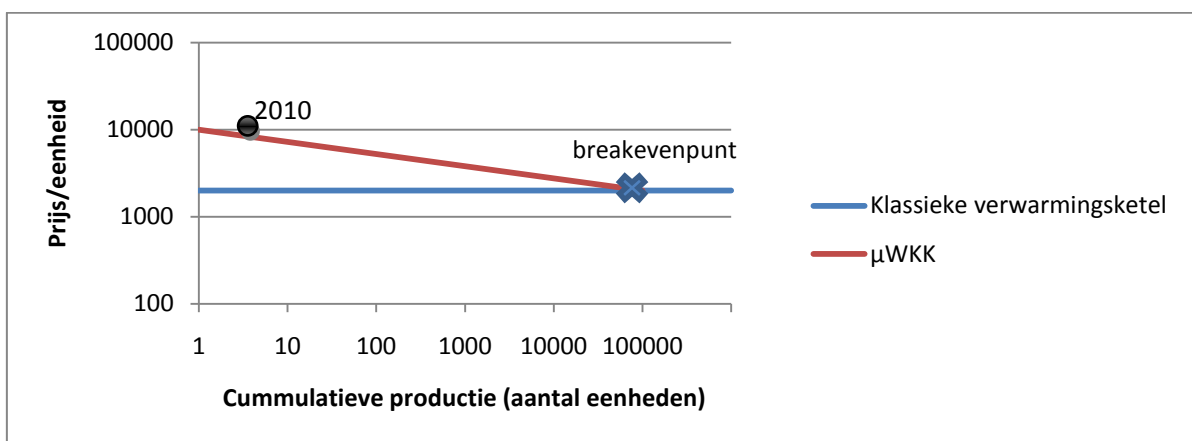
Het feit dat de opkomst van WKK een aanzienlijke bijdrage heeft geleverd aan de reductie van externe kosten, zou de overheid moeten aanmoedigen deze technologie en haar evolutie (dus ook  $\mu$ WKK) te stimuleren.

### **5.3.1.2 Economische en technologische toekomstvisie**

Actief zijn in een competitieve markt stimuleert individuen, bedrijven en industrieën om het steeds beter te doen. Deze bevinding ligt aan het hart van de 'leercurve'. Het idee achter deze curve is dat fabrikanten hun producten steeds goedkoper kunnen produceren dankzij de kennis en ervaring die ze opdoen naarmate ze meer produceren. Het leren door marktervaring reduceert de prijzen voor verschillende energietechnologieën en deze reducties beïnvloeden vervolgens de concurrentie tussen technologieën (Wene, 2000).

Niet elke technologie krijgt echter de kans om zich te ontwikkelen en competitief te worden. In een vrije markt zouden bedrijven hun activiteiten rond deze technologie kunnen stopzetten vermits het te lang duurt vooraleer het project winstgevend wordt of omdat ze geen marktpotentieel voor hun product vinden. Het is echter mogelijk dat de technologie een hoger doel heeft zoals een betere volksgezondheid of in het geval van  $\mu$ WKK, minder milieuschade. Aangezien de overheid de taak heeft om tot het maatschappelijk optimum te komen, moet ze in deze situaties tussenkomen en ervoor zorgen dat de technologie voldoende ondersteuning krijgt om verder te evolueren. Dit kan in de vorm van subsidies gebeuren maar ook informeren, benchmarken en verplichtingen opleggen kunnen een oplossing bieden.

De cruciale vraag die zich hier stelt is *of* en *hoeveel* ondersteuning een technologie als  $\mu$ WKK nodig heeft om competitief te worden. Hier kan de leercurve antwoord op bieden.



Figuur 5.1: Leercurve  $\mu$ WKK

De huidige  $\mu$ WKK-technologie bevindt zich momenteel linksboven (in het punt 2010) op de curve in figuur 5.1. Investeringen zijn nodig om het leereffect in gang te zetten en de prijzen naar het breakevenpunt te brengen. Een indicator voor de vereiste leerinvesteringen is het verschil tussen de huidige en de breakeven prijs. Deze additionele kosten voor een  $\mu$ WKK-installatie vergeleken met de kost van een klassieke verwarmingsketel noemt men de 'onrendabele top'. Het is van belang dat hierbij op lange termijn gedacht wordt.

Succesvolle marktimplementatie zet een positieve prijs-groeycyclus in gang: marktgroei zorgt voor een leereffect en reduceert de prijs wat het product aantrekkelijker maakt en

weer verdere groei en prijsreducties stimuleert. Een technologie daarentegen die niet op de markt geraakt wegens te duur zal nooit van het leereffect kunnen genieten om de kostenbarrière te overkomen. Dit fenomeen legt aan de overheid zowel risico's als potentiële voordelen voor. Het risico bestaat uit de mogelijke uitsluiting van de  $\mu$ WKK – technologie van de markt indien deze niet gesteund wordt en dus geen kans krijgt om zich te ontwikkelen. Een ander risico kan zich voordoen wanneer de technologie ondanks ondersteuning het niet haalt op de markt. De voordelen situeren zich in de ontwikkeling van nieuwe energietechnologieën die hun bijdrage zullen hebben in de reductie van broeikasgassen (Wene, 2000).

### **5.3.1.3 Solidariteit**

In zijn Beleidsbrief Duurzame Ontwikkeling (2008) pleit Kris Peeters voor de bevordering van duurzame ontwikkeling in Vlaanderen. Duurzame ontwikkeling hangt nauw samen met het begrip solidariteit. Vlaanderen dient in haar acties en maatregelen solidair te zijn, zowel met deze als toekomstige generaties, zowel nationaal als internationaal.

Dit wijst op een dubbele solidariteit met de medemens. Enerzijds is er sprake van transgenerationale solidariteit of solidariteit ten opzichte van toekomstige generaties, anderszijds is er nood aan solidariteit met andere landen of transnationale solidariteit.

Zelfs wanneer externe kosten niet vermeden kunnen worden, noch de technologie competitief gemaakt kan worden, heeft de overheid de morele en ethische verplichting om  $\mu$ WKK te stimuleren omwille van deze dubbele solidariteit.

#### **5.3.1.3.1 Transgenerationale solidariteit**

Onze natuurlijke grondstoffen worden door diverse economische en menselijke consumptie aangetast en uitgeput. Duurzame ontwikkeling duidt op de nood om grenzen te stellen aan het gebruik van het milieu. De draagkracht van de aarde is gelimiteerd en er moet rekening gehouden worden met schaarse middelen. Een permanente aantasting van natuurlijke hulpbronnen kan ervoor zorgen dat onze toekomstige generaties niet meer over voldoende kwaliteitsvolle natuurlijke voorraden beschikken om in hun behoeften te voorzien (Dewulf, 2003).  $\mu$ WKK kan mee voor een oplossing zorgen.



De Vlaamse Milieumaatschappij (2007a) heeft een schatting gemaakt van de wereldwijde reserves en voorraden<sup>8</sup> van fossiele brandstoffen en splijtstoffen. Aan de huidige wereldproductiehoeveelheden zullen de momenteel ontginbare oliereserves nog tot 2045 (36 jaar) volstaan. Voor aardgas bestaat er een reserve van 58 jaar en de uraniumreserves (de voornaamste brandstof voor elektriciteitsproductie in kerncentrales) volstaan bij het huidige gebruik nog zo'n vier decennia. Het mondiale energieverbruik groeit echter jaarlijks en zal naar verwachting de komende decennia blijven toenemen. Het gevolg is dat de reserves eerder uitgeput zullen zijn dan deze voorspellingen.

Deze cijfers maken ons duidelijk bewust van de eindigheid van onze natuurlijke energiebronnen. Door meer brandstoffen over te laten voor de volgende generaties kunnen zij het eveneens voor andere doeleinden aanwenden. Een goede optie om dit te stimuleren, is het subsidiëren van bezuinigende technieken en installaties. De  $\mu$ WKK-technologie maakt deel uit van deze revolutie door brandstof beter aan te wenden en niet nodeloos kostbare energie te verspillen.

#### **5.3.1.3.2    *Transnationale solidariteit***

Men dient niet enkel solidair te zijn met volgende generaties, ook ten opzichte van andere bevolkingsgroepen van de huidige (en toekomstige) generaties is men een zekere vorm van solidariteit verschuldigd. In dit opzicht werd het begrip 'transnationale solidariteit' in het leven geroepen omwille van de ongelijke verdeling van de natuurlijke hulpbronnen op wereldschaal. De 'ecologische voetafdruk' is 's werelds eerste indicator die de impact van onze menselijke consumptie op de natuurlijke rijkdommen van de planeet uitdrukt. Met deze indicator wordt gemeten hoeveel aardoppervlakte (hectare) de 6,8 miljard bewoners van deze planeet nodig hebben om aan hun behoeften te voldoen. De inwoners van de Verenigde Staten leven op de grootste voet met een afdruk van ongeveer 9 hectare per persoon. Dit staat in schril contrast met de voetafdruk van vele Aziatische en Afrikaanse landen. Zo hebben een Indiër en Ethiopiër slechts 0,8 ha nodig. Voor België bedraagt de consumptie 5,5 ha per individu wat nog ver boven het wereldgemiddelde van 2,7 ha uitsteekt. Maar ook dit gemiddelde blijkt nog veel te hoog te liggen. We verbruiken de natuurlijke rijkdommen veel sneller dan ze zich kunnen

---

<sup>8</sup> Reserves zijn hoeveelheden niet-hernieuwbare energiebronnen die momenteel technologisch en economisch winbaar zijn. Van voorraden is het bestaan aangetoond door geologen maar deze zijn op dit ogenblik nog niet technologisch en economisch winbaar (Vlaamse Milieumaatschappij, 2007a).

herstellen. Om de biodiversiteit intact te houden, zou iedereen recht hebben op slechts 1,6 ha (World Wide Fund, 2008).

De sociale ongelijkheid tussen het rijke Noorden en het arme Zuiden uit zich niet enkel in de ecologische voetafdruk. Ook de impacten van de klimaatverandering zijn niet gelijk verdeeld. De armste ontwikkelingslanden worden het eerst en hardst getroffen door de klimaatverandering terwijl zij amper hebben bijgedragen tot het ontstaan van het probleem. Hun lage inkomens maken het moeilijk om aanpassingen te financieren. De internationale gemeenschap heeft dan ook de morele verplichting hen te steunen in de aanpassing aan de klimaatverandering. Speciale aandacht moet uitgaan naar landen die moeilijkheden ondervinden in het omschakelen van fossiele brandstoffen naar milieuvriendelijke alternatieven. Zodoende zijn we nu verplicht reeds ver vooruit te kijken en onze energieconsumptie drastisch bij te sturen (Stern et al., 2006).

#### **5.3.1.4 *Technologisch multiplicatoreffect***

Sommige technologische ontwikkelingen kunnen, afzonderlijk bekeken, onrendabel blijken. Ze kunnen echter een belangrijk positief effect hebben op de ontwikkeling van andere (gerelateerde) technologieën. Door te investeren in bepaalde opkomende technologieën kan onderzoek voortgezet en gestimuleerd worden. De technologie kan hierdoor verbeteren en de kans bestaat dat er zich nieuwe, betere technologieën ontwikkelen door gebruik te maken van deze vooruitgang.

Zoals eerder gesteld, staan  $\mu$ WKK's op basis van een Stirlingmotor het verst in technologische ontwikkeling. Het is dan ook met deze technologie dat de eerste veldtesten uitgevoerd worden. De resultaten van deze testen zijn zeer belangrijk in de ontwikkeling van  $\mu$ WKK, niet alleen om kinderziektes en andere problemen te verhelpen maar ze stimuleren ook het onderzoek naar en de ontwikkeling van andere technologieën. Dit geldt ondermeer voor  $\mu$ WKK's op basis van brandstofcellen. Men verwacht dat deze een hoger elektrisch rendement (30-50%) zullen behalen waardoor het mogelijk toekomstig knelpunt van een dalende warmtevraag door betere isolatie opgelost kan worden. Met andere woorden, ook voor huizen met een lagere warmtevraag zullen deze  $\mu$ WKK's in de toekomst wel rendabel worden, aangezien er, ondanks de lage warmtevraag, voldoende elektriciteit opgewekt kan worden (Feenstra, 2008).

$\mu$ WKK wordt tevens gezien als een transitietechnologie in de overgang naar een duurzame decentrale energievoorziening. Vermits de huidige  $\mu$ WKK's gebruik maken van fossiele brandstoffen (voornamelijk aardgas) is de technologie niet duurzaam en wordt verwacht dat deze weer vervangen zal worden door duurzame technologieën (Feenstra, 2008).

#### **5.3.1.5 Sociaal-economisch multiplicatoreffect**

Volgens het Europees Economisch en Sociaal Comité (2008) zijn duurzame economische groei en een hoog werkgelegenheidsniveau cruciaal voor een welvarend Europa. De Europese Unie streeft naar duurzame ontwikkeling gebaseerd op een evenwichtige economische groei en prijsstabiliteit, naar een sociale markteconomie met een groot concurrentievermogen die gericht is op volledige werkgelegenheid en sociale vooruitgang en naar een hoog niveau van bescherming en verbetering van de kwaliteit van het milieu. Dit kan verwezenlijkt worden door goed doordachte en uitgevoerde steunmechanismen bij de invoering van nieuwe (milieu)technologieën.  $\mu$ WKK vormt hier een onderdeel van. De steun zou een combinatie kunnen zijn van belastingheffingen, reguleringen en promotieacties. Vervolgens zou deze technologie zich zonder verdere steun kunnen ontwikkelen. Belangrijk hierbij is dat ieder financieel steunmechanisme degressief moet zijn omdat deze overheidssteun het internationale concurrentievermogen van andere sectoren niet mag schaden (Europees Economisch en Sociaal Comité, 2006).

Als gevolg van deze overheidssteun kunnen producenten anticiperen op een verdere groei van de  $\mu$ WKK-markt waardoor ze op zoek gaan naar personeel om deze technologie verder te ontwikkelen en te produceren. Dit creëert werkgelegenheid voor zowel ingenieurs die het product tegen zo laag mogelijke kosten en met een zo hoog mogelijke kwaliteit moeten ontwikkelen als voor arbeiders die nodig zijn voor de productie ervan. Daarnaast zorgt dit voor extra lokale werkgelegenheid aangezien er een bijkomende nood aan operators, supervisors en onderhoudspersoneel ontstaat.

Voor een onderneming is deze productiviteitsgroei van cruciaal belang voor het concurrentievermogen. Dit betekent minder snel stijgende kosten, een sterke prijsconcurrentiepositie, meer solvabiliteit qua lonen, zekerdere (en dus meer gewilde) banen, meer meerwaarde voor de klant met minder hulpbronnen en een belangrijke basis voor uitbreiding van de ondernemingsactiviteiten en voor investeringen (Europees Economisch en Sociaal Comité, 2008).

Voor het individu betekent productiviteitsgroei meer werkzekerheid en meer mogelijkheden om zich verder te ontwikkelen en naar een hoger salarisniveau door te stromen. Het resultaat is hoger gekwalificeerd personeel dat bij veranderende omstandigheden inzetbaar is (Europees Economisch en Sociaal Comité, 2008).

De creatie van werkgelegenheid heeft dus een positief effect op de productiviteitsgroei die op haar beurt de economie in het algemeen positief beïnvloedt. De hogere werkgelegenheid doet het gemiddeld inkomen en de koopkracht stijgen. Een deel van deze extra inkomens leidt tot extra consumptie waar andere sectoren ook van kunnen profiteren. Het uiteindelijke effect is een veelvoud van de oorspronkelijke investering van de overheid (multiplicatoreffect) (Gordon, 2009).

### **5.3.1.6 Technologisch effect**

Door de toename van hernieuwbare energie, de evolutie van elektrisch transport en duurzame energievoorziening staan onze elektriciteitsnetwerken voor grote uitdagingen. Het energiedistributienet is niet aangepast aan deze transitie. Om de duurzame energierevolutie mogelijk te maken, moet het energienetwerk 'intelligenter' worden.

#### **5.3.1.6.1 Netontlasting**

Een toename van het aantal  $\mu$ WKK-systemen zorgt ervoor dat de elektriciteitsproductie verschuift van een centrale productie naar een meer gedecentraliseerde productie. De gebruiker van de  $\mu$ WKK-energie bevindt zich dichtbij de installatie wat transportverliezen minimaliseert. De klant is dus minder afhankelijk van één centrale waardoor de beschikbaarheid van elektrische energie vergroot en de transportverliezen gereduceerd worden (Cogen Vlaanderen, 2006). De aanschaf van een eigen 'energiecentrale' in huis zorgt er tevens voor dat het net op piekmomenten ontlast wordt.

#### **5.3.1.6.2 Slimme netten en slimme meters**

Het energienet 'intelligenter' maken, kan gebeuren door te evolueren naar een 'smart grid' of slim net. Dit is een energienetwerk dat centrale en decentrale energieopwekking feilloos combineert en dat in staat is om om te gaan met fluctuerende energievragen<sup>9</sup> (VITO, 2009b).

---

<sup>9</sup> Smart grids worden uitgebreider besproken in paragraaf 7.2.

Naast een slim net bestaan er ook 'slimme meters'. Onder een slimme meter verstaat de VREG (2009d) een meter die het energieverbruik op het moment zelf vaststelt en de mogelijkheid biedt om het verbruik zowel lokaal als van op afstand uit te lezen. Deze meter kan tevens gebruikt worden om het energieverbruik van op afstand te beperken of de verbruiker aan of af te schakelen.

Door de invoering van deze meters moeten geen fysieke meteropnames meer gebeuren. Slimme meters laten ook toe om afnemers meer informatie te geven over hun verbruik zodat ze hun gedrag kunnen aanpassen (VREG, 2009d).

### **5.3.1.7 Verminderde afhankelijkheid**

Vlaanderen is in grote mate afhankelijk van buitenlandse leveranciers van elektrische stroom en aardgas waardoor onze economie en welvaart zeer kwetsbaar zijn. De Vlaamse capaciteit is onvoldoende om in de eigen behoefte te voorzien. Een grotere mix van energiebronnen en een efficiënter gebruik door toepassing van decentrale energieopwekking met  $\mu$ WKK kunnen een grotere autonomie bewerkstelligen (Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, 2008).

## **5.3.2 Bestaande subsidiemaatregelen**

### **5.3.2.1 Investeringsubsidie**

De federale regering heeft een aantal subsidiemaatregelen uitgewerkt om energiebesparing bij nieuwbouw en renovatie van woningen aan te moedigen. De vervanging van een oude stookketel door een systeem van  $\mu$ WKK valt ook onder deze regeling.

Vanaf het inkomstenjaar 2009 (= aanslagjaar 2010) komt 40% van de investeringsuitgaven in aanmerking voor belastingvermindering. De belastingvermindering bedraagt maximaal 2770 EUR per jaar per woning. Wanneer de woning minstens 5 jaar oud is en de energiebesparende uitgaven de 40% belastingvermindering van 2770 EUR overschrijden, mag het resterende bedrag overgedragen worden naar de drie volgende belastbare tijdperken (VEA, 2009a).

### **5.3.2.2 Groene lening**

Bovendien verleent de overheid een bonificatie van 1,5% (interestverlaging) voor elke lening (van 1250 – 30 000 EUR) die een natuurlijk persoon tussen 1 januari 2009 en 31 december 2011 bij een kredietverstrekker aangaat voor energiebesparende investeringen. Op het saldo van de betaalde intresten wordt tevens bovenvermelde belastingvermindering toegekend. De lening kan de vorm aannemen van een consumentenkrediet of een hypothecair krediet (VEA, 2009b).

## **5.4 WARMTEKRACHTCERTIFICATEN**

Een extra ondersteuningsmechanisme om een  $\mu$ WKK-project in de huidige economische context haalbaar te maken, is het systeem van warmtekrachtcertificaten of WKC's. Deze certificaten worden sinds 1 januari 2005 in het Vlaams gewest toegekend om de primaire energiebesparing door het gebruik van kwalitatieve WKK te bevorderen. Dit systeem wordt beschreven in het Besluit van de Vlaamse Regering van 7 juli 2006 inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties. De bevoegde instelling voor deze regelgeving is de Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (VREG, 2009a).

Het feit dat WKK warmte en elektriciteit produceert met minder brandstof of primaire energie dan gescheiden productie, vormt de grondslag van het warmtekracht-certificatensysteem. De certificaten worden toegekend op basis van de primaire energiebesparing die een kwalitatieve WKK realiseert. Een kwalitatieve WKK wordt in het Besluit van de Vlaamse Regering van 7 juli 2006 gedefinieerd als een WKK-installatie die een primaire energiebesparing van ten minste 10% oplevert ten opzichte van de referentie voor de gescheiden productie van warmte en elektriciteit. Voor  $\mu$ WKK-eenheden (met een vermogen kleiner dan 1 MWe) is een primaire energiebesparing van 0% reeds voldoende om in aanmerking te komen voor kwalitatieve WKK. De relatieve primaire energiebesparing (RPE) wordt als volgt bepaald (VREG, 2009a):

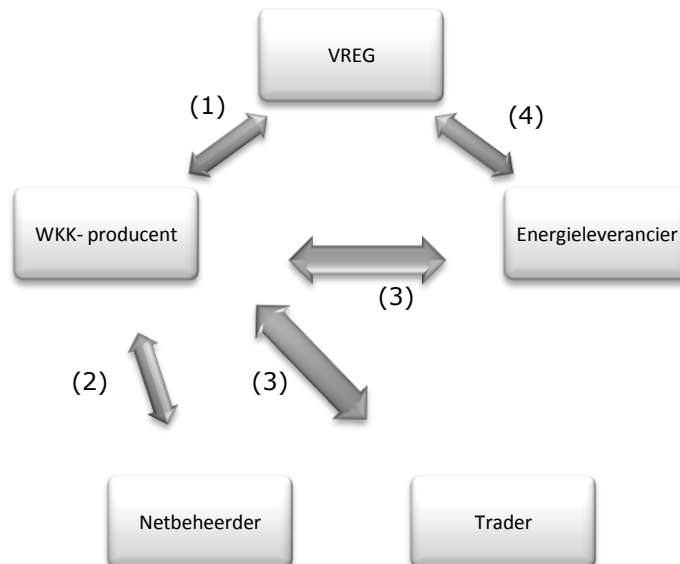
$$RPE = \left( 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} + \frac{\alpha_E}{\eta_E}} \right) * 100\%$$

waarbij  $\eta_Q$  = het thermisch rendement van de referentieketel  
 $\alpha_Q$  = het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie  
 $\eta_E$  = het elektrisch rendement van de referentiecentrale  
 $\alpha_E$  = het elektrisch rendement van de warmtekrachtinstallatie

Het Besluit van de Vlaamse overheid (2006) vermeldt tevens welke referentierendementen in acht moeten genomen worden. Zo stellen we in het geval van  $\mu$ WKK het thermisch rendement van de referentieketel gelijk aan 90% en het elektrisch rendement van de referentiecentrale gelijk aan 50%.

Eén warmtekrachtcertificaat toont aan dat 1 MWh primaire energie werd bespaard. De certificaten worden niet uitgegeven op papier maar door de VREG in een centrale databank bewaard die door de WKK-producenten kan worden geraadpleegd (VREG, 2009a).

Aan de hand van figuur 5.2 wordt het systeem van warmtekrachtcertificaten uitgelegd (VREG, 2009b).



Figuur 5.2: Het systeem van warmtekrachtcertificaten

De WKK-producten rapporteren maandelijks alle gegevens die nodig zijn om de primaire energiebesparing te berekenen aan de VREG. Op basis van deze meetgegevens kent de VREG certificaten toe aan de eigenaars van WKK-installaties. (1)

De producenten van elektriciteit uit kwalitatieve WKK hebben enerzijds de mogelijkheid om hun WKC's te verkopen tegen een wettelijke vastgelegde minimumprijs aan hun netbeheerders (2). Deze minimumprijs werd in het Elektriciteitsdecreet vastgelegd op €27. Anderzijds kunnen producenten hun certificaten verkopen op de vrije markt aan traders of energieleveranciers tegen een te onderhandelen prijs (3).

Alle energieleveranciers hebben de verplichting om jaarlijks een aantal groenestroom- en warmtekrachtcertificaten in te dienen bij de VREG voor de certificatenverplichting, op straffe van boete per ontbrekend certificaat. Ook leveranciers die zich ertoe verbinden om stroom, die opgewekt werd met WKK, te leveren aan hun klanten, kunnen deze certificaten gebruiken als garantie van oorsprong (4).

Om het aantal te bekomen certificaten te berekenen, dient de absolute primaire energiebesparing van de installatie maandelijks berekend te worden. De VREG kent vervolgens één certificaat toe per gerealiseerde MWh primaire energiebesparing in de voorbije maand. De formule om de absolute primaire energiebesparing te bepalen, luidt als volgt (Cogen Vlaanderen, 2009a):

$$PEB = E * \left( \frac{1}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\alpha_E * \eta_Q} - \frac{1}{\alpha_E} \right)$$

waarbij  $E$  = de binnen de beschouwde periode (=maand) door de warmtekrachtinstallatie geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (MWh)  
 $\eta_Q$  = het thermisch rendement van de referentieketel  
 $\alpha_Q$  = het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie  
 $\eta_E$  = het elektrisch rendement van de referentiecentrale  
 $\alpha_E$  = het elektrisch rendement van de warmtekrachtinstallatie

Voor het elektrisch en thermisch rendement van de WKK-installatie worden de gemiddelden van de operationele rendementen genomen over de beschouwde periode. Voor installaties met een nominaal elektrisch vermogen kleiner dan 200 kWe, mogen



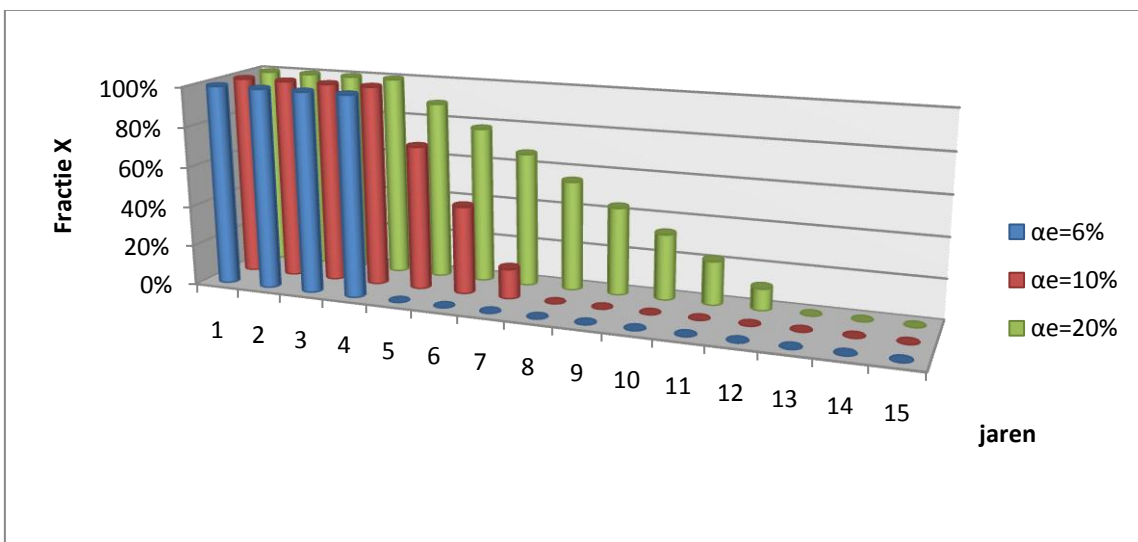
ontwerpgegevens voor deze rendementen gebruikt worden (Cogen Vlaanderen, 2009a). Deze uitzondering geldt dus ook voor de  $\mu$ WKK's die bedoeld worden in deze eindverhandeling (1 kWe).

Verder dient vermeld te worden dat enkel gedurende de eerste vier jaar dat een WKK-installatie operationeel is, alle toegekende certificaten ingediend mogen worden. Daarna wordt slechts een fractie X van het aantal toegekende certificaten aanvaard. Deze fractie wordt berekend op basis van de relatieve primaire energiebesparing (RPE) zodat een installatie die relatief veel brandstof bespaart langer kan genieten van de certificaten en bijgevolg meer steun krijgt. Om de fractie X te bepalen, wordt volgende formule gebruikt (Cogen Vlaanderen, 2009a):

$$X = \frac{RPE - 0,2 * (T - 48)}{RPE}$$

waarbij RPE = relatieve primaire energiebesparing  
T = de tijd in maanden sinds de indienstname van de installatie

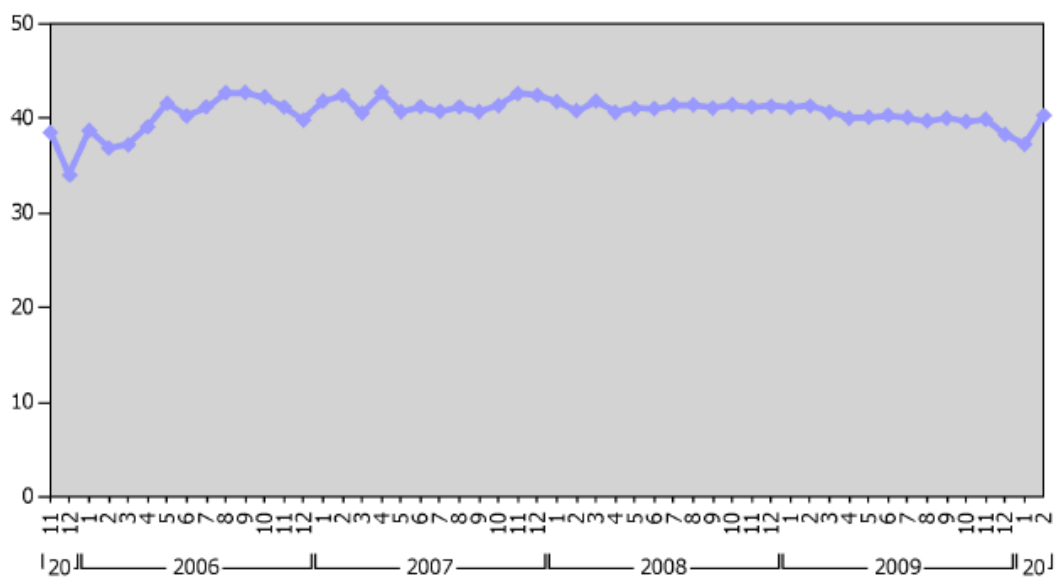
Figuur 5.3 toont het degressieve verloop van het aantal WKC's in de tijd. In dit voorbeeld werd gewerkt met eerder vermelde referentierendementen, een thermisch rendement van 80% voor de  $\mu$ WKK, en drie verschillende elektrische rendementen voor de  $\mu$ WKK.



Figuur 5.3: Verloop van het aantal WKC's in de tijd

Hieruit blijkt duidelijk dat het elektrisch rendement van de  $\mu$ WKK een belangrijke parameter is die het aantal te bekomen certificaten beïnvloedt. Een  $\mu$ WKK met een elektrisch rendement van 8% krijgt enkel de eerste vier jaren het volledige aantal certificaten toegekend. In geval van een elektrisch rendement van 10% kan de eigenaar drie jaar langer van de certificaten genieten, zij het wel slechts een fractie van het oorspronkelijk aantal certificaten. Bij een elektrisch rendement van 20% worden 12 jaar lang certificaten toegekend aan een degressief verloop.

Certificaatsystemen zijn nog relatief jonge systemen en er kan bijgevolg nog niet veel verteld worden over hoeveel de marktprijs bedraagt onder reële omstandigheden (Cogen Vlaanderen, 2009a). Figuur 5.4 toont de gemiddelde prijs van een WKC per maand vanaf november 2005. De gemiddelde marktprijs in februari 2010 bedroeg 40,32 EUR per certificaat (VREG, 2010b). Bovendien hebben eigenaars van een  $\mu$ WKK de mogelijkheid om hun WKK-certificaten te verkopen aan hun distributienetbeheerder tegen een vastgelegde minimumprijs van 27 EUR (VREG, 2009b).



Figuur 5.4: Evolutie van de gemiddelde prijs per WKC per maand vanaf november 2005 (VREG, 2010b)

De nieuwsbrief van Cogen Vlaanderen (2009b) geeft een schatting van het aantal te bekomen WKC's naargelang het vermogen van de  $\mu$ WKK-installatie. Hieruit blijkt dat  $\mu$ WKK's van 1 kWe slechts 3 à 4 WKC's per jaar kunnen verwachten, wat overeenkomt

met een opbrengst van 120 – 160 EUR per jaar. Om deze reden vragen eigenaars van deze kleine installaties de certificaten vaak niet aan.

Ook de omslachtige aanvraagprocedure voor WKC's ontmoedigt kleine producenten vaak om deze aan te vragen. Zo beslaat het aanvraagformulier voor WKK-installaties met een vermogen kleiner dan 10 kW 8 bladzijden. Hierbij moet onder andere een keuze gemaakt worden uit 11 mogelijke technologieën, een energiestroomdiagram voorzien worden en rendementen ingevuld worden die vaak niet duidelijk terug te vinden zijn in de technische specificaties van fabrikanten (VREG, 2009c; Six & Dexters, 2009).

## **5.5 ECONOMISCHE RENDABILITEITSMATSTAVEN**

Teneinde een uitspraak te kunnen doen over de economische rendabiliteit van een investering, kunnen enkele economische maatstaven berekend worden. Gezien de cruciale rol die het element 'tijd' in een investeringsproject speelt, mag de tijds waarde van het geld niet verwaarloosd worden. De belangrijkste maatstaven die hiermee rekening houden, zijn de netto contante waarde (NCW), de dynamische terugverdientijd (DTV) en de interne rendementsvoet (IR).

### **5.5.1 De netto contante waarde**

De netto contante waarde van een investering wordt berekend door de huidige waarde van de netto-kasstroom te verdisconteren tegen een gekende kapitaalkost. Het NCW-criterium vereist dat de contante waarde van de netto-opbrengsten minstens even groot is als de initiële investeringsuitgave, met ander woorden, de NCW moet ten minste gelijk zijn aan nul om de investeringsuitgave te verantwoorden (Mercken, 2004; Laveren, Engelen, Limère & Vandemaele, 2004).

De NCW wordt bepaald volgens onderstaande formule (Mercken, 2004):

$$NCW = \sum_{t=1}^n [(O_t - Q_t) * A_{t-i}] - I_0$$

waarbij        n = tijdsduur van de investering (in jaren)  
                   $O_t$  = de inkomende kasstromen in jaar t  
                   $Q_t$  = de uitgaande kasstromen in jaar t

$$A_{t-i} = \text{annuïteitenfactor} = \frac{1}{(1+i)^t}$$

$I_0$  = de investeringskost in jaar 0

Hierbij stelt  $i$  de reële rente - of actualisatievoet voor. In deze rentevoet zit de inflatie verwerkt. Naast een vergoeding voor de tijd incorporeert de NCW nu ook een vergoeding voor het verlies aan koopkracht (Mercken, 2004).

### **5.5.2 De verdisconteerde terugverdientijd**

De terugverdientijd kan algemeen omschreven worden als de tijd die nodig is om de oorspronkelijke investering ( $I_0$ ) terug te verdienen via de inkomende kasstromen van het investeringsproject (Mercken, 2004). Hiervoor wordt op voorhand de maximaal toegelaten terugverdientijd bepaald. Vervolgens wordt de terugverdientijd van het project berekend en vergeleken met de norm.

De verdisconteerde terugverdientijd (DTVT) is een variant van de gewone terugverdientijd waarbij rekening gehouden wordt met de tijdswaarde van het geld (Mercken, 2004). Om dit te berekenen wordt in Excel een kolom opgesteld met de gecumuleerde verdisconteerde kasstromen. Vervolgens zoekt Excel via lineaire interpolatie wanneer deze kasstromen positief worden, met andere woorden, de verdisconteerde terugverdientijd.

### **5.5.3 De interne rendementsvoet**

De interne rendementsvoet (IR) wordt gedefinieerd als de actualisatievoet die leidt tot een zero NCW. Bij een conventionele investering<sup>10</sup> kan de IR beschouwd worden als de maximale interestvoet die een investeerder zou kunnen betalen, zonder geld te verliezen, indien de investering gefinancierd wordt met een lening en de lening (aflossingen en interesten) door de inkomende kasstromen van het project terugbetaald wordt (Mercken, 2004).

---

<sup>10</sup> Een conventionele investering wordt gekenmerkt door één of meerdere periode van netto-uitgaande kasstromen gevolgd door één of meerdere perioden van netto-inkomende kasstromen (Mercken, 2004). Dit is het geval bij de aankoop van een  $\mu$ WKK. In 'jaar 0' wordt de investeringsuitgave gedaan, de daaropvolgende jaren verdient de investering zich terug door de subsidies, WKC's en vermeden elektriciteitsaankoop.

De IR kan gevonden worden door de NCW gelijk aan nul te stellen en de bijhorende rentevoet te berekenen. Aangezien dit een complexe formule wordt, zullen we dit met Excel berekenen.

## **5.6 MONTE CARLO-SIMULATIE**

Voor een investeringsproject geldt dat zowat alle parameters probabilistisch van aard zijn. Dit is dus ook het geval bij de investering in een  $\mu$ WKK-installatie. In werkelijkheid wordt het uiteindelijke resultaat bepaald door een nu nog ongekende combinatie van deze parameterwaarden (Mercken, 2004).

De essentie van een Monte Carlo-simulatie ligt in het feit dat er experimenten worden uitgevoerd waarbij telkens een scenario wordt samengesteld op basis van toevallig gekozen waarden voor de diverse parameters. Voor ieder scenario zullen voorgaande economische rendabiliteitsmaatstaven berekend worden. Door dit experiment een zeer groot aantal keren uit te voeren, verkrijgt men een kansverdeling van iedere economische maatstaf (Mercken, 2004).

Een Monte Carlo-simulatie bestaat uit vijf stappen (Mercken, 2004):

- 1) De identificatie van de parameters waarvan de waarde onzeker is
- 2) Bepaling van de kansverdeling voor de parameters
- 3) Voor iedere parameter een toevallige keuze van de parameterwaarde op basis van een toevalsgetallengenerator
- 4) Berekening van de economische maatstaven
- 5) Verzamelen van de experimentele gegevens en verwerking tot een kansverdeling voor iedere maatstaf

Deze stappen zullen in het praktijkonderzoek verder omschreven worden.

## **6 μWKK: ENERGETISCHE EN ECOLOGISCHE ASPECTEN**

---

### **6.1 PRIMAIRE ENERGIEBESPARING**

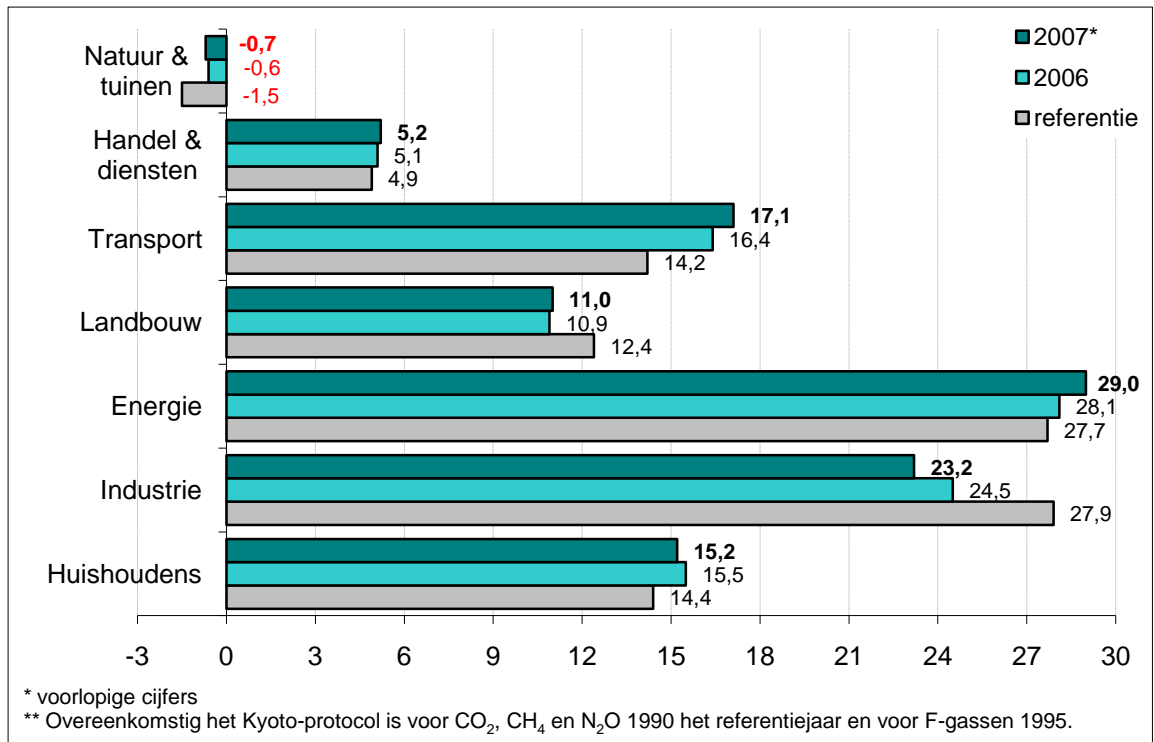
Indien ze goed gedimensioneerd worden en zowel de warmte als de elektriciteit integraal benut worden, besparen alle WKK-installaties brandstofenergie. Ze hebben immers een lager primair brandstofverbruik dan de gescheiden opwekking van eenzelfde hoeveelheid elektriciteit en warmte. Deze primaire energiebesparing werd reeds geïllustreerd in paragraaf 3.4.

Daarnaast besparen WKK-systemen energie aangezien ze zich veel dichterbij de gebruiker bevinden dan de centrale elektriciteitscentrales. Op deze manier reduceren ze de elektrische energieverliezen via het transport- en distributienetwerk. Deze kunnen 8-10% bedragen van de elektrisch energie aan de bron (Cogen Vlaanderen, 2006).

### **6.2 EMISSIEREDUCTIE**

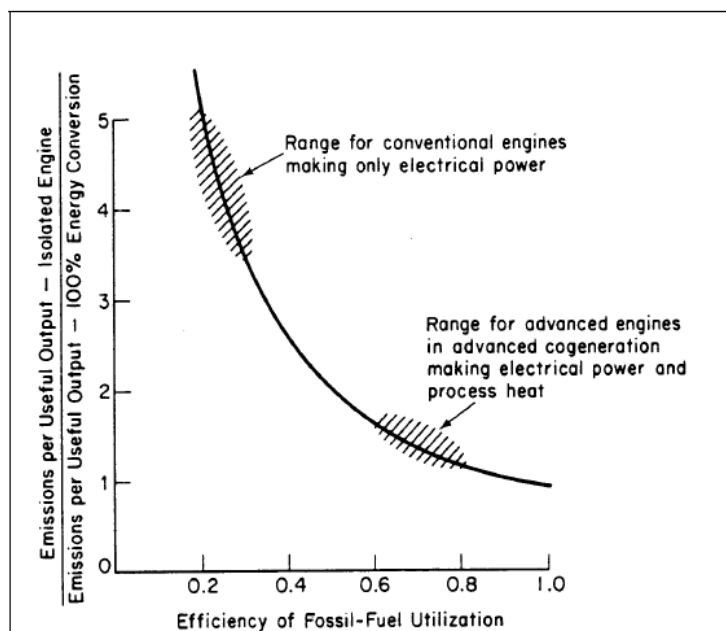
#### **6.2.1 De energiesector**

Daar waar in de eerste helft van de jaren 90 de industrie nipt de belangrijkste bron van broeikasgassen vormde in Vlaanderen, heeft inmiddels de energiesector deze plaats nadrukkelijk ingenomen. Zoals blijkt uit figuur 6.1 nam de energiesector in 2007 29% van alle broeikasgassen voor haar rekening (MIRA, 2009b). In deze sector schuilt dus een enorm potentieel om de uitstoot aan broeikasgassen in Vlaanderen te reduceren.



Figuur 6.1: Aandeel van de Vlaamse sectoren in de broeikasemissies 2006-2007 (MIRA, 2009b)

De grootste reducties in broeikasgassen zullen uiteraard bereikt worden door gebruik te maken van hernieuwbare energiebronnen zoals zonne- en windenergie. Maar ook (μ)WKK-systemen kunnen een reductie in vervuilende en schadelijke emissies verwezenlijken omdat ze doorgaans de brandstof efficiënter benutten dan bij gescheiden opwekking. De voorwaarde hierbij is wel dat de gebruikte brandstof van minstens even hoge kwaliteit moet zijn dan de brandstoffen die gebruikt worden bij gescheiden opwekking. Figuur 6.2 maakt duidelijk dat een hogere brandstofbenuttingsgraad gepaard gaat met lagere emissies van vervuilende stoffen (Cogen Vlaanderen, 2006).



Figuur 6.2: Impact van de totale brandstofbenuttigingsgraad op de emissies van vervuilende elementen (Belding, 1982)

Als aanvulling op de directe reductie van emissies impliceert een lager brandstofverbruik tevens een indirecte daling van de emissies in de volledige brandstofcyclus: exploratie, extractie, raffinage, verwerking, transport en opslag (Cogen Vlaanderen, 2006).

### 6.2.2 De huishoudens

Het aandeel van de huishoudens in de totale Vlaamse broeikasgasemissies bedroeg 15,2% in 2007 (MIRA, 2009b). Dit maakt de huishoudens tot de vierde grootste broeikasgasproducent van Vlaanderen. Deze hoge uitstoot wordt voor 97,3%<sup>11</sup> veroorzaakt door de verbranding van brandstoffen voor verwarming.

De verwarmingsbehoefte en de daarmee gepaarde gaande uitstoot van broeikasgassen kan sterk verlaagd worden door het beter isoleren van daken, het installeren van isolerend glas, het inzetten van hernieuwbare energiebronnen maar ook door het vervangen van verouderde, inefficiënte verwarmingsinstallaties (MIRA, 2009c). In deze laatste categorie valt de implementatie van een  $\mu$ WKK-systeem. Residentiële  $\mu$ WKK biedt dus één van de mogelijke oplossingen om de emissies van huishoudens te reduceren.

<sup>11</sup> De resterende 2,7% van de emissies zijn afkomstig van het lozen van afvalwater en van septische putten (MIRA, 2009c).



### 6.3 SOORTEN EMISSIES

Een inschatting van de gevolgen van  $\mu$ WKK op de luchtkwaliteit is een complexe analyse aangezien de emissies van schadelijke stoffen ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,...) per locatie kunnen verschillen en dus een sterke lokale impact hebben. Voor emissies van broeikasgassen is dit niet het geval omdat deze uitsluitend een globale impact hebben op het klimaat. De invloed van  $\mu$ WKK kan positief zijn (verminderde emissies) in de buurt van de elektriciteitscentrale die de regio van energie voorziet, maar kan negatief zijn op de plaats waar het  $\mu$ WKK-systeem geïnstalleerd is. Dit verschil vereist om een tweeledige analyse uit te voeren: zowel op lokaal als op globaal niveau (Cogen Vlaanderen, 2006).

De meest vervuilende en schadelijke componenten die terug te vinden zijn in de uitlaatgassen van brandstoffen zijn de volgende (Cogen Vlaanderen, 2006):

- De eerder vernoemde broeikasgassen, voornamelijk  $\text{CO}_2$
- Koolmonoxide  $\text{CO}$
- Stikstofoxiden  $\text{NO}_x$
- Zwaveloxiden  $\text{SO}_x$
- Onverbrande koolwaterstoffen  $\text{C}_x\text{H}_y$
- Stofdeeltjes

Voor de berekening van vervuilende schadelijke emissies en de eventuele besparing hierop door toepassing van  $\mu$ WKK, zijn twee elementen van belang (Six & Dexters, 2009):

- 1) De  $\text{CO}_2$ -intensiteitsfactor<sup>12</sup> van aardgas
- 2) De  $\text{CO}_2$ -intensiteitsfactor van het centrale elektriciteitspark

Bij het tweede element, de  $\text{CO}_2$ -intensiteitsfactor van het centrale elektriciteitspark, moet rekening gehouden worden met de verschillende soorten elektriciteitscentrales die in de regio in werking zijn (STEG, gasgestookt, nucleair,...) (Six & Dexters, 2009). Beide elementen zullen in de praktijkstudie van deze eindverhandeling onderzocht worden.

---

<sup>12</sup> Dit is de hoeveelheid  $\text{CO}_2$  die uitgestoten wordt per eenheid verstoekte brandstof en wordt doorgaans in  $\text{kg CO}_2/\text{kWh}$  weergegeven (Cogen Vlaanderen, 2006).

## 6.4 EMISSIEBALANS

Als hulpmiddel om de emissies van schadelijke stoffen van een  $\mu$ WKK-systeem te vergelijken met deze van gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte, stelt Cogen Vlaanderen (2006) de emissiebalans voor. Deze wordt berekend voor iedere pollutant. Vermits de vervuiling zich nu op twee plaatsen kan voordoen, wordt er zowel een globale als een lokale balans opgesteld.

### 6.4.1 Globale emissiebalans

Voor een bepaald bestanddeel X wordt de massabalans als volgt weergegeven (Cogen Vlaanderen, 2006):

$$\Delta m_X = m_{XC} - m_{XE} - m_{XQ}$$

waarbij  $\Delta m_X$  = het massaverschil van het geëmitteerde bestanddeel X te wijten aan de implementatie van  $\mu$ WKK ( $\Delta m_X < 0$ :  $\mu$ WKK veroorzaakt een daling in de emissie van X)

$m_{XC}$  = massa van het geëmitteerde bestanddeel bij  $\mu$ WKK

$m_{XE}$  = massa van het bestanddeel X, uitgestoten door de gescheiden productie van dezelfde hoeveelheid elektriciteit E als bij  $\mu$ WKK

$m_{XQ}$  = massa van het bestanddeel X, uitgestoten door de gescheiden productie van dezelfde hoeveelheid warmte Q als bij  $\mu$ WKK

Om deze componenten te kunnen berekenen, zijn onderstaande vergelijkingen nodig:

$$m_{XC} = \mu_{XC} * E$$

$$m_{XE} = \mu_{XE} * E$$

$$m_{XQ} = \mu_{XQ} * Q$$

waarbij  $\mu_{XC}$  = de specifieke emissie van het bestanddeel X (massa per nuttige energie) bij  $\mu$ WKK

$\mu_{XE}$  = specifieke emissie van het bestanddeel X (massa per nuttige energie) bij gescheiden opwekking van elektriciteit

$\mu_{XQ}$  = specifieke emissie van het bestanddeel X (massa per nuttige energie) bij gescheiden opwekking van warmte

$E$  = elektrische energie geproduceerd door  $\mu$ WKK

$Q$  = nuttige thermische energie geproduceerd door  $\mu$ WKK

#### **6.4.2 Lokale emissiebalans**

Indien we enkel rekening houden met de impact van emissies op lokaal niveau wordt de emissiebalans vereenvoudigd tot (Cogen Vlaanderen, 2006):

$$\Delta m_x = m_{xQ} - m_{xE}$$

waarbij de symbolen dezelfde betekenis hebben als in de vorige emissiebalans.

### **6.5 VOORWAARDEN VOOR EMISSIEREDUCTIE**

Veldtesten van Carbon Trust (2007) in het Verenigd Koninkrijk tonen aan dat de jaarlijkse warmtevraag van een woning een bruikbare maatstaf is om te achterhalen of een huis een hoge waarschijnlijkheid heeft om aanzienlijke emissiereducties te realiseren. De resultaten van deze testen laten zien dat er een sterke correlatie bestaat tussen de tijdsduur dat een  $\mu$ WKK-systeem operationeel is en het geassocieerde potentieel voor CO<sub>2</sub>-besparing. Om een netto CO<sub>2</sub>-reductie te bewerkstelligen ten opzichte van de gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit, moet de  $\mu$ WKK-installatie gemiddeld minstens één uur draaien zonder te stoppen, elke keer dat het systeem wordt opgestart. Deze langere draaitijden doen zich het meest voor in huizen met een hogere warmtevraag.

Ook een correcte dimensionering van de  $\mu$ WKK-installatie blijkt een bepalende factor te zijn in de potentiële emissiereductie. Indien aan deze voorwaarden voldaan is, kan een emissiereductie van 5-10% bereikt worden ten opzichte van een klassieke verwarmingsketel (Carbon Trust, 2007).

## 7 RANDVOORWAARDEN, BARRIÈRES & RISICO'S

---

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de randvoorwaarden die nodig zijn voor de introductie van  $\mu$ WKK in Vlaanderen. Hieruit volgen tevens de mogelijke risico's die zich kunnen voordoen bij de introductie en een overzicht van de barrières die overwonnen moeten worden.

### 7.1 MARKTPOTENTIEEL

Aangezien de Stirlingmotoren die momenteel ontwikkeld worden een lage kracht-warmteverhouding kennen en het feit dat start-stopverliezen<sup>13</sup> zoveel mogelijk beperkt moeten worden, heeft ertoe geleid dat Stirling-gebaseerde  $\mu$ WKK's hoofdzakelijk geschikt zijn voor woningen met een voldoende grote warmtevraag. Dit geeft de  $\mu$ WKK-eenheid de mogelijkheid om voldoende uren te draaien om een relevante hoeveelheid elektriciteit op te wekken op jaarbasis. Het is namelijk deze elektriciteitsproductie die leidt tot een CO<sub>2</sub>- en energiebesparing en er gelijktijdig voor zorgt dat de installatie economisch gezien rendabel wordt, gezien de elektriciteitsprijs hoger ligt dan die van gas (Six & Dexters, 2009).

In hun studie over  $\mu$ WKK in Vlaanderen deden Six en Dexters (2009) een rondvraag bij Stirlingfabrikanten over de targetmarkt waar zij zich op richten en over de 'ideale' woning die zich leent voor  $\mu$ WKK. Hieruit bleek dat nieuwbouwwoningen niet tot de doelgroep behoren. De steeds strenger wordende energieprestatienormen voor woningen impliceren immers betere isolatie en dus minder energieverbruik waardoor  $\mu$ WKK niet rendabel is. Het zijn dus vooral renovatiewoningen die in aanmerking komen. Verder is een bewoonbare en verwarmde oppervlakte van meer dan 110 m<sup>2</sup> vereist. Tenslotte dient het referentiegasverbruik tussen de 18 en 30 MWh per jaar te liggen.

Deze laatste voorwaarde dient met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd te worden aangezien de variabele energie-inhoud van aardgas (hoogwaardig of laagwaardig) een verschil kan geven wanneer dit uitgedrukt wordt in kWh. Indien we deze indicatie in m<sup>3</sup> uitdrukken, blijkt 1500 - 1600 m<sup>3</sup> de benedengrens te zijn voor  $\mu$ WKK's op basis van een Stirlingmotor. Met het referentiegasverbruik wordt het verbruik bedoeld van een huidige

---

<sup>13</sup> Een Stirlingmotor genereert door de trage opstart niet onmiddellijk zijn maximale hoeveelheid elektriciteit.

condenserende gasketel. Uitgaande van een globaal rendement van 90% komt dit neer op een jaarlijkse warmtevraag van 16 - 27 MWh. Oudere installaties behalen echter geen globaal rendement van 90% waardoor de warmtevraag op basis van aardgasverbruik overschat kan worden (Six & Dexters, 2009).

De veldtesten van Carbon Trust (2007), uitgevoerd met  $\mu$ WKK's op basis van een Stirlingmotor met een kracht-warmteverhouding van 0,1, bevestigen deze voorwaarden. Uit de testen blijkt dat deze  $\mu$ WKK's gericht zijn op huizen met een jaarlijkse warmtevraag groter dan 20 MWh. Typische voorbeelden hiervan zijn huizen gebouwd vóór 1920 waar het niet praktisch of kosteneffectief is om beter te isoleren en huizen met een bewoonbare oppervlakte van meer dan 110 m<sup>2</sup>.

Een extra voorwaarde om een emissiereductie te bewerkstelligen, is het rechtlijnige karakter van de warmtevraag. Dit werd reeds aangehaald in hoofdstuk 6, de ecologische en energetische aspecten van  $\mu$ WKK. Telkens de  $\mu$ WKK-installatie wordt gestart, is een draaitijd van minstens één uur noodzakelijk om de uitstoot te verminderen (Carbon Trust, 2007).

Een volledige marktanalyse voor het potentieel van  $\mu$ WKK in Vlaanderen valt buiten het bestek van deze eindverhandeling. Hiervoor verwijzen we naar de marktstudie van Six en Dexters (2007) in opdracht van het VEA. Zij kwamen tot de conclusie dat Vlaanderen een jaarlijks potentieel biedt van 23 000 tot 46 000  $\mu$ WKK-eenheden eens de commercialisering (en bijgevolg een kostprijzdaling) aan de gang is.

## **7.2 IMPACT OP HET ELEKTRICITEITSNET**

Eén enkele microgenerator op zich heeft geen impact op het distributienet maar wanneer een groot aantal decentrale generatoren geïnstalleerd worden in elkaars geografische nabijheid, kan hun collectieve impact wel significant zijn en voor problemen zorgen (Thomson, 2008). Deze decentrale generatoren kunnen zowel  $\mu$ WKK's als andere installaties zijn die op het elektriciteitsnet worden aangesloten, zoals windmolens en zonnepanelen (Synergrid, 2008).

Al van oudsher is het elektriciteitsnet in Vlaanderen opgebouwd voor een 'top-down flow' van elektrische energie, met name van de grote centrales naar de kleine verbruikers. Dit

net is dus niet voorzien op connecties van alsmaar meer decentrale generatoren. Het grootste probleem stelt zich bij inverse vermogensflows die zich voordoen wanneer de decentrale eenheid een teveel aan elektriciteit teruglevert aan het net. Dit kan onder andere problemen veroorzaken met de spanningsprofielen en de beveiliging tegen overstroom. De netontkoppelingsrelais moet er bij een fout op het net voor zorgen dat de decentrale generator uitgeschakeld wordt. Hierna kan het net zich terug in oorspronkelijke staat herstellen en kunnen de netwerkbeveiligingen opnieuw hun werk doen. Vervolgens kunnen de decentrale eenheden weer gesynchroniseerd worden met het net (Synergrid, 2008; Six & Dexters, 2009).

Naarmate er steeds meer decentrale eenheden op het net worden aangesloten (zonnepanelen, windmolens,  $\mu$ WKK), zal deze traditionele top-down benadering niet meer opgaan.

Op dit moment worden deze eenheden op het net geconnecteerd volgens het 'fit & forget' principe: ze worden met andere woorden niet actief in rekening gebracht bij de uitbating omdat hun invloed op het net te gering wordt geacht. Bij een verregaande penetratie van decentrale eenheden zal het elektriciteitsnet bovenstaande problemen niet meer alleen kunnen oplossen. Door te evolueren van een passief (fit & forget) naar een actief elektriciteitsnet in de vorm van 'smart grids' kunnen deze problemen in de hand gehouden worden.

Een smart grid is een energienetwerk dat centrale energieopwekking feilloos combineert met decentrale energieproductie enerzijds en fluctuerende energievragen en -opslagmogelijkheden anderzijds. Het is dus een stroomnet dat goed in staat is om de variabele pieken en dalen in de productie van elektriciteit (zoals dit bij  $\mu$ WKK het geval is) op te vangen. Dit betekent dat er buffers in het net zitten, zoals batterijen, en dat het een tweerichtingsnetwerk is waarbij afnemers van stroom ook in staat zijn om hun eigen geproduceerde elektriciteit terug te verkopen. In een smart grid is het de bedoeling dat een  $\mu$ WKK aanslaat op het moment dat de energieprijzen interessant zijn. Qua invoering staan smart grids voorlopig nog in de kinderschoenen, maar er wordt volop onderzoek naar gedaan door het VITO in Vlaanderen (VITO, 2009b; Six & Dexters, 2009b).

### **7.3 IMPACT OP HET GASNET**

Aangezien een  $\mu$ WKK-installatie uit één brandstof zowel warmte als elektriciteit opwekt, zal het brandstofverbruik stijgen. Indien de installatie voorzien is van een Stirlingmotor op basis van gas, wordt een stijging van ongeveer 10% geschat in het gasverbruik. Veldtesten in Vlaanderen om de concrete (negatieve) effecten van  $\mu$ WKK op het distributienet te schatten, ontbreken voorlopig nog. Men verwacht echter een geleidelijke marktintroductie waardoor negatieve effecten beperkt zullen blijven en nog verder onderzocht kunnen worden (Six & Dexters, 2009).

### **7.4 TECHNISCHE RANDVOORWAARDEN**

#### **7.4.1 Algemene regeling van de $\mu$ WKK-installatie**

Om ten volle te genieten van de voordelen van Cogeneratie dient de  $\mu$ WKK-installatie zo weinig mogelijk starts en stops te kennen zodat de verliezen die hiermee gepaard gaan, beperkt worden. De algemene sturing en regeling van een  $\mu$ WKK-eenheid, die in handen ligt van de eindgebruiker, is dus van cruciaal belang om de technologie te doen slagen. Hiervoor is de juiste expertise en een goed begrip van het systeem nodig. Om de eindgebruiker hiervan bewust te maken, dient de leverancier de nodige technische ondersteuning te verschaffen (Carbon Trust, 2007).

De meeste Stirlingmotoren worden met een bijbrander geleverd. Deze is noodzakelijk om op piekmomenten aan de warmtevraag te voldoen maar veelvuldig gebruik ervan vermindert de voordelen van warmtekrachtkoppeling. Bij een slechte regeling bestaat het risico dat de bijbrander continu ingeschakeld wordt en dat er amper elektriciteit geproduceerd wordt. Aangezien deze elektriciteitsproductie juist voor de economische en ecologische besparingen zorgt, is een correcte regeling van de bijbrander van wezenlijk belang (Six & Dexters, 2007).

#### **7.4.2 Technische betrouwbaarheid**

De technologische ontwikkelingen van  $\mu$ WKK in het algemeen bevinden zich nog steeds in de vroege ontwikkelingsfase. Van alle technologieën staat de Stirlingmotor het dichtste bij een marktdoorbraak (Knight, Ugursul, & Beausoleil-Morrison, 2005). Maar ook deze

technologie heeft nog te kampen met de zogenaamde kinderziektes hoewel de producenten stappen ondernemen om deze op te lossen. Zo werden bij de veldtesten van Carbon Trust (2007) in 25% van de gevallen motorfalen en andere problemen, zoals interne lekken in de motor, geblokkeerde filters en lager dan verwachte elektriciteitsproductie gerapporteerd in het eerste jaar van ingebruikstelling. Wanneer we dit vergelijken met gewone ketels, stellen we vast dat hier in het eerste jaar problemen in 1,5 à 3% van de nieuwe eenheden als aanvaardbaar worden beschouwd (Six & Dexters, 2007).

Bij een nieuwe technologie zijn technische problemen normaal ofschoon er gewaakt moet worden dat de reputatie van  $\mu$ WKK niet blijvend beschadigd wordt bij een te vroege commercialisering. Om consumentenvertrouwen op te bouwen, kunnen fabrikanten uitgebreidere garanties geven in het beginstadium van de lancering (Carbon Trust, 2007).

#### **7.4.3 Concurrerende technologieën**

Andere beschikbare technologieën voor warmte- en/of elektriciteitsproductie kunnen ook een bedreiging vormen voor de introductie van  $\mu$ WKK op basis van een Stirlingmotor. In principe kan elke technologie die voor een huishouden warmte produceert, energie bespaart en/of emissies reduceert, gezien worden als concurrentie. Voorbeelden hiervan zijn condenserende ketels en warmtepompen. Hoewel veel van deze technologieën beter de warmte- of elektriciteitsvraag van een huishouden volgen, biedt  $\mu$ WKK het voordeel dat gas gemakkelijker te stockeren is dan warmte of elektriciteit (Feenstra, 2008).

Nochtans heerst er een zekere onenigheid omtrent het al dan niet concurrerend vermogen van de warmtepomp (Six & Dexters, 2007; Feenstra, 2008). Sommige beschouwen beide technologieën als concurrenten gezien ze voor hetzelfde doel (huisverwarming) gebruikt worden. Anderen daarentegen beschouwen ze als complementair als gevolg van de verschillende markten waarin ze actief zijn. De warmtepomp wordt algemeen als een betere optie gezien voor huizen met een lage warmtevraag, bijvoorbeeld nieuwbouw met goede isolatie of een kleine bestaande woning die voldoende geïsoleerd is (Six & Dexters, 2009). De eerste paragraaf van dit hoofdstuk vermeldde reeds dat  $\mu$ WKK's op basis van een Stirlingmotor enkel rendabel zijn in woningen met een voldoende grote warmtevraag.



Nieuwe  $\mu$ WKK-technologieën op basis van brandstofcellen zullen een hogere kracht-warmteverhouding hebben en zouden in de toekomst wel de concurrentie kunnen aangaan met de warmtepomp. Een commerciële doorbraak van deze technologie in Europa wordt echter niet verwacht binnen de vijf jaar (Six & Dexters, 2009).

Bestaande woningen waar eerder al fotovoltaïsche panelen werden geïnstalleerd, kunnen wel een bedreiging vormen voor  $\mu$ WKK. Het gevaar bestaat hier om een netto-elektriciteitsproducent te worden waardoor er een lage terugleveringsvergoeding verkregen wordt voor de teruggeleverde stroom aan het net (Six & Dexters, 2009). In dit geval lijkt de implementatie van een  $\mu$ WKK-eenheid economisch gezien minder interessant.

Een toekomstige technologie die op termijn wel in het vaarwater van  $\mu$ WKK terecht zal komen, zijn de 'thermophotovoltaïcs' of TPV. In tegenstelling tot de klassieke zonnepanelen maken deze thermophotovoltaïcs geen gebruik van zonlicht om elektriciteit te produceren, maar van een warmtebron (Miles, Hynes, & Forbes, 2005). Dit kan bijvoorbeeld de brander van een CV-systeem zijn wat duidelijk maakt dat deze technologie wel degelijk een concurrent van  $\mu$ WKK kan worden.

## **Deel III: Praktijkstudie**

## **8 HAALBAARHEID $\mu$ WKK IN EEN VLAAMSE WONING**

---

### **8.1 AANPAK HAALBAARHEIDSSTUDIE**

In het derde deel van deze eindverhandeling wordt de economische en ecologische rendabiliteit van een  $\mu$ WKK-installatie in een Vlaamse woning onderzocht. Hierbij zal nagegaan worden of de implementatie van een  $\mu$ WKK-installatie tegenwoordig economisch en ecologisch gezien interessanter is dan het plaatsen van een traditionele verwarmingsketel.

De haalbaarheidsstudie verloopt in vier fasen. Een eerste stap bestaat uit de analyse van de warmte- en elektriciteitsvraag van de woning. Wanneer de totale energievraag gekend is, kan overgegaan worden tot de correcte technische dimensionering van de  $\mu$ WKK-installatie. In een derde fase wordt de rendabiliteit onderzocht. De economische rendabiliteit zal beoordeeld worden op basis van enkele economische maatstaven zoals de netto contante waarde (NCW), de verdisconteerde terugverdiensijd (DTVT) en de interne rendementsvoet (IR). Om een uitspraak te kunnen doen over de ecologische rendabiliteit zal de globale CO<sub>2</sub>-emissiebalans berekend worden. Tenslotte is een sensitiviteitsanalyse onontbeerlijk aangezien er zowel met volatiele gegevens als met voorlopige schattingen van gegevens wordt gewerkt. Hiervoor zal een Monte Carlo-simulatie gebruikt worden.

### **8.2 ANALYSE VAN DE ENERGIEVRAAG**

Het uitgangspunt van een haalbaarheidsstudie voor  $\mu$ WKK is een gedetailleerde analyse van de energievraag van een woning. Hierbij maken we onderscheid tussen de warmte- en de elektriciteitsvraag.

Deze eindverhandeling baseert zich op de energievraag van een gemiddelde woning in Vlaanderen. Hiervoor is het nodig dat we gebruik maken van schattingen aangezien we niet kunnen uitgaan van een exacte elektriciteits- of aardgasfactuur.

### **8.2.1 Warmtevraag van een woning**

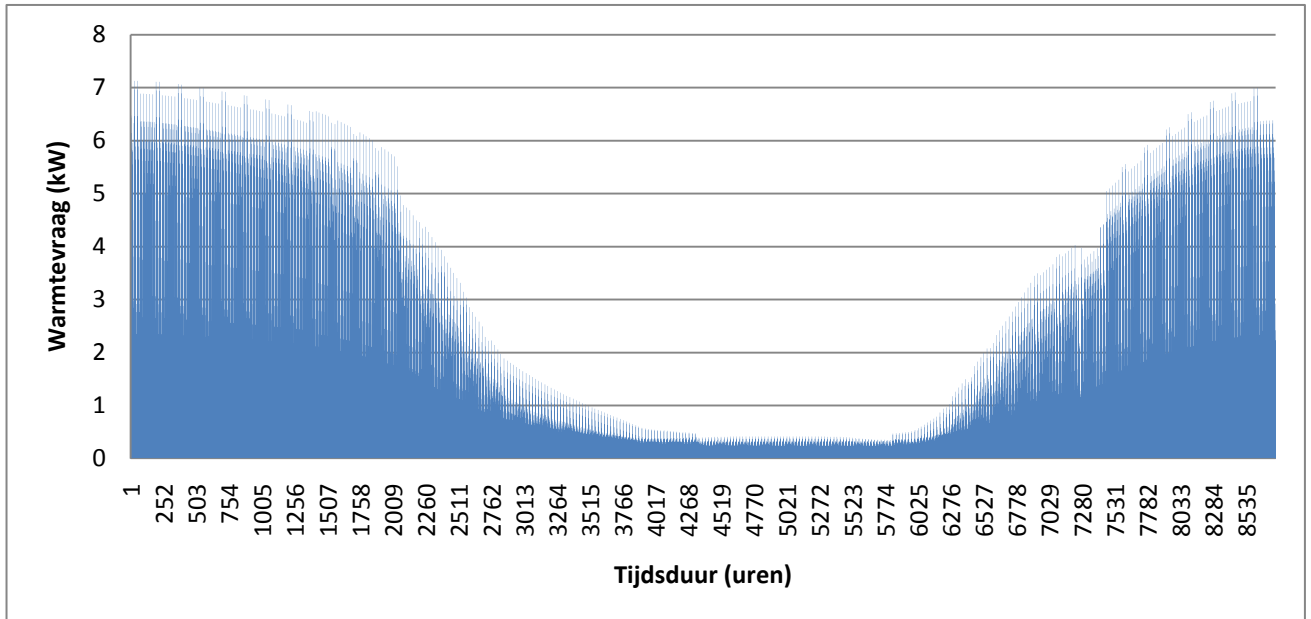
In deze eindverhandeling beschouwen we enkel huizen die gebruik maken van aardgas voor verwarming en sanitair warm water. De reden hiervoor is dat  $\mu$ WKK's op basis van een Stirlingmotor op aardgas draaien. Huizen die met stookolie verwarmen, zijn niet aangesloten op het aardgasnet, wat extra kosten met zich zou meebrengen bij de installatie van een  $\mu$ WKK. Dit valt buiten het bestek van deze eindverhandeling.

De VREG (2010a) schat het aardgasverbruik van een doorsnee gezin in Vlaanderen op 23,26 MWh/jaar. Om hieruit de warmtevraag te halen, is het belangrijk om op te merken dat aardgas gefactureerd wordt op de bovenwaarde terwijl het de onderwaarde is die men gebruikt. De bovenste verbrandingswaarde is enkel relevant indien de latente warmte van de waterdamp in rookgassen gerecupereerd wordt (bv. in een goed afgestelde condenserende ketel). In de meeste gevallen wordt deze latente warmte echter niet benut en gebruikt men enkel de onderste verbrandingswaarde van het aardgas, die gemiddeld 90% bedraagt van de bovenste verbrandingswaarde (Energik, 2004).

Indien we uitgaan van een ketelrendement van 90%, bedraagt de warmtevraag van een gemiddelde Vlaamse woning  $90\% \times 90\% \times 23\ 260\ \text{kWh} = 18,841\ \text{MWh/jaar}$ . Dit ligt binnen de vereiste range van de fabrikanten die een jaarlijkse warmtevraag van 16,2 – 27 MWh vooropstellen (Six & Dexters, 2009).

Deze globale warmtevraag bevat echter niet voldoende informatie voor de technische dimensionering in de volgende stap van deze haalbaarheidsstudie. Een meer gedetailleerde verdeling van deze warmtevraag doorheen het jaar is noodzakelijk. Hiervoor doen we beroep op synthetische lastprofielen. Deze cijferreeksen werden opgesteld door de VREG op basis van historische gegevens (VREG, 2010c). Ze geven aan welke fractie van de jaarlijkse warmtevraag er per uur gemiddeld gevraagd wordt. Een gedeelte van zo'n synthetisch lastprofiel vindt u als voorbeeld in bijlage 2.

Door de waarden van deze reeks te vermenigvuldigen met de jaarlijkse warmtevraag van 18,841 MWh, bekomt men een inschatting van de warmtevraag voor ieder uur van een volledig jaar. Het resultaat van deze berekeningen wordt weergegeven in figuur 8.1.



Figuur 8.1: Jaarlijks warmtevraagprofiel van een gemiddelde Vlaamse woning in 2010 (eigen berekeningen)

### 8.2.2 Elektriciteitsvraag van een woning

Ook voor de elektriciteitsvraag van een gemiddelde Vlaamse woning maken we gebruik van gegevens van de VREG. Er wordt aangenomen dat het elektriciteitsverbruik van een doorsnee Vlaams gezin 3,5 MWh/j bedraagt. G. Mergan, een medewerker van de VREG, merkt echter op dat dit verbruik de laatste jaren naar 4,5 MWh/j tendeert (persoonlijke communicatie, 2 maart 2010).

Hoewel een  $\mu$ WKK-installatie gedimensioneerd wordt op de warmtevraag, kan het toch nuttig zijn om een idee te hebben over de jaarlijkse elektriciteitsconsumptie. Dit kan van belang zijn wanneer de warmte – en elektriciteitsvraag niet overeenkomen of wanneer een grote warmtevraag gepaard gaat met een lage elektriciteitsvraag. In dit geval heeft de consument een elektriciteitsoverschot dat teruggeleverd kan worden aan het centrale elektriciteitsnet.

Volgens het Technisch Reglement voor de Distributie van Elektriciteit (VREG, 2004) heeft de eigenaar van een productie-installatie met een vermogen kleiner dan 10 kW, recht op een terugdraaiende teller. In de praktijk betekent dit dat de overtollig geproduceerde elektriciteit vergoed wordt aan het elektriciteitstarief. Wanneer men echter een

nettoproducent wordt over een factureringsperiode (bv. een jaar), wordt die elektriciteit op het net gezet. In principe kan deze stroom verkocht worden maar voor kleine hoeveelheden teruggeleverde elektriciteit zal de administratieve kost in praktijk hoger liggen dan de opbrengst. Dit is zeker het geval voor eengezinswoningen. Six & Dexters (2009) stellen echter dat het risico op nettoproductie vrijwel uit te sluiten valt bij een gemiddeld jaarlijks elektriciteitsverbruik van 3,5 MWh, in geval van een enkelvoudige teller. Bij een dag-nacht teller zou de kans wel kunnen bestaan dat een klein deel van de elektriciteit terug op het net wordt geplaatst, wanneer de  $\mu$ WKK hoofdzakelijk overdag stroom levert en de eindgebruiker zijn verbruik afstemt op het lagere nachttarief.

Belangrijk voor deze studie is het feit dat er vanuit gegaan wordt dat er geen stroom op het net wordt geplaatst en dus niet aan een lage terugleververgoeding wordt verkocht.

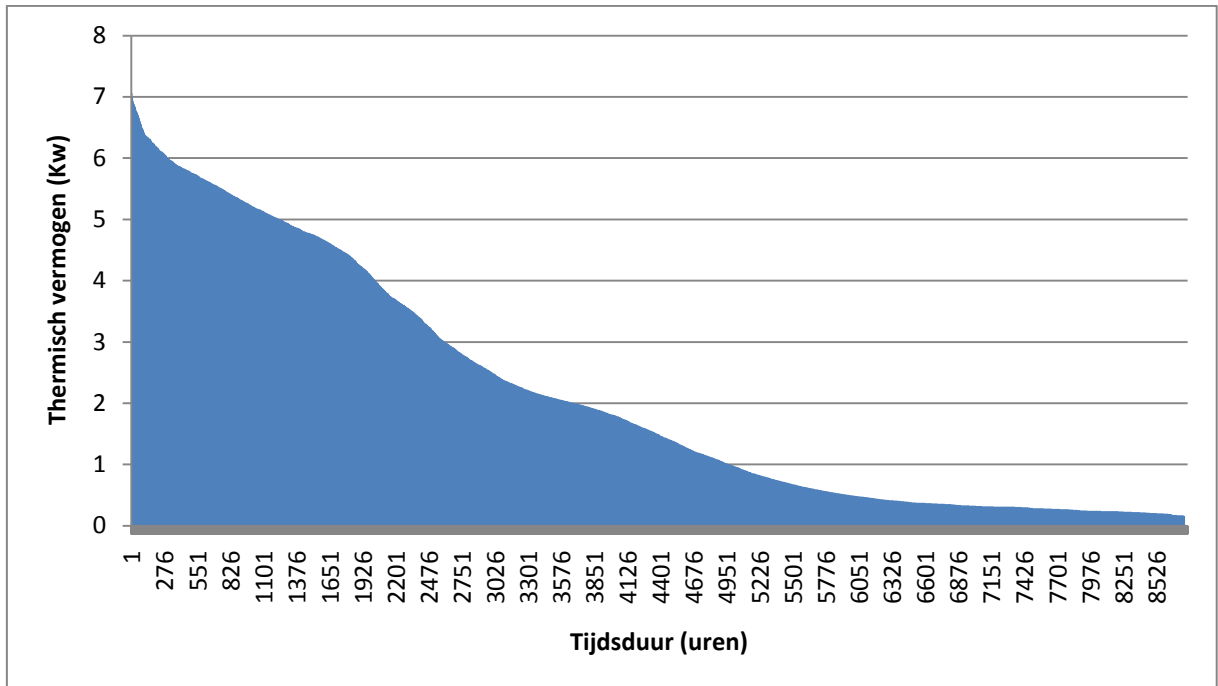
### **8.3 TECHNISCHE DIMENSIONERING VAN DE $\mu$ WKK – INSTALLATIE**

De volgende stap in deze haalbaarheidsstudie bestaat erin om op basis van de jaarlijkse warmtevraag een  $\mu$ WKK-installatie met een gepast thermisch vermogen te kiezen.

#### **8.3.1 Opstellen van de jaarbelastingsduurcurve**

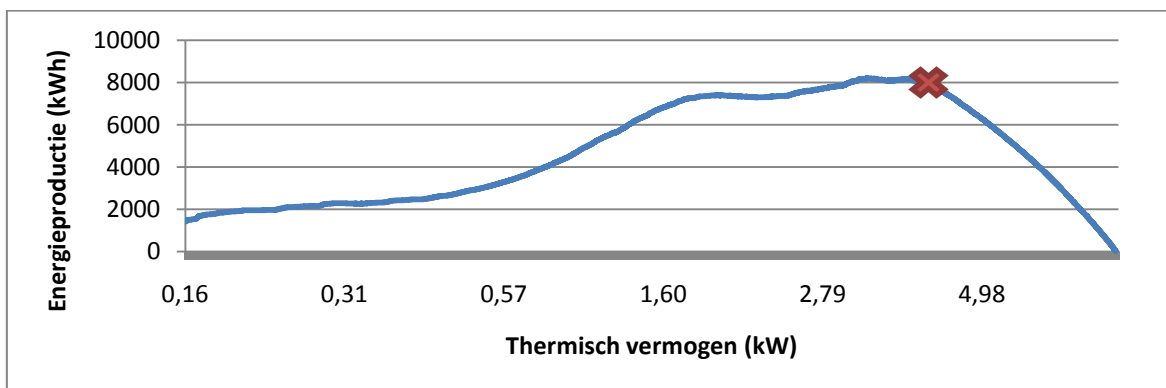
Om een  $\mu$ WKK-installatie te dimensioneren, wordt doorgaans een jaarbelastingsduurcurve opgesteld. In deze curve worden de 8760 uurlijkse waarden van de energievraag gerangschikt volgens grootte (en dus niet chronologisch zoals bij het warmtevraagprofiel) (Cogen Vlaanderen, 2006). Op die manier vertoont de curve het aantal uren dat een bepaald vermogen vereist is.

Deze curve kan zowel voor de warmte – als elektriciteitsvraag opgesteld worden. Aangezien een  $\mu$ WKK steeds gedimensioneerd wordt op de warmtevraag volstaat het in deze studie om enkel de jaarbelastingsduurcurve (JBDC) van de warmtevraag op te stellen. Deze wordt afgebeeld in figuur 8.2.



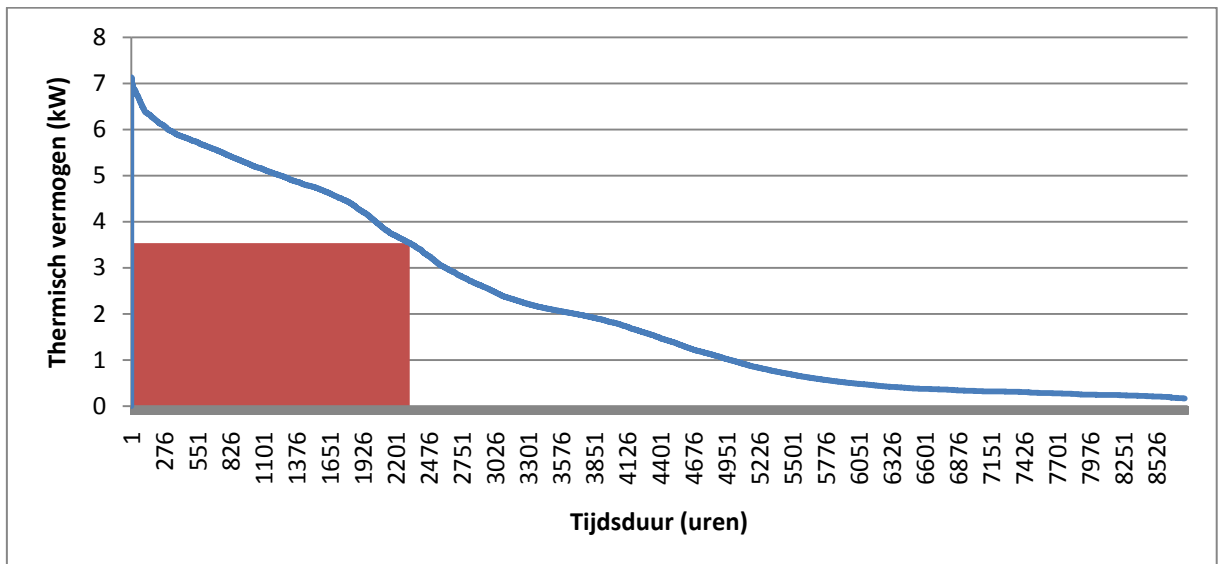
Figuur 8.2: Jaarbelastingsduurcurve op basis van de warmtevraag (eigen berekeningen)

Uitgaande van deze JBCD kan men het te installeren thermisch vermogen en het aantal draaiuren van de installatie bepalen. Hierbij gaat men op zoek welke installatie het meeste warmte (uitgedrukt in kWh) produceert. Dit komt overeen met de grootste mogelijke rechthoek onder de JBDC. Om te bepalen wat precies de grootste rechthoek onder de curve zal zijn, kan de productiecurve opgesteld worden. Deze curve zet voor ieder punt van de Y-as van de JBDC de oppervlakte onder de curve uit. Zo bekomt men de geproduceerde hoeveelheid energie in functie van het vermogen van de  $\mu$ WKK - installatie (zie figuur 8.3).



Figuur 8.3: Productiecurve op basis van de warmtevraag (eigen berekeningen)

Het maximum van deze curve werd berekend met Excel en komt overeen met een thermisch vermogen van 3,54 kW. Dit stelt ons nu in staat om de grootst mogelijke rechthoek in de JBDC te tekenen (zie figuur 8.4). Bijlage 3 geeft een overzicht van de voorgaande grafieken om de totstandkoming van figuur 8.4 beter te visualiseren.



Figuur 8.4: Jaarbelastingsduurcurve met grootst mogelijke rechthoek (eigen berekeningen)

Naast het vereiste thermisch vermogen, geeft deze rechthoek tevens het totaal aantal vollasturen weer, namelijk 2317 uren per jaar. We gaan er in deze studie van uit dat de  $\mu$ WKK enkel op vollast draait (dit wil zeggen, steeds het volledige thermisch vermogen benut). Bij deellastwerking daalt het elektrisch rendement immers aanzienlijk wat de rendabiliteit van de  $\mu$ WKK niet ten goede komt (Six & Dexters, 2009).

Het gedeelte van de oppervlakte onder de JBDC dat niet opgevuld wordt door de rechthoek, stelt de warmtevraag voor waar de  $\mu$ WKK niet aan kan voldoen. Deze zal bijkomend geleverd moeten worden door de hulpbrander.

Hieruit kunnen we concluderen dat een gemiddelde Vlaamse woning met een warmtevraag van 18,841 MWh/j een  $\mu$ WKK-eenheid met een thermisch vermogen van 3,54 kW (in combinatie met een hulpbrander) nodig zou hebben. Het elektrisch vermogen van een  $\mu$ WKK voor huishoudtoepassingen bedraagt ongeveer 1 kWe. Volgens producenten zou een  $\mu$ WKK van 1 kWe de hoeveelheid overtollig geproduceerde



elektriciteit minimaliseren (Carbon Trust, 2007). Op basis van deze gegevens kan op zoek gegaan worden naar een geschikte  $\mu$ WKK-installatie.

#### **8.4 MARKTONDERZOEK $\mu$ WKK'S**

Zoals eerder gesteld, is van alle technologieën de Stirlingmotor de meest waarschijnlijke om op relatief korte termijn commercieel door te breken. De meeste grote ketelfabrikanten zijn momenteel bezig aan de ontwikkeling van  $\mu$ WKK's gebaseerd op de Stirlingmotor en beschikken reeds over prototypes of commerciële eenheden. Hier volgt een overzicht van producenten die een huishoudelijke  $\mu$ WKK-eenheid (met Stirlingmotor) op de markt hebben of in de nabije toekomst een marktintroductie plannen.

##### **8.4.1 WhisperGen**

WhisperGen was de eerste fabrikant die eind 2008 een  $\mu$ WKK-installatie op basis van een Stirlingmotor, gericht op eengezinswoningen, commercieel op de markt bracht. De WhisperGen beschikt over een elektrisch vermogen van 1 kWe en een thermisch vermogen van 7 kWth, aangevuld met een bijbrander van 6 kWth. De producent raadt hierbij een buffervat van 200 à 300 liter aan. De adviesprijs exclusief BTW voor deze installatie bedraagt 9950 EUR (WhisperGen, 2007; The Magic Boiler Company, 2010, Six & Dexters, 2009).

##### **8.4.2 Remeha**

Remeha maakt deel uit van de Microgen Engine Corporation (MEC). Dit is een consortium van enkele investeerders en Europese ketelfabrikanten (Viessmann, Baxi, Vaillant, Sunpower en Remeha) die zich verbinden in het onderzoek naar en de ontwikkeling van Stirlinggebaseerde  $\mu$ WKK's (Six & Dexters, 2009). Zo ontwikkelde Remeha de HRe ketel<sup>14</sup> die naar verwachting in juni 2010 op de markt zal komen (M. Jacobs, persoonlijke communicatie, 9 maart 2010). Deze  $\mu$ WKK heeft een elektrisch vermogen van 1 kWe en een thermisch vermogen van 5 kWth dat met een boost burner opgetrokken kan worden tot 28 kWth (Bijkerk, 2009). De prijs voor een particulier zal uitkomen op 10 250 EUR (exclusief BTW) (C. Trapman, persoonlijke communicatie, 17 maart 2010).

---

<sup>14</sup> Een HRe-ketel of hoog rendement elektriciteit ketel is een andere benaming voor een  $\mu$ WKK-installatie (D. Pollet, persoonlijke communicatie, 15 maart 2010).

### **8.4.3 Vaillant**

Ook Vaillant verricht momenteel veldtesten maar voorziet pas een breedschalige introductie in 2012 van haar micro-WKK met Stirlingmotor. Deze zal beschikken over vermogens van 1 kWe en 25 kWth (Vaillant, 2010a).

### **8.4.4 Baxi**

Baxi ontwikkelde de Ecogen 24 HRe-ketel met vermogens van 1 kWe en 4 kWth (met boostburner tot 24 kWth). Deze  $\mu$ WKK heeft geen behoefte aan een buffervat. De veldtesten begonnen in 2009 en lopen nog door tot eind 2010. Vanaf 2011 wordt het toestel beschikbaar voor het grote publiek (Baxi, 2009). De verkoopprijs (exclusief BTW) zal ongeveer 6000 EUR bedragen (D. Pollet, persoonlijke communicatie, 15 maart 2010).

### **8.4.5 Overige producenten**

Ook andere toonaangevende producenten zoals Viessmann, Buderus en Bosch werken aan de ontwikkeling en introductie van een  $\mu$ WKK (Six & Dexters, 2009). Hieromtrent werd echter nog geen informatie vrijgegeven voor de afronding van deze eindverhandeling.

### **8.4.6 Keuze $\mu$ WKK**

De JBCD gaf aan dat in een gemiddelde Vlaamse woning een  $\mu$ WKK met een thermisch vermogen van 3,54 kW geïnstalleerd zou moeten worden. De  $\mu$ WKK-installatie van Baxi met een thermisch vermogen van 4 kW benadert deze vereiste het beste. Dit is ook de enige producent die momenteel al rendementen vrijgeeft. Deze eindverhandeling zal zich dan ook op deze  $\mu$ WKK baseren, zowel wat betreft de technische als de financiële aspecten.

## **8.5 ECONOMISCH MODEL**

Om een uitspraak te doen over de economische rendabiliteit van een  $\mu$ WKK stellen we een economisch rekenmodel op dat als basis dient voor de economische analyse. In de

sensitiviteitsanalyse zullen we bepaalde parameters van dit model binnen een bepaalde range laten variëren om hun invloed op de economische rendabiliteit te bepalen.

Het doel van deze studie is om na te gaan of de meerkost van een  $\mu$ WKK ten opzichte van een hoogrendementsketel, zich (door de elektriciteitsproductie) terugverdient gedurende de levensduur van de installatie. Deze wordt door producenten op 15 jaar geschat. Producenten streven naar een terugverdientijd van 5 à 7 jaar (Remeha, 2010a; Vaillant, 2010a; Smart Power Foundation, 2008).

### **8.5.1 Investeringskost**

Onder de investeringskost verstaan we zowel de kostprijs van de  $\mu$ WKK of de referentieketel zelf, de installatiekosten als het BTW-bedrag.

#### **8.5.1.1 Kostprijs $\mu$ WKK**

Voor producenten is het nu niet mogelijk om al een definitieve verkoopprijs te geven. D. Pollet, technisch product manager bij Baxi, stelt dat deze prijs sterk zal afhangen van het aantal verkochte eenheden en de aanwezigheid van concurrentie op de markt (persoonlijke communicatie, 15 maart 2010).

Bij Baxi wordt de kostprijs op ongeveer 6000 EUR geschat (D. Pollet, persoonlijke communicatie, 15 maart 2010). Dit ligt een heel stuk lager dan de geraamde kostprijs van de  $\mu$ WKK van Remeha, namelijk 10 250 EUR (C. Trapman, persoonlijke communicatie, 17 maart 2010). Deze parameter zal daarom ook opgenomen worden in de sensitiviteitsanalyse. In het basisscenario zal uitgegaan worden van 6000 EUR als kostprijs.

#### **8.5.1.2 Kostprijs referentieketel**

Om een idee te krijgen over de kostprijs van een referentieverwarmingsketel werd contact opgenomen met J. Jageneau, importeur van verwarmingsketels. Wanneer we uitgaan van de vervanging van een oude verwarmingsketel in een bestaande woning

wordt aangeraden om een HR-ketel<sup>15</sup> als referentiepunt te nemen. Deze kan het huis met de huidige radiatoren op de gewenste temperatuur krijgen. Indien we een condenserende gasketel beschouwen, zouden er extra radiatoren, vloerverwarming of ventilatoren voorzien moeten worden. Dit heeft te maken met de lagere temperaturen waarop deze ketel werkzaam is. Hierdoor is een groter oppervlak voor warmteafgifte vereist (J. Jageneau, persoonlijke communicatie, 19 april 2010).

Als gemiddelde prijs voor een HR-ketel met tapwaterfunctie en weersafhankelijke temperatuurregeling kunnen we uitgaan van 2000 EUR (Viessmann, 2010; Vaillant, 2010b; Remeha, 2010b; J. Jageneau, persoonlijke communicatie, 19 april 2010).

Een additionele voorziening die gepaard gaat met de installatie van een HR-ketel is de condensafvoer (schouw) vanwege de condensvorming. Deze moet zo gedimensioneerd zijn dat de condens geen warmte verliest van het begin tot het einde van de schouw, om condensatie te vermijden. Ook de beschouwde  $\mu$ WKK heeft een condensafvoer nodig en vereist dus tevens deze extra investering (Baxi, 2009; J. Jageneau, persoonlijke communicatie, 25 april 2010).

Hiervoor moeten we rekenen op een extra investeringskost van 1500 EUR (J. Jageneau, persoonlijke communicatie, 19 april 2010).

### **8.5.1.3 Installatiekosten**

De installatieprijs van een  $\mu$ WKK zou dezelfde moeten zijn als van een HR-ketel, aangezien er geen extra werk is voor de installateur. Hiervoor wordt gerekend op twee volle werkdagen, wat neerkomt op 500 EUR per dag (J. Jageneau, persoonlijke communicatie, 19 april 2010). De totale installatiekosten bedragen dus 1000 EUR.

### **8.5.1.4 BTW-tarief**

Aangezien de targetmarkt in eerste instantie de renovatiemarkt is, kan de consument van een  $\mu$ WKK-installatie genieten van een BTW-tarief van 6%. Dit verlaagd BTW-tarief

---

<sup>15</sup> Een HR-ketel of hoog rendementsketel is een verwarmingsketel op aardgas die door de condensatie van de waterdamp in de rookgassen een hoger rendement realiseert ten opzichte van een conventionele gasketel. Het verschil met een condenserende gasketel situeert zich in de vertrek- en retourtemperatuur van de warmte en de temperatuur van de rookgassen. Deze liggen lager bij een condenserende ketel (J. Jageneau, persoonlijke communicatie, 19 april 2010).

is geldig tot 31 december 2010 voor privéwoningen die tenminste vijf jaar oud zijn en waar verbouwwerken in worden uitgevoerd (Federale Overheidsdienst Financiën, 2010). Zowel een  $\mu$ WKK als een HR-ketel vallen onder dit verlaagd BTW-tarief.

### 8.5.1.5 Totale investeringskost

Tabel 8.1 geeft een overzicht van de totale investeringskosten van de  $\mu$ WKK en de HR-ketel.

<b>Investeringskosten (EUR)</b>	<b><math>\mu</math>WKK</b>	<b>HR-ketel</b>
<i>Kostprijs ketel</i>	6000	2000
<i>Condensafvoer</i>	1500	1500
<i>Installatiekosten</i>	1000	1000
<i>BTW-bedrag (6%)</i>	510	270
<b>TOTAAL</b>	<b>9010</b>	<b>4770</b>
<i>Meerkost <math>\mu</math>WKK</i>	4240	

Tabel 8.1: Overzicht investeringskosten  $\mu$ WKK en HR-ketel (in EUR)

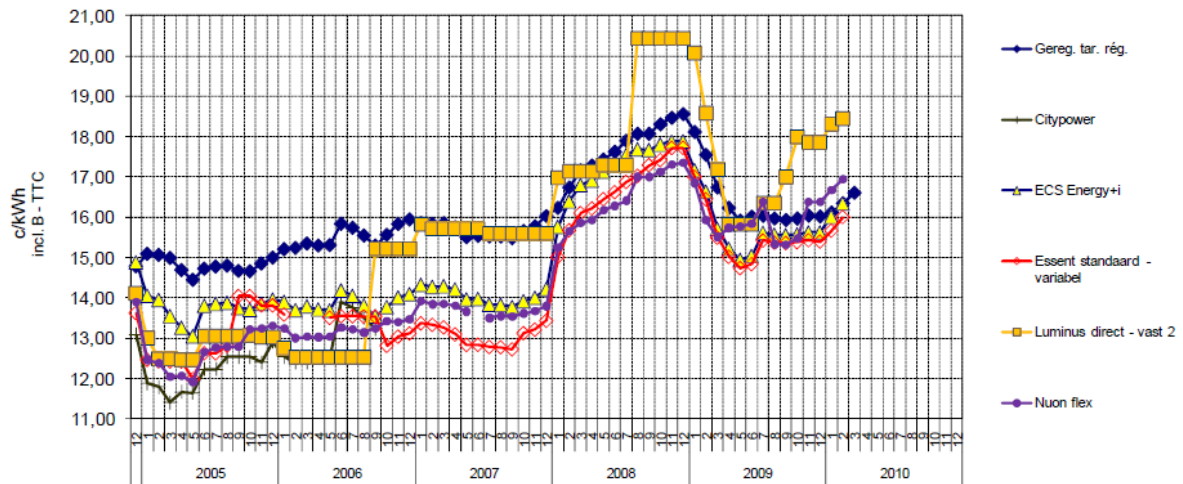
Hieruit blijkt dat de totale meerkost van de  $\mu$ WKK ten opzichte van de HR-ketel 4240 EUR bedraagt. Met behulp van de andere parameters in het economisch model zullen we onderzoeken of deze hoge meerprijs zich kan terugverdienen op 15 jaar. Dit bedrag vormt dus het startpunt bij de berekening van de netto contante waarde.

### 8.5.2 Werkings- en onderhoudskosten

Fabrikanten van  $\mu$ WKK's beogen dezelfde werkings- en onderhoudskosten als voor een standaard HR-ketel (Remeha, 2010a; Vaillant, 2010a; D. Pollet, persoonlijke communicatie, 15 maart 2010). Een Stirlingmotor heeft weinig bewegende delen en vergt dus geen extra onderhoud. Producenten raden een jaarlijkse routine-onderhoudsbeurt aan. Deze omvat een controle of de installatie nog correct functioneert en tevens een veiligheidscontrole. De prijs ervan zal identiek zijn aan die van een HR-ketel (D. Pollet, persoonlijke communicatie, 15 maart 2010; WhisperGen, 2007). Gezien een dergelijke onderhoudsbeurt geen meerkost met zich meebrengt voor de  $\mu$ WKK ten opzichte van de HR-ketel, zal dit geen aanleiding geven tot een extra kost in het economisch model.

### 8.5.3 Elektriciteitsprijs

Dat de elektriciteitsprijs in Vlaanderen een volatiel gegeven is, blijkt uit figuur 8.5. Hierin wordt de evolutie van de elektriciteitsprijs weergegeven voor een jaarlijks verbruik van 3,5 MWh en dit voor de belangrijkste Vlaamse elektriciteitsleveranciers.



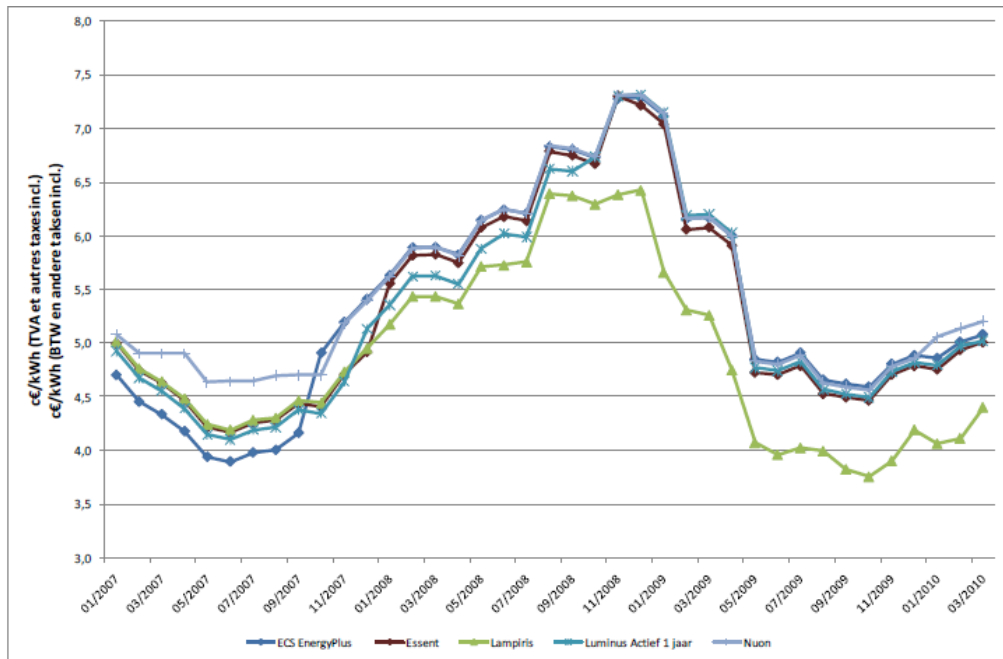
Figuur 8.5: Evolutie van de elektriciteitsprijs in Vlaanderen voor een verbruik van 3,5 MWh/j (Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas [CREG], 2010a)

Deze volatiliteit zal een invloed hebben op de economische maatstaven die berekend zullen worden. Er wordt verwacht dat een hogere elektriciteitsprijs een grotere besparing impliceert op de elektriciteitsfactuur en dus een gunstig effect heeft op de NCW en de terugverdientijd.

Op 1 januari 2010 bedroeg de gewogen gemiddelde elektriciteitsprijs (bij een verbruik van 3,5 MWh/j) in Vlaanderen 16,51 EUR/MWh. In dezelfde periode in 2006, 2007 en 2008 lag de gemiddelde prijs tevens rond dit niveau. Enkel begin 2009 piekte de elektriciteitsprijs tot 20,45 EUR/MWh als gevolg van de energiecrisis. Volgens G. Mergan (persoonlijke communicatie, 2 maart 2010) kan de elektriciteitsprijs van 1 januari 2010 als algemeen gemiddelde dienen in deze haalbaarheidsstudie.

### 8.5.4 Aardgasprijs

Aangezien de elektriciteits- en de gasprijs in dezelfde richting fluctueren, is de gasprijs ook geen stabiel gegeven in Vlaanderen. Figuur 8.6 geeft de prijsevolutie weer van de enkele grote aardgasleveranciers in Vlaanderen voor een verbruik van 23,26 MWh per jaar. Hierin is ook duidelijk het gevolg van de energiecrisis eind 2008, begin 2009 te zien.



Figuur 8.6: Evolutie van de aardgasprijs in Vlaanderen voor een verbruik van 23,26 MWh/j (CREG, 2010b)

In tegenstelling tot de elektriciteitsprijs verwachten we dat een hoge aardgasprijs een negatieve invloed zal hebben op de rendabiliteit van een  $\mu$ WKK – installatie. Vergeleken met een HR-ketel wordt er immers meer gas verbruikt.

Voor de aardgasprijs van het basisscenario van deze rendabiliteitsstudie wordt tevens gebruik gemaakt van het gewogen gemiddelde prijsniveau op 1 januari 2010, namelijk 5,05 EUR/MWh (G. Mergan, persoonlijke communicatie, 2 maart 2010).

### 8.5.5 Technische karakteristieken van de gekozen $\mu$ WKK–installatie

Hoofdstuk 6 gaf reeds aan dat er een grote diversiteit bestaat aan  $\mu$ WKK-technologieën met elk hun eigen technische karakteristieken. Maar ook binnen de Stirlingtechnologie variëren deze kenmerken voor de  $\mu$ WKK's van verschillende fabrikanten. Tabel 8.2 geeft een overzicht van de technische karakteristieken van de gekozen  $\mu$ WKK.

<b>Technische karakteristieken</b>	
Elektrisch vermogen	1 kWe
Thermisch vermogen Stirling	4 kWth
Thermisch vermogen hulpbrander	20 kWth
Totaal thermisch vermogen	24 kWth
Elektrisch rendement	16%
Thermisch rendement	95%
Totaal rendement	111%
Kracht-warmteverhouding	16,8%

Tabel 8.2: Technische karakteristieken van de gekozen  $\mu$ WKK

Het elektrisch vermogen van de Baxi Ecogen bedraagt net als de meeste huishoudelijke  $\mu$ WKK's 1 kW en behaalt een thermisch vermogen van 4 kW. Samen met de hulpbrander kan er in totaal 24 kWth gegenereerd worden (Baxi, 2009).

Het elektrisch rendement wordt voorlopig op 16-17% geschat (D. Pollet, persoonlijke communicatie, 15 maart 2010). In realiteit zullen het inschakelen van de bijbrander, de start/stop verliezen en het eigen verbruik in werking het jaarlijks elektrisch rendement naar beneden beïnvloeden (Six & Dexters, 2009). Deze bevindingen werden bevestigd door veldtesten in Groot-Brittannië waar lagere elektrische rendementen werden waargenomen dan in de technische specificaties vermeld stond (Carbon Trust, 2007).

Six en Dexters (2009) voerden tevens een simulatie uit met de Whispergen en bekwamen een globaal jaarlijks elektrisch rendement van slechts 8%. Hoewel de installaties onderling zullen verschillen, lijkt een elektrisch rendement van 16% misschien net iets te hoog gegrepen. Andere producenten zijn opvallend terughoudend om deze rendementen vrij te geven waardoor we geen ander vergelijkingspunt hebben. Het



elektrisch rendement wordt dus zeker een factor die in de sensitiviteitsanalyse opgenomen zal worden.

Het globaal thermisch rendement van deze  $\mu$ WKK (met zowel de Stirlingmotor als de gascondensatie-eenheid) bedraagt 95% (D. Pollet, persoonlijke communicatie, 15 maart, 2010). Ook dit rendement lijkt hoog te zijn wanneer we dit vergelijken met de Whispergen uit de studie van Six en Dexters (2009) die een thermisch rendement van slecht 82% behaalt.

Hoewel deze rendementen aan de hoge kant liggen, zal het basis economisch model hier toch vanuit gaan. De sensitiviteitsanalyse zal gebruikt worden om na te gaan of de waarde van deze parameters een grote invloed heeft op de economische rendabiliteit van de installatie.

Om de kracht-warmteverhouding (PHR) van deze  $\mu$ WKK te bepalen, wordt de formule uit paragraaf 2.6.7 gebruikt:

$$PHR = \frac{P_e}{P_q} = \frac{16\%}{95\%} = 16,8\%$$

waarbij  $P_e$  = netto-elektrisch vermogen geleverd door het systeem (in Watt)  
 $P_q$  = nuttig thermisch vermogen geleverd door het systeem (in Watt)

Deze kracht-warmteverhouding ligt (door de hoge rendementen) redelijk hoog en impliceert dus een grote emissiebesparing.

### **8.5.6 Jaarlijkse meer-/minderkost gas en elektriciteit**

Op basis van de jaarlijkse warmte- en elektriciteitsproductie, de technische karakteristieken van de  $\mu$ WKK en de gas- en elektriciteitsprijs kan de jaarlijkse besparing/meerkost op gas en elektriciteit berekend worden. Tabel 8.3 laat de nodige berekeningen zien.

<b>Outputparameter</b>	<b>Waarde</b>
Jaarlijkse warmteproductie	18,84 MWh
Jaarlijkse elektriciteitsproductie	2,317 MWh
Jaarlijks gasverbruik (zonder correctie onderste verbrandingswaarde)	19,832 MWh
Jaarlijks gasverbruik (met correctie onderste verbrandingswaarde)(=factuur)	22,036 MWh
Jaarlijks referentiegasverbruik ketel (zonder correctie onderste verbrandingswaarde)	20,934 MWh
Jaarlijks referentiegasverbruik ketel (zonder correctie onderste verbrandingswaarde) (=factuur)	23,260 MWh
Jaarlijkse kostprijs gasverbruik	1113 EUR
Jaarlijkse kostprijs referentiegasverbruik	1175 EUR
<b>Jaarlijkse besparing gasverbruik</b>	<b>62 EUR</b>
<b>Jaarlijkse besparing elektriciteit</b>	<b>383 EUR</b>

Tabel 8.3: berekening gas- en elektriciteitsbesparing

Vertrekkende van een jaarlijkse warmtevraag van 23,260 MWh werd bij het opstellen van de JBDC reeds gekomen tot een warmteproductie van 18,841 MWh/jaar. De JBDC toonde tevens dat een  $\mu$ WKK 2317 vollasturen werkzaam zou zijn in een gemiddelde Vlaamse woning. Aangezien we ervan uitgaan dat de  $\mu$ WKK niet in deellast werkt, zal enkel tijdens deze vollasturen elektriciteit geproduceerd worden. Met een vermogen van 1kWe zal jaarlijks 2,317 MWh elektriciteit opgewekt worden.

Door de jaarlijkse warmteproductie te delen door het thermisch rendement van de  $\mu$ WKK (95%) wordt een jaarlijkse gasverbruik van 19 832 kWh bekomen. Dit moet echter gecorrigeerd worden voor de onderste verbrandingswaarde om tot de factuurwaarde van 22,036 MWh/jaar te komen.

Uit de gegevens van de VREG (2010a) weten we dat het jaarlijkse referentiegasverbruik 23,26 MWh per jaar bedraagt. Dit is ook het verbruik dat we op de factuur terugvinden.

Wanneer we beide factuurwaarden vermenigvuldigen met de gasprijs, wordt de jaarlijkse kostprijs van het aardgasverbruik gevonden. Ondanks de verwachtingen uit de literatuurstudie, is hier sprake van minder gasverbruik bij het gebruik van een  $\mu$ WKK. Dit is te wijten aan het hogere thermisch rendement van de  $\mu$ WKK dan van de HR-ketel. Er wordt jaarlijks 62 EUR bespaard op de aardgasfactuur.

Tenslotte wordt de besparing op elektriciteit berekend door de jaarlijkse elektriciteitsproductie te vermenigvuldigen met de elektriciteitsprijs. Dit komt neer op een jaarlijkse besparing van 383 EUR.

### 8.5.7 Subsidie maatregelen

#### 8.5.7.1 Investeringssubsidie

Bij de vervanging van een bestaande oude verwarmingsketel komt 40% van het investeringsbedrag (met een maximum van 2770 EUR per jaar) in aanmerking voor belastingvermindering. Wanneer de totale investeringskost dit bedrag overschrijdt, mag het resterende bedrag overgedragen worden naar de drie volgende belastbare jaren (VEA, 2009a).

In Tabel 8.4 wordt de totale belastingvermindering berekend indien de oude ketel vervangen wordt door een  $\mu$ WKK. Dit vergelijken we met de belastingvermindering die men zou krijgen bij de installatie van een nieuwe HR-ketel. De investeringskost werd overgenomen uit paragraaf 8.4.1.

	$\mu$ WKK	HR-ketel	Vershil subsidie
Investeringsbedrag	9010	4770	
Totaal subsidiebedrag	3604	1908	
<b>Jaar 1</b> Subsidiebedrag	2770	1908	862
Overdraagbaar bedrag	834	0	
<b>Jaar 2</b> Subsidiebedrag	834	0	834
Overdraagbaar bedrag	0	0	

Tabel 8.4: Investeringssubsidie bij  $\mu$ WKK (in EUR)

Het totale subsidiebedrag kan dus over twee jaar teruggevorderd worden. Door de hogere investeringskost geniet de  $\mu$ WKK van een hogere fiscale aftrek dan de HR-ketel.

### **8.5.7.2 Groene lening**

Indien men een lening aangaat voor de aankoop van een  $\mu$ WKK-installatie, kent de overheid sinds 31 juli 2009 een interestverlaging van 1,5% toe. Dit geldt zowel voor een hypothecaire lening als een lening op afbetaling. Voor een investering van ongeveer 7000 EUR raadt BNP Parisbas Fortis medewerker B. Verwichte een lening op afbetaling aan over een looptijd van 3 jaar (persoonlijke communicatie, 16 maart 2010).

Voorheen deze subsidieregeling bedroeg de rentevoet voor energiebesparende maatregelen ongeveer 7% (B. Verwichte, persoonlijke communicatie, 16 maart 2010). Naast de overheidstussenkomst van 1,5% kennen de meeste banken een extra 1,5% interestverlaging toe, waardoor de reële interestvoet voor een groene lening ongeveer 4% bedraagt. Tabel 8.5 geeft een overzicht van deze interestvoeten bij enkele grote banken.

<b>Bank</b>	<b>Interestpercentage groene lening</b>
ING	3,9%
BNP Parisbas Fortis	4%
Axa	4,2%
Dexia	4,3%

Tabel 8.5: Interestpercentage groene lening bij enkele grote banken (ING, 2010; Fortis, 2010; AXA, 2010; Dexia, 2010)

Bovendien wordt bovenvermelde belastingsvermindering van 40% eveneens toegekend op de werkelijk betaalde interesten (VEA, 2009b).

Op basis van deze gegevens kan een aflossingsschema (tabel 8.6) opgesteld worden voor een groene lening met een looptijd van 3 jaar en een interestpercentage van 4%.

Aangezien zowel een  $\mu$ WKK als een HR-ketel in aanmerking komen voor een groene lening (ze vervangen immers beide een oude verwarmingsketel) beschouwen we ook hier

enkel de meerkost van de  $\mu$ WKK ten opzichte van de HR-ketel. We gaan er vanuit dat het ontleende bedrag gelijk is aan deze meerkost, namelijk 4240 EUR.

Jaar	Schuldsaldo begin jaar	Rente	Aflossing	Schuldsaldo einde jaar
1	4240,00	169,60	1358,28	2881,72
2	2881,72	115,27	1412,61	1469,11
3	1469,11	58,76	1469,11	0,00

Tabel 8.6: Aflossingsschema groene lening (in EUR)

Hieruit kunnen we het extra belastingvoordeel, 40% van de betaalde interesten, berekenen (tabel 8.7). Deze baten zullen opgenomen worden in de berekening van de economische rendabiliteitsmaatstaven.

Rente	40%
169,60	67,84
115,27	46,11
58,76	23,51

Tabel 8.7: Extra belastingvermindering op de betaalde interesten (in EUR)

### 8.5.8 Warmtekrachtcertificaten

Met behulp van de formules uit hoofdstuk 5 kan het aantal warmtekrachtcertificaten berekend worden waarop de eigenaar van een  $\mu$ WKK recht heeft. Deze worden toegekend op basis van de primaire energiebesparing die een kwalitatieve WKK realiseert. Om in aanmerking te komen voor kwalitatieve WKK is het voor een  $\mu$ WKK met een elektrisch vermogen van 1 kWe voldoende om een primaire energiebesparing van 0% te realiseren (VREG, 2009a).

Gelet op de referentierendementen die door de Vlaamse Overheid (2006) werden vastgelegd, gebruiken we onderstaande gegevens om de primaire energiebesparing te berekenen:

- $\eta_Q$  = het thermisch rendement van de referentieketel = 90%
- $\eta_E$  = het elektrisch rendement van de referentiecentrale = 50%
- $\alpha_Q$  = het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie = 95%

- $\alpha_E$  = het elektrisch rendement van de warmtekrachtinstallatie = 16%

Hieruit volgt dat de relatieve primaire energiebesparing (RPE) gelijk is aan:

$$RPE = \left( 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} + \frac{\alpha_E}{\eta_E}} \right) * 100\% = \left( 1 - \frac{1}{\frac{95\%}{90\%} + \frac{16\%}{50\%}} \right) * 100\% = 27,30\%$$

De  $\mu$ WKK van Baxi voldoet dus aan de voorwaarde van een kwalitatieve WKK en komt bijgevolg in aanmerking voor WKC's.

Om het aantal WKC's te berekenen waarop de eigenaar van de  $\mu$ WKK recht heeft, dient de absolute primaire energiebesparing (PEB) gekend te zijn. Deze wordt als volgt berekend:

$$PEB = E * \left( \frac{1}{\eta_E} + \frac{\alpha_Q}{\alpha_E * \eta_Q} - \frac{1}{\alpha_E} \right) = 2,317 \text{ MWh} * \left( \frac{1}{50\%} + \frac{95\%}{16\% * 90\%} - \frac{1}{16\%} \right) = 5,44 \text{ MWh}$$

waarbij  $E$  = de binnen de beschouwde periode (=jaar) door de warmtekrachtinstallatie geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (MWh)

Deze  $\mu$ WKK realiseert dus een absolute primaire energiebesparing van 5,44 MWh per jaar en heeft dus jaarlijks recht op 5,44 WKC's. Na 4 jaar mag slechts een fractie  $X$  van het aantal toegekende certificaten ingediend worden:

$$X = \frac{RPE - 0,2 * (T - 48)}{RPE} = \frac{27,30\% - 0,2 * (T - 48)}{27,30\%}$$

waarbij  $T$  = de tijd in maanden sinds de indienstname van de installatie.

Voor de prijs van 1 WKC wordt de gemiddelde jaarprijs van het voorbije jaar gebruikt (1 april 2009 – 31 maart 2010), namelijk 39,55 EUR per certificaat (VREG, 2010b).

In tabel 8.8 worden de opbrengsten van de WKC's berekend voor ieder jaar gedurende de levensduur van de  $\mu$ WKK.

Jaar	X	Aantal WKC's	Bedrag in EUR
Jaar 1	100%	5,44	214,49
Jaar 2	100%	5,44	214,49
Jaar 3	100%	5,44	214,49
Jaar 4	100%	5,44	214,49
Jaar 5	91%	4,96	195,64
Jaar 6	82%	4,48	176,78
Jaar 7	74%	4,00	157,93
Jaar 8	65%	3,53	139,07
Jaar 9	56%	3,05	120,22
Jaar 10	47%	2,57	101,36
Jaar 11	38%	2,09	82,51
Jaar 12	30%	1,61	63,65
Jaar 13	21%	1,14	44,80
Jaar 14	12%	0,66	25,94
Jaar 15	3%	0,18	7,09

Tabel 8.8: Opbrengsten aan WKC's

De eerste 4 jaren geniet de  $\mu$ WKK-eigenaar van ongeveer 214 EUR WKC-opbrengsten. Dit neemt de volgende jaren degressief af tot 7,09 EUR in jaar 15.

### 8.5.9 De rentevoet

Voor de bepaling van de verdisconteringsvoet voor de economische analyse baseert deze gevalstudie zich op het rendement van een OLO<sup>16</sup> op 15 jaar. Deze geeft een correcte indicatie van de opportuniteitskost (R. Mercken, persoonlijke communicatie, 22 maart 2010). Er werd gekozen voor een OLO van 15 jaar aangezien dit overeenkomt met de verwachte levensduur van zowel de  $\mu$ WKK-installatie als de HR-ketel. Het rendement van een OLO op 15 jaar schommelt momenteel rond de 4% (Nationale Bank van België [NBB], 2010). Dit is reeds een reëel rendement en moet dus niet meer gecorrigeerd worden voor inflatie (W. Biesemans (NBB), persoonlijke communicatie, 17 april, 2010).

<sup>16</sup> Lineaire obligaties of OLO's zijn schuldvorderingen die door de staat worden uitgegeven (Laveren, Engelen, Limère, & Vandemaele, 2004)

## 8.6 ECONOMISCHE RENDABILITEITSMATSTAVEN

Na de opstelling van het economische basismodel kan overgegaan worden naar de berekening van enkele economische maatstaven om een uitspraak te kunnen doen over de economische rendabiliteit van de investering.

### 8.6.1 De netto contante waarde

De NCW wordt in Excel berekend volgens de formule (Mercken, 2004):

$$NCW = \sum_{t=1}^n [(O_t - Q_t) * A_{t-i}] - I_0$$

Hiervoor hebben we de volgende gegevens nodig uit het economisch model:

- de investeringskost  $I_0$
- de jaarlijkse baten of inkomende kasstromen  $O_t$
- de jaarlijkse kosten of uitgaande kasstromen  $Q_t$
- de reële rentevoet  $i$  die gebruikt zal worden om de netto-kasstromen te verdisconteren

Onder de investeringskost verstaan we in deze analyse de meerprijs die men voor een  $\mu$ WKK betaalt ten opzichte van een HR-ketel, namelijk 4240 EUR.

De extra investeringssubsidies (op de aanschafwaarde en de betaalde belastingen van de groene lening), de warmtekrachtcertificaten en de vermeden elektriciteitsaankoop vormen de jaarlijkse baten. Door het feit dat in het basisscenario de  $\mu$ WKK een hoger thermisch rendement heeft dan de HR-ketel, wordt er minder aardgas verbruikt. De vermeden aankoop van aardgas vormt hier dus een extra baat. In geval van een lager thermisch rendement wordt het extra gasverbruik als jaarlijkse kost opgenomen in het model.

Teneinde de jaarlijkse netto-opbrengsten te verdisconteren, gebruiken we het reële rendement van de OLO op 15 jaar, namelijk 4%. Deze gegevens stellen ons nu in staat om de NCW van het basisscenario te berekenen. Dit vindt u terug in bijlage 4.



In tegenstelling tot wat we verwacht hadden uit de literatuurstudie, wordt een positieve NCW bekomen van 4022,1 EUR. Door het uitvoeren van een sensitiviteitsanalyse zal nagegaan worden of dit een waarschijnlijke uitkomst is.

### 8.6.2 De verdisconteerde terugverdientijd

Om de verdisconteerde terugverdientijd te berekenen, baseren we ons op de verdisconteerde kasstromen van de NCW uit bijlage 4, weergegeven in de tweede kolom van tabel 8.9. Vervolgens stellen we een nieuwe kolom op met de gecumuleerde verdisconteerde kasstromen. Hierin wordt duidelijk dat na het vierde jaar de gecumuleerde kasstroom positief wordt en de  $\mu$ WKK zichzelf terugverdiend heeft. Via lineaire interpolatie kunnen we met Excel de exacte verdisconteerde terugverdientijd berekenen, namelijk 4,23 jaar. Dit is zelfs kleiner dan de vooropgestelde terugverdientijd van fabrikanten van 5 à 7 jaar.

Jaar	Verdisconteerde kasstromen	Gecumuleerde kasstromen
0	-4240	-4240
1	1527,59	-2712,41
2	1422,86	-1289,55
3	606,62	-682,94
4	563,19	-119,75
5	526,03	406,29
6	490,90	897,19
7	457,69	1354,88
8	426,31	1781,188
9	396,67	2177,85
10	368,67	2546,52
11	342,24	2888,76
12	317,30	3206,07
13	293,78	3499,84
14	271,59	3771,43
15	250,67	4022,10
<b>Dynamische terugverdientijd = 4,23 jaar</b>		

Tabel 8.9: berekening verdisconteerde terugverdientijd (in EUR)

### **8.6.3 De interne rendementsvoet**

De interne rendementsvoet werd via Excel berekend en bedraagt 20,56% voor het basisscenario. Dit is de maximale interestvoet die de investeerder van een  $\mu$ WKK-installatie zou kunnen betalen indien deze investering met een lening gefinancierd wordt. Hierbij kan hij de lening met de inkomende kasstromen van de  $\mu$ WKK terugbetalen en heeft hij geen winst of verlies.

## **8.7 ECOLOGISCHE EN ENERGETISCHE RENDABILITEIT**

Naast het economische aspect kan ook de ecologische en energetische zijde van een  $\mu$ WKK-installatie bekeken worden. Hieronder vallen zowel de primaire energiebesparing als de emissiereductie die een  $\mu$ WKK met zich meebrengt.

### **8.7.1 De primaire energiebesparing**

De primaire energiebesparing van een  $\mu$ WKK werd reeds berekend bij de warmtekrachtcertificaten in paragraaf 8.5.8 en bedraagt 5,44 MWh per jaar. Dit betekent dat er jaarlijks 5,44 MWh energie bespaard wordt ten opzichte van het referentiescenario waarin warmte wordt opgewekt met een verwarmingsketel en elektriciteit wordt aangekocht via het net.

### **8.7.2 De CO<sub>2</sub>-reductie**

In hoofdstuk 6 werd reeds aangehaald dat een emissiebalans opgesteld kan worden teneinde de reductie van broeikasgassen en andere schadelijk componenten te achterhalen.

Deze studie zal enkel de CO<sub>2</sub>-reductie in beschouwing nemen. De reden hiervoor is dat producenten op dit moment nog zeer karig zijn met informatie vrij te geven en er dus nog vrij weinig bekend is over de uitstoot van vervuilende en schadelijke stoffen bij  $\mu$ WKK's.

Aangezien CO<sub>2</sub> een broeikasgas is en bijgevolg uitsluitend een globale impact heeft, volstaat het om enkel de globale emissiebalans op te stellen. Hiertoe hebben we het CO<sub>2</sub>-

emissieniveau van de  $\mu$ WKK, de referentieketel en de vermeden elektriciteitsaankoop nodig.

Vooraleer we echter in staat zijn deze emissieniveaus te berekenen, hebben we nood aan twee extra gegevens, namelijk de CO<sub>2</sub>-intensiteitsfactor<sup>17</sup> van aardgas en de CO<sub>2</sub>-intensiteitsfactor van het centrale elektriciteitspark.

#### **8.7.2.1 De CO<sub>2</sub>-intensiteitsfactor van aardgas**

Voor de CO<sub>2</sub>-intensiteitsfactor van aardgas hanteren we een waarde van 200,8 kg CO<sub>2</sub>/MWh. Deze wordt toegepast op het gasverbruik dat reeds gecorrigeerd werd naar de onderste verbrandingswaarde (Auditcommissie Vlaanderen, 2009).

#### **8.7.2.2 De CO<sub>2</sub>-intensiteitsfactor van het centrale elektriciteitspark**

Om de gemiddelde CO<sub>2</sub>-intensiteitsfactor van het gehele Vlaamse elektriciteitspark te bepalen, wordt rekening gehouden met de verschillende soorten elektriciteitscentrales die in Vlaanderen in werking zijn. In opdracht van het MIRA en de VMM werd een milieuverkenning uitgevoerd waarin de huidige uitstoot per eenheid netto geproduceerde elektriciteit op 110,3 kg CO<sub>2</sub>/GJ geschat wordt voor Vlaanderen (Brouwers, Lodewijks, & Van Hooste, 2009). Dit komt overeen met een intensiteitsfactor van 397,08 kg CO<sub>2</sub>/MWh.

N. Boeckx van Auditconvenant Vlaanderen merkt op dat, teneinde consistent te rapporteren in het kader van de internationale rapporteringsverplichtingen, gebruik gemaakt kan worden van een intensiteitsfactor van 400 kg CO<sub>2</sub>/MWh (persoonlijke communicatie, 2 maart, 2010). Daar een intensiteitsfactor van 397,08 kg CO<sub>2</sub>/MWh zeer nauw aansluit bij deze internationale norm, kunnen de resultaten van deze studie internationaal vergeleken worden.

---

<sup>17</sup> Dit is de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die uitgestoten wordt per eenheid verstoekte brandstof en wordt doorgaans in kg CO<sub>2</sub>/kWh weergegeven (Cogen Vlaanderen, 2006).

### 8.7.2.3 De globale CO<sub>2</sub>-emissiebalans

De globale emissiebalans van CO<sub>2</sub> wordt als volgt weergegeven:

$$\Delta m_{CO_2} = m_{CO_2C} - m_{CO_2Q} - m_{CO_2E}$$

waarbij  $\Delta m_{CO_2}$  = de vermeden CO<sub>2</sub>-uitstoot door de implementatie van  $\mu$ WKK

$m_{CO_2C}$  = emissieniveau van de  $\mu$ WKK

$m_{CO_2Q}$  = emissieniveau van de referentieketel

$m_{CO_2E}$  = emissieniveau van de vermeden elektriciteitsaankoop

Voor het verbruik van de  $\mu$ WKK grijpen we terug naar de gegevens berekend in paragraaf 8.5.6. Dit verbruik komt neer op 22,036 MWh/j. Het jaarlijks verbruik van de referentieketel bedraagt 23,26 MWh. Voorts wordt er jaarlijks 2,317 MWh elektriciteit geproduceerd die niet meer via het net aangekocht dient te worden. Het is deze elektriciteitsproductie die een globale CO<sub>2</sub>-reductie bewerkstelligt. Tabel 8.10 toont de benodigde berekeningen.

	<b>Verbruik (MWh/j)</b>	<b>Intensiteitsfactor (kg CO<sub>2</sub>/MWh)</b>	<b>Emissieniveau (kg CO<sub>2</sub>/j)</b>
$\mu$ WKK	22,036	200,8	4424,79
Referentie HR-ketel	23,26	200,8	4670,61
Vermeden elektriciteitsaankoop	2,317	397,08	920,03
<b>Globale CO<sub>2</sub>-reductie</b>			<b>-1165,85</b>

Tabel 8.10: berekening globale CO<sub>2</sub>-emissie balans

Hieruit blijkt dat de implementatie van een  $\mu$ WKK jaarlijks een globale CO<sub>2</sub>-reductie van 1,165 ton kg realiseert. Indien we de CO<sub>2</sub>-vermindering over de gehele levensduur van 15 jaar beschouwen, brengt de introductie van  $\mu$ WKK een totale reductie van meer dan 17 ton CO<sub>2</sub> met zich mee.

Om een beter beeld te kunnen vormen over deze cijfers, plaatsen we ze in het perspectief van het Vlaams Klimaatbeleidsplan. Hierin streeft de overheid naar een gemiddelde emissiereductie van 1,124 Mton CO<sub>2</sub> in bestaande woningen in de periode

2008-2012 (Vlaamse overheid, 2006). Jaarlijks komt dit neer op een reductie van ongeveer 225 kton.

Volgens MIRA (2009c) bedroeg het aantal huishoudens in Vlaanderen in 2007 2,55 miljoen. Wanneer we de jaarlijks vooropgestelde reductie van 225 kton delen door dit aantal huishoudens bekomen we een beoogde vermindering van 88,24 kg CO<sub>2</sub> per jaar per gezin. Een huishouden dat in een  $\mu$ WKK investeert, bereikt deze doelstelling met een jaarlijkse CO<sub>2</sub>-reductie van 1,165 ton dus met gemak.

Deze globale CO<sub>2</sub>-reductie kan tevens bekeken worden in het kader van de potentiële emissiereductie die de introductie van  $\mu$ WKK's met zich meebrengt. In hun studie schatten Six en Dexters (2009) het jaarlijks potentieel aan verkochte  $\mu$ WKK's op 23 000 – 46 000 eenheden in Vlaanderen, eens de markt op kruissnelheid is. Indien we voorzichtigheidshalve uitgaan van 23 000 geïnstalleerde eenheden, zouden deze jaarlijks 26,815 kton CO<sub>2</sub> besparen. Een grootschalige introductie van  $\mu$ WKK's zou bijgevolg voor bijna 12% kunnen bijdragen aan de vooropgestelde emissiereductie.

## **8.8 SENSITIVITEITSANALYSE**

De sensitiviteitsanalyse in deze eindverhandeling zal uitgevoerd worden door middel van een Monte Carlo-simulatie. Paragraaf 5.6 behandelde reeds de theoretische kant van deze simulatie. Hier volgt nu een uiteenzetting van de praktische stappen die ondernomen werden om de sensitiviteitsanalyse uit te voeren met het programma Crystal Ball.

### **8.8.1 Identificatie van de input-parameters waarvan de waarde onzeker is**

Het doel van de Monte Carlo-simulatie is nagaan welke input-parameters een effect hebben op de output-parameters en hoe groot dit effect is. Hiertoe werden zeven parameters waarvan de waarde onzeker is uit het basis economisch model bepaald:

- de kostprijs van de  $\mu$ WKK
- de elektriciteitsprijs
- de gasprijs
- het elektrisch rendement van de  $\mu$ WKK
- het thermisch rendement van de  $\mu$ WKK

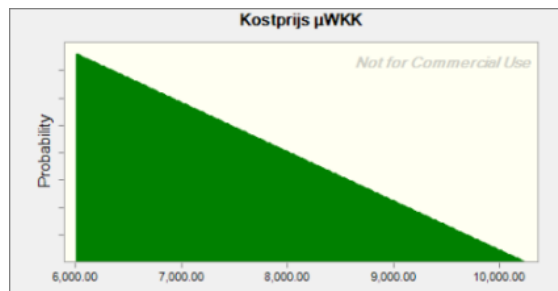
- de prijs van de WKC's
- de verdisconteringsvoet

### 8.8.2 Bepaling van de kansverdeling voor de input-parameters

In deze sensitiviteitsanalyse werd voor iedere onzekere parameter dezelfde kansverdeling geselecteerd. Er werd gekozen voor een driehoeksverdeling waarbij voor elke parameter een minimum-, maximum- en meest waarschijnlijke waarde werd bepaald. Binnen deze grenzen zal de parameter variëren tijdens de simulatie.

#### 8.8.2.1 De kostprijs van de $\mu$ WKK

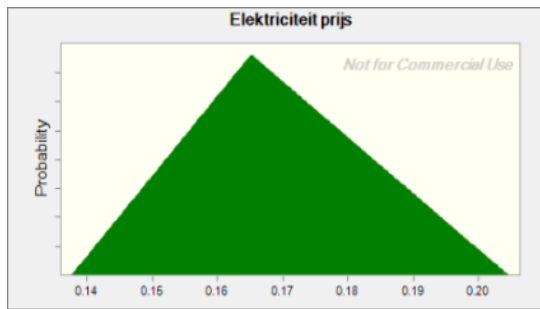
De kostprijs van de Baxi Ecogen werd op 6000 EUR geschat. Andere producenten (Whispergen, Remeha) gaven een veel hogere prijs aan. Voor deze parameter wordt 6000 EUR dan ook als minimumwaarde aangenomen. De prijs van de  $\mu$ WKK van Remeha, 10 250 EUR, vormt de maximumwaarde. Voor de meest waarschijnlijke waarde werd ook 6000 EUR aangenomen. Figuur 8.7 geeft de kansverdeling weer.



Figuur 8.7: Kansverdeling kostprijs  $\mu$ WKK

#### 8.8.2.2 De elektriciteitsprijs

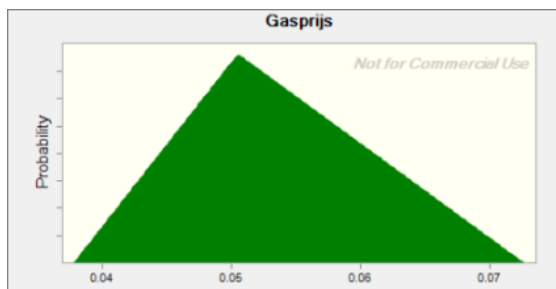
Om de range van de elektriciteitsprijs te bepalen, werd gekeken naar de evolutie van deze prijs in de periode 2004-2010. Het laagste peil deed zich voor in 2002 met een prijs van 13,76 EUR/kWh (Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, 2008). Het hoogste peil werd teruggevonden tijdens de energiecrisis begin 2009. De prijs bedroeg op dat moment 20,45 EUR/MWh (G. Mergan, persoonlijke communicatie, 2 maart 2010). Deze twee prijzen vormen de minimum- en maximumwaarde van de elektriciteitsprijs. Als meest waarschijnlijke waarde wordt de huidige prijs van 16,51 EUR/MWh aangenomen. Dit wordt weergegeven door figuur 8.8.



Figuur 8.8: Kansverdeling elektriciteitsprijs

### 8.8.2.3 De gasprijs

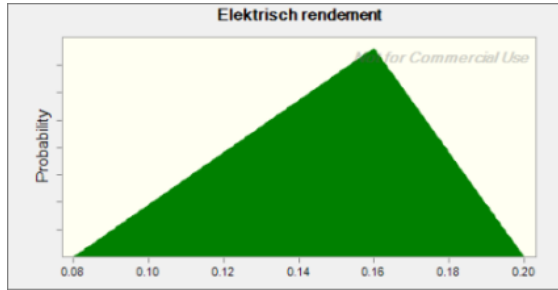
Voor het bepalen van de gasprijsgrenzen werd dezelfde methode gebruikt als bij de elektriciteitsprijs. De laagste prijs werd eveneens in 2002 gevonden, namelijk 3,78 EUR/MWh (Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, 2008). En ook begin 2009 piekte de gasprijs met 7,26 EUR/MWh (G. Mergan, persoonlijke communicatie, 2 maart 2010). De huidige prijs van 5,05 EUR/MWh nemen we als meest waarschijnlijke waarde. Figuur 8.9 illustreert dit.



Figuur 8.9: Kansverdeling gasprijs

### 8.8.2.4 Het elektrisch rendement van de $\mu$ WKK

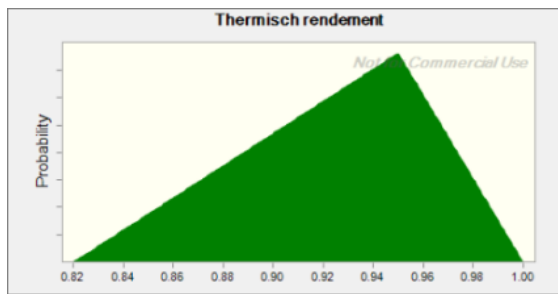
Er werd reeds aangehaald dat het elektrisch rendement van de Baxi Ecogen aan de hoge kant lag in vergelijking met andere  $\mu$ WKK's waar rendementen van werden vrijgegeven. Bijgevolg kiezen we voor een ruime marge voor de parameterwaarden. Als laagste rendement wordt 8% (het rendement uit de studie van Six en Dexters (2009)) genomen. Het hoogste rendement kennen we een waarde van 20% toe, de meeste waarschijnlijke 16%. Deze waarden vindt u terug in figuur 8.10.



Figuur 8.10: Kansverdeling elektrisch rendement  $\mu$ WKK

### 8.8.2.5 Het thermisch rendement van de $\mu$ WKK

Ook met het thermisch rendement gaan we voorzichtig om. De minimumwaarde wordt gelijkgesteld aan het thermisch rendement gevonden in de studie van Six en Dexters (2009), namelijk 82%. Voor de maximumwaarde en de meeste waarschijnlijke waarde nemen we respectievelijk 100% en 95%. Figuur 8.11 geeft deze waarden weer in grafiekvorm.

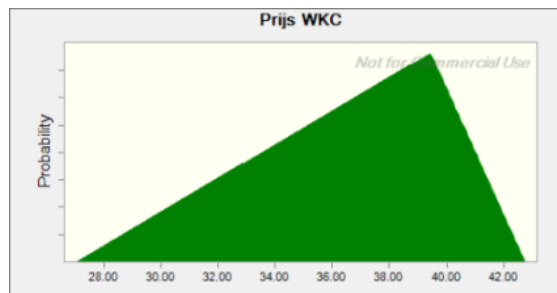


Figuur 8.11: Kansverdeling thermisch rendement  $\mu$ WKK

### 8.8.2.6 De prijs van de WKC's

Een volgende parameter waarvan de waarde nog onzeker is, is de prijs van de WKC's. De minimumwaarde stellen we gelijk aan de minimumprijs van 27 EUR die de distributienetbeheerders garanderen. In april 2007 werd de hoogste marktprijs waargenomen voor één WKC, namelijk 42,75 EUR (VREG, 2010b). Dit vormt de maximumwaarde voor deze parameter. De meest waarschijnlijke waarde is wederom de prijs van 39,55 EUR uit het basis economische model. Deze kansverdeling vindt u terug in figuur 8.12.

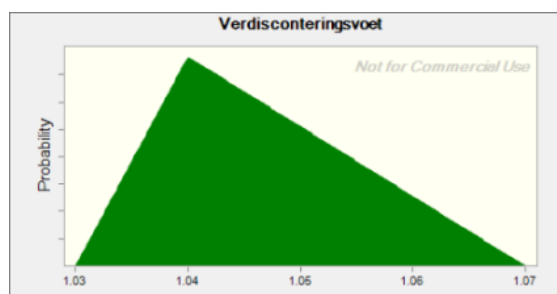




Figuur 8.12: Kansverdeling prijs WKC's

### 8.8.2.7 De verdisconteringsvoet

De rentevoet waarmee de netto-kasstroomen verdisconteerd worden, vormt de laatste onzekere parameter. De 4% uit het basismodel behouden we als meest waarschijnlijke waarde. De minimumwaarde wordt gelijkgesteld aan 3%, de maximumwaarde aan 7%. De minimum-, meest waarschijnlijke en maximumwaarde van de verdisconteringsvoet bedragen dus respectievelijk 3%, 4% en 7% (zie figuur 8.13).



Figuur 8.13: Kansverdeling verdisconteringsvoet

### 8.8.3 Toevallige keuze van de parameterwaarden

In deze Monte Carlo-simulatie werden voor iedere output-parameter 10 000 'trials' of proeven uitgevoerd. Bij elke trial trekt het model een willekeurige waarde uit iedere verdeling van de onzekere parameters. De driehoeksverdeling bepaalt de kans dat een bepaalde waarde getrokken wordt. Zo wordt een kansverdeling van elke output-parameter bekomen.

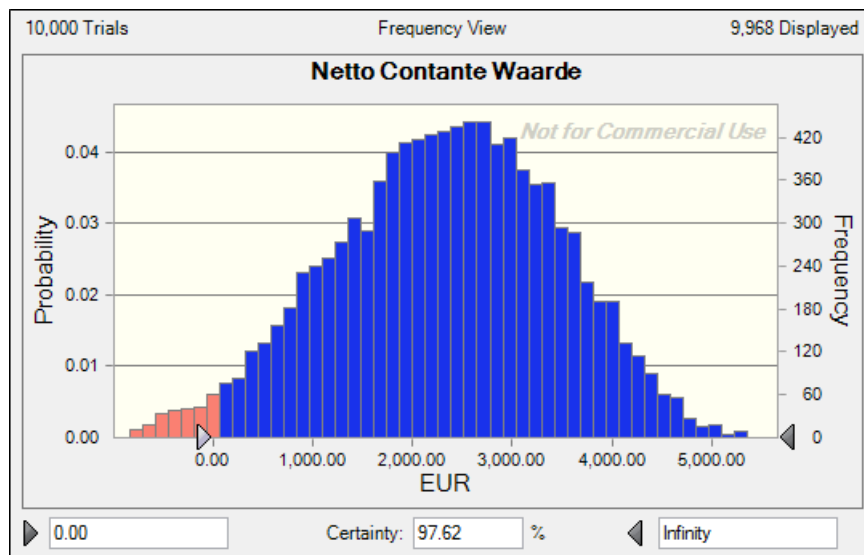
### 8.8.4 Kansverdeling van economische output-parameters

Nadat de onzekere input-parameters en hun kansverdeling bepaald zijn, kan de Monte Carlo-simulatie gestart worden. De drie economische output-parameters in deze

simulatie zijn de netto contante waarde, de verdisconteerde terugverdientijd en de interne rendementsvoet.

#### 8.8.4.1 Kansverdeling van de netto contante waarde

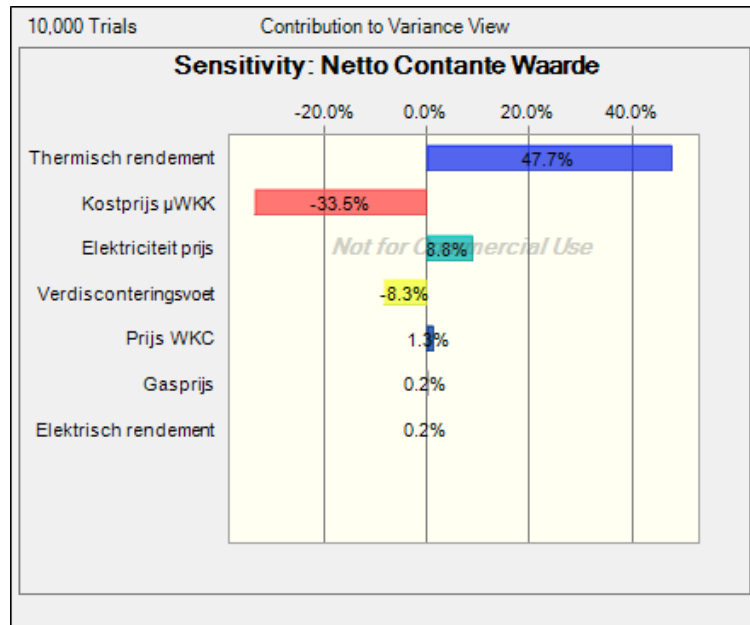
Figuur 8.14 toont de kansverdeling van de NCW die bekomen werd na 10 000 trials.



Figuur 8.14: Kansverdeling NCW

Hieruit wordt duidelijk dat er 97,62% kans is op een positieve NCW bij de investering in een  $\mu$ WKK. De meeste waarschijnlijke uitkomst ligt tussen de 2000 en 3000 EUR. De NCW van 4022,1 EUR van het basismodel ligt, vergeleken met deze resultaten, aan de hoge kant.

Wanneer we vervolgens figuur 8.15 beschouwen, kan bepaald worden hoeveel procent van de variatie in de NCW verklaard wordt door de variatie van iedere onzekere parameter.



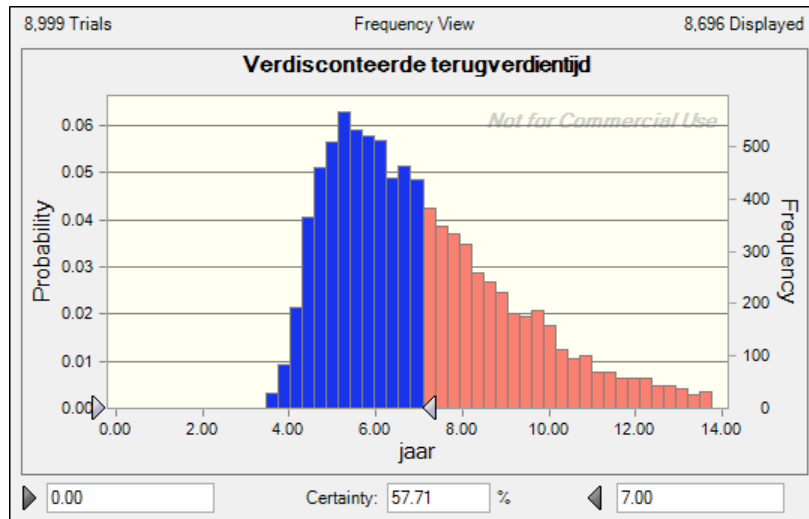
Figuur 8.15: Bijdrage van input- parameters aan variatie NCW

Uit deze grafiek blijkt dat het thermisch rendement de meest invloedrijke parameter is die 47,7% van de variatie van de NCW verklaart. Hoe hoger het thermisch rendement, hoe groter de NCW zal zijn. Ook de kostprijs van de  $\mu$ WKK-installatie heeft een belangrijke (negatieve) bedrage van 33,5%: hoe hoger de kostprijs, hoe lager de NCW.

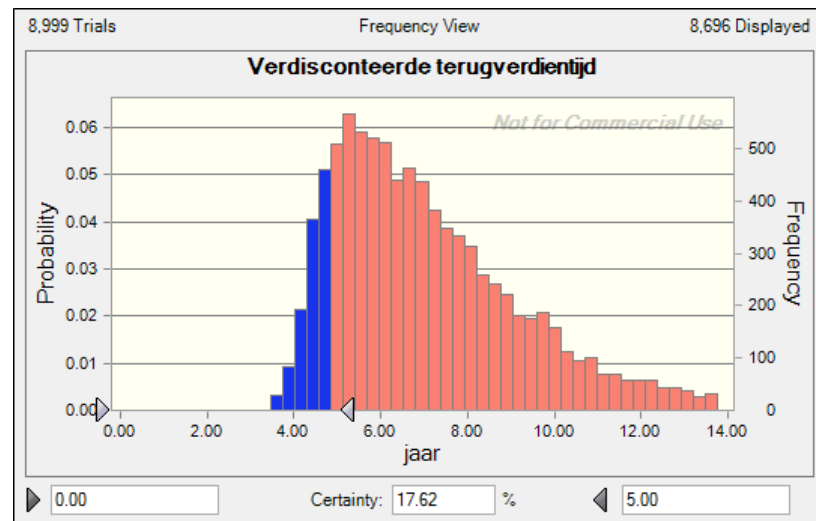
De elektriciteitsprijs en de verdisconteringsvoet hebben beide, respectievelijk een positieve en een negatieve invloed van ongeveer 8%. De prijs van de WKC, de gasprijs en het elektrisch rendement hebben slechts een klein effect op de NCW.

#### 8.8.4.2 Kansverdeling van de verdisconteerde terugverdientijd

Producenten streven naar een terugverdientijd van 5 à 7 jaar voor een  $\mu$ WKK-installatie. Uit de kansverdeling van de verdisconteerde terugverdientijd kan afgeleid worden dat in 57,71% van de gevallen de installatie op (minder dan) 7 jaar is terugverdiend (zie figuur 8.16). Indien we een terugverdientijd van 5 jaar als doel beschouwen, wordt dit slechts in 17,62% van de gevallen bereikt (zie figuur 8.17).



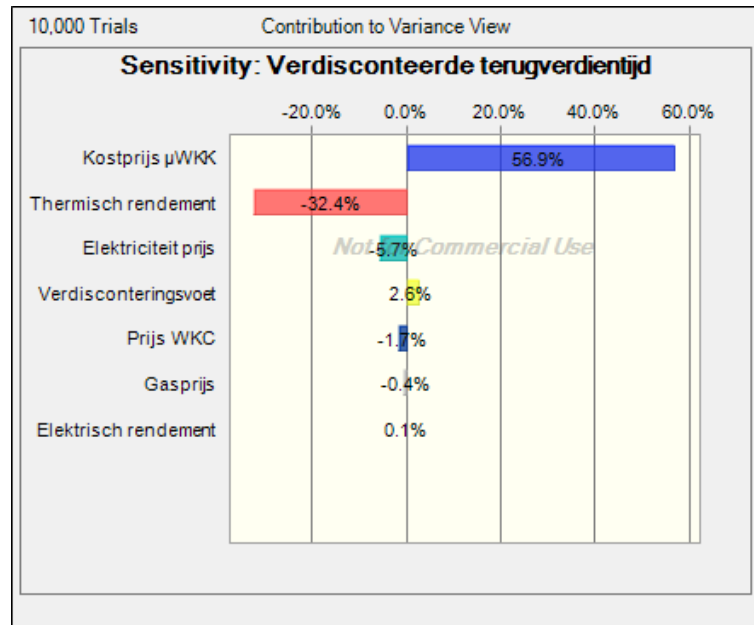
Figuur 8.16: kansverdeling DTVT (7 jaar)



Figuur 8.17: kansverdeling DTVT (5 jaar)

Voor het basismodel werd een verdisconteerde terugverdiertijd van 4,23 jaar bekomen. Op basis van de Monte Carlo-simulatie kan gesteld worden dat deze waarde niet de meest waarschijnlijke is. De terugverdiertijden lopen uiteen van iets minder dan 4 tot bijna 14 jaar. Wel merken we op dat terugverdiertijden van 5 tot 7 jaar de meeste kans hebben om voor te komen. Dit is net de vooropgestelde range van fabrikanten.

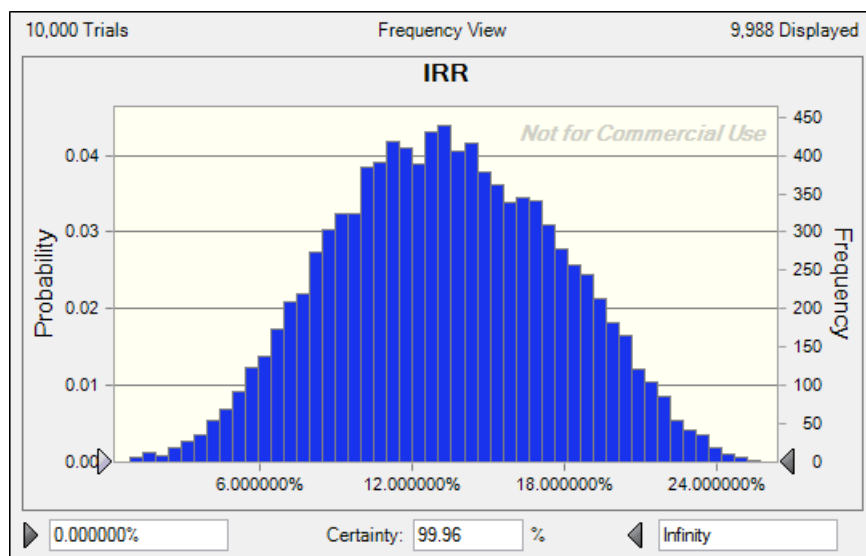
Om na te gaan welke input-parameters deze maatstaf beïnvloeden, kijken we naar figuur 8.18. Net als bij de NCW hebben de kostprijs van de  $\mu$ WKK en het thermisch rendement het meeste gewicht in de variatie van de verdisconteerde terugverdiertijd, respectievelijk 56,9% en 32,4%.



Figuur 8.18: Bijdrage van input parameters aan variatie DTVT

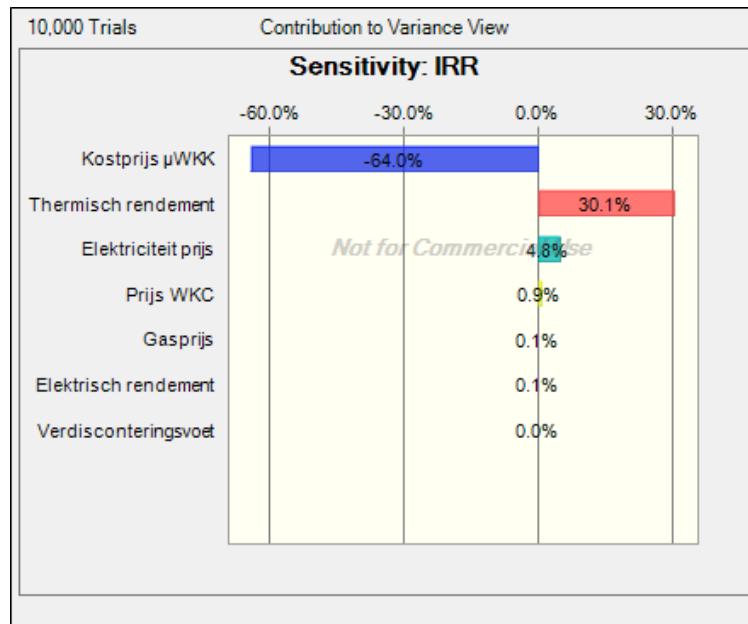
### 8.8.4.3 Kansverdeling van de interne rendementsvoet

De kansverdeling van de interne rendementsvoet wordt geïllustreerd door figuur 8.19. In 99,96% van de gevallen wordt een positieve interne rendementsvoet bekomen. De IR van 20,56% van het basisscenario moeten echter met voorzichtigheid geïnterpreteerd worden. De kans op zo'n hoge IR is volgens de Monte Carlo-simulatie eerder klein. De meest realistische waarde die we voor de IR zullen uitkomen, ligt tussen de 10 en 15%.



Figuur 8.19: Kansverdeling IR

Ook deze parameter ondervindt de meeste invloed van de kostprijs van de  $\mu$ WKK (64%) en het thermisch rendement (30,1%). De overige parameters hebben slechts een geringe invloed (zie figuur 8.20).



Figuur 8.20: Bijdrage van input-parameters aan variatie IR

#### **8.8.4.4 Invloed op de kansverdelingen wanneer de WKC's wegvallen**

Indien we de veronderstelling maken dat er geen WKC's worden uitgekeerd, veranderen de drie economische parameters van het basisscenario als volgt:

- de NCW daalt van 4022,1 EUR naar 2429,24 EUR
- de DTVT stijgt naar 6,54 jaar (komende van 4,23 jaar)
- de IR wordt 13,99% in plaats van 20,56%

Bijkomend werd de Monte Carlo-simulatie herhaald om de invloed van het wegvallen van de WKC's op de kansverdelingen te analyseren. Hieruit konden volgende conclusies getrokken worden:

- de kans op een positieve NCW daalt van 97,62% naar 85,61%
- in geen enkel geval wordt een terugverdientijd kleiner dan 5 jaar teruggevonden
- ook een terugverdientijd tussen de 5 en 7 jaar wordt weinig waarschijnlijk: een kans van slechts 5,42%

- in 99,58% van de gevallen is de IR positief; de meest waarschijnlijke waarde ligt nu tussen 6% en 12%

Het wegvallen van de WKC's beïnvloedt de drie economische rendabiliteitsmaatstaven sterk in de negatieve zin. Om de introductie van  $\mu$ WKK's te stimuleren zijn deze certificaten dus van groot belang.

#### **8.8.4.5 Invloed op de kansverdelingen wanneer de subsidies wegvallen**

Vervolgens werd deze analyse herhaald, maar nu zonder subsidieregeling in de vorm van belastingvermindering. Hierbij vallen zowel de investeringssubsidie als de subsidie op de interesten van de groene lening weg. De drie economische parameters namen nu volgende waarden aan:

- een NCW van 2293,42 EUR
- een DTVT van 7,88 jaar
- een IR van 11,51%

De Monte Carlo-simulatie gaf in deze situatie ongeveer dezelfde resultaten als bij het wegvallen van de WKC's. Ook deze steunmaatregel is dus onontbeerlijk om een grootschalige introductie van  $\mu$ WKK's op gang te krijgen.

Wanneer zowel de WKC's als de subsidies wegvallen, wordt in het basisscenario slechts een NCW van 700,56 EUR, een DTVT van 12,26 jaar en een IR van 6,27% bereikt.

## **DEEL IV: CONCLUSIES**



## **9 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN**

---

Dit laatste hoofdstuk omvat zowel de inhoudelijk conclusies als enkele mogelijkheden voor verder onderzoek.

### **9.1 INHOUDELIJKE CONCLUSIES**

In deze eindverhandeling werd de economische en ecologische rendabiliteit van  $\mu$ WKK in Vlaanderen onderzocht. Teneinde deze analyse grondig uit te voeren, werden de technologische, economische en ecologische & ecologische aspecten van  $\mu$ WKK afzonderlijk behandeld.

#### **9.1.1 De technologische aspecten**

Momenteel zijn er vijf technologieën die wat betreft elektrisch vermogensbereik in aanmerking komen voor residentiële  $\mu$ WKK. Dit zijn de zuigermotoren met inwendige verbranding, microturbines, de Organic Rankine Cycle systemen, Stirlingmotoren en brandstofcellen. Typische vermogens van een residentiële  $\mu$ WKK liggen rond de 1 kWe en 4,5 – 7,5 kWth.  $\mu$ WKK's op basis van een Stirlingmotor met bijbrander staan het verst in technologische ontwikkeling en worden reeds door één producent gecommmercialiseerd. Andere toonaangevende ketelproducenten zijn volop bezig met onderzoek, ontwikkeling en veldtesten en verwachten een geleidelijke marktintroductie in 2011-2012. Deze technologie vormt het uitgangspunt van deze einderhandeling. Volgens de statistieken van de VREG en het VITO zou er tot nog toe geen enkele residentiële  $\mu$ WKK in Vlaanderen operationeel zijn.

Wat opvalt, is dat technische informatie omtrent prototypes angstvallig wordt achtergehouden door producenten. Ook informatie betreffende verkoopprijzen wordt afgeschermd. Enkel bij Baxi was men bereid om zowel de voorlopig geschatte rendementen als de toekomstige kostprijs vrij te geven. Deze  $\mu$ WKK werd dan ook gekozen als basis voor de economische analyse.

Toepassing van de Stirlingmotor kent zowel voor- als nadelen. De voordelen situeren zich in het hoge thermisch rendement (95%), de vrije keuze van de warmtebron, de stille

motor en het beperkte onderhoud. Het nadeel van deze motor is de trage opstart waardoor het een tweetal minuten duurt vooraleer de motor zijn volle vermogen bereikt.

De lage kracht-warmteverhouding (0,1-0,25) van een  $\mu$ WKK met Stirlingmotor maakt dat deze  $\mu$ WKK's hoofdzakelijk geschikt zijn voor woningen met een grote warmtevraag (16 – 27 MWh/j).

### 9.1.2 De economische aspecten

Tabel 9.1 vat de resultaten van de economische analyse van het basisscenario samen.

NCW	4022,1 EUR
DTVT	4,23 jaar
IR	20,56%

Tabel 9.1: Samenvatting economische analyse

Op basis van deze economische rendabiliteitsmaatstaven lijkt de investering in een  $\mu$ WKK een interessante keuze. Hierbij rest uiteraard de vraag of de consument bereid is om de extra investering van zo'n 4240 EUR te doen, de meerprijs van de  $\mu$ WKK bovenop de referentieketel.

Wanneer we echter de resultaten van de sensitiviteitsanalyse beschouwen, moeten we vaststellen dat het basisscenario niet de meest waarschijnlijke uitkomsten geeft. Tabel 9.2 geeft de meest realistische waarden weer die bekomen werden met de Monte Carlo simulatie.

NCW	2000-3000 EUR
DTVT	5-7 jaar
IR	10-15%

Tabel 9.2: Samenvatting Monte Carlo simulatie

Deze waarden zijn iets minder gunstig dan het basisscenario doet uitschijnen. Maar ook hieruit kan geconcludeerd worden dat investeren in een  $\mu$ WKK een verantwoorde keuze is. Deze investering verdient zich terug op 5 à 7 jaar, de terugverdientijd die fabrikanten beogen.

De parameters die het meeste invloed uitoefenen op de economische maatstaven zijn de kostprijs van de  $\mu$ WKK en het thermisch rendement van de  $\mu$ WKK.

In het basismodel werden tevens de warmtekrachtcertificaten en de overheidssubsidie opgenomen. De sensitiviteitsanalyse toont aan dat de economische maatstaven sterk in de negatieve zin beïnvloed worden wanneer één van beide of beide steunmaatregelen zouden wegvallen. Deze maatregelen zijn dus van cruciaal belang om de introductie van  $\mu$ WKK's te stimuleren.

### **9.1.3 De ecologische en energetische aspecten**

Een belangrijk ecologisch voordeel van  $\mu$ WKK schuilt in de primaire energiebesparing die zo'n installatie met zich meebrengt. De beschouwde  $\mu$ WKK realiseert een jaarlijkse primaire energiebesparing van 5,44 MWh.

Daarenboven bewerkstelligt deze  $\mu$ WKK een aanzienlijke CO<sub>2</sub>-reductie van 1165,85 kg/j of zo'n 17 ton gedurende 15 jaar, de levensduur van de  $\mu$ WKK.

Aan deze emissiereductie zijn wel enkele voorwaarden verbonden. Zo zijn een correcte dimensionering van de installatie en een voldoende grote warmtevraag vereist zodat de  $\mu$ WKK draaitijden van minstens één uur aan een stuk kent.

Tot slot dient vermeld te worden dat residentiële  $\mu$ WKK concurrentie zal ondervinden van andere milieuvriendelijke energietechnologieën zoals de warmtepomp, zonnepanelen en thermophotovoltaïcs. Nieuwe  $\mu$ WKK-technologieën op basis van brandstofcellen zullen deze concurrenten in de toekomst op afstand houden.

## 9.2 MOGELIJKHEDEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Gezien de schaarse informatie die momenteel wordt vrijgegeven over bestaande en toekomstige  $\mu$ WKK's, vormt deze eindverhandeling slechts een eerste aanzet tot onderzoek naar  $\mu$ WKK. Tevens werden verschillende elementen aangereikt waarop verder onderzoek zich zou kunnen baseren.

Een eerste aanbeveling betreft een uitbreiding van de economische analyse naar type woningen (open, halfopen, gesloten bebouwing,...) met verschillende warmtevragen. Voor ieder type woning zal een JBDC moeten opgesteld worden om zo tot een juiste dimensionering van de  $\mu$ WKK te komen. Wanneer de  $\mu$ WKK-markt zich verder ontwikkelt en er meer installaties met bijhorende informatie voor de consument beschikbaar worden, kan er een zinvolle opsplitsing gemaakt worden naar woningtype.

Aansluitend bij de eerste aanbeveling kan het aspect 'trigeneratie' tevens behandeld worden. Dit betreft de gezamenlijke opwekking van elektriciteit, warmte en koude. Deze optie kan de rendabiliteit ten goede komen aangezien de installatie meer kan draaien. Tijdens de warme maanden kan er koude opgewekt worden en wordt er bijgevolg meer elektriciteit geproduceerd. Deze baten zullen uiteraard afgewogen moeten worden tegen de extra kostprijs die hiermee gepaard gaat.

Een volgende mogelijkheid bestaat erin om de invloed van een buffervat op de economische en ecologische rendabiliteit te analyseren. Het gebruik van een buffervat staat toe om meer warmte te produceren dan gevraagd wordt, deze tijdelijk op te slaan en vervolgens te gebruiken in periodes met een hoge warmtevraag. De grootte van een buffervat heeft een aanzienlijke invloed op de jaarlijkse elektriciteitsproductie en het elektrisch rendement (Six & Dexters, 2009). Een  $\mu$ WKK met een groot buffervat kan langere periodes draaien en bijgevolg meer elektriciteit produceren. De keerzijde hiervan is de investeringskost die hoger ligt voor een groot buffervat.

Een vierde aanbeveling heeft betrekking op de subsidies vanuit de overheid. Men kan zich de vraag stellen of een belastingvermindering louter gebaseerd op de kostprijs van de  $\mu$ WKK een juiste en verantwoorde manier van subsidiëren is. Een volgende studie zou andere subsidiemogelijkheden kunnen onderzoeken zoals het subsidiëren van de

onrendabele top<sup>18</sup> en dit in perspectief plaatsen met de subsidieregeling in andere Europese landen waar WKK al meer ingeburgerd is.

Tot slot gaat een aanbeveling uit naar onderzoek in nieuwe  $\mu$ WKK-technologieën. Speciale aandacht zou moeten uitgaan naar technologieën die geen CO<sub>2</sub> uitstoten, zoals  $\mu$ WKK's op basis van brandstofcellen en in de toekomst misschien biomassagestookte  $\mu$ WKK's. Een andere interessante technologie die in deze eindverhandeling naar boven kwam, waren thermophotovoltaïcs. Eens deze technologie op punt staat, zou het concurrentievermogen ervan onderzocht kunnen worden op  $\mu$ WKK's.

---

<sup>18</sup> De onrendabele top van een investering wordt gedefinieerd als het gedeelte van de inkomsten dat nodig is om de NCW van een investering op nul te doen uitkomen (Hers, Wetzels, Seebregts, & van de Welle, 2008).

## LIJST VAN GERAADPLEEGDE WERKEN

---

**AMPERE commissie (2000).** *WKK-verslag AMPERE commissie*. Geraadpleegd op 14 oktober, 2009, via [http://www.internet-observatory.be/energy/ampere\\_commission/d7.pdf](http://www.internet-observatory.be/energy/ampere_commission/d7.pdf)

**Auditcommissie Vlaanderen (2009).** *Jaarverslag periode juni 2008 – augustus 2009*. Geraadpleegd op 20 maart, 2010, via <http://www.auditconvenant.be/docs/044%2013%20090929%20Jaarverslag%202008%20-%202009%20-%20finale%20versie%20webs%E2%80%A6.pdf>

**AXA (2010).** *Consumentenkredieten*. Geraadpleegd op 16 maart, 2010, via [http://www.axa.be/pdfs/tarief\\_loa\\_nl.pdf](http://www.axa.be/pdfs/tarief_loa_nl.pdf)

**Bastiaanse, M. (2009).** *Micro-WKK: een oplossing voor het CO2-vraagstuk*. [Power Point] Gepresenteerd op de 3<sup>e</sup> Nationale micro-WKK-dag.

**Baxi (2009).** *Ecogen 24 HRe<sup>®</sup>-ketel*. Geraadpleegd op 13 maart, 2010, via <http://www.duurzaamtextel.nl/downloads/Baxi-Hre%20ketel.pdf>

**Belding, J. A. (1982).** *Cogeneration (Industrial Energy-Conservation Manual)*. Cambridge: The MIT Press.

**Bijkerk, M. J. (2009).** *HRe veldtest: resultaten 1e jaar*. [Power Point] Gepresenteerd op de 3e Nationale micro-WKK-dag.

**Biomass Technology Group (2007).** *Stirlingmotor*. Geraadpleegd op 7 december, 2009 via [http://www.btgworld.com/uploads/documents/BTG-Factsheet%20Stirlingmotor\\_20-02-2007.pdf](http://www.btgworld.com/uploads/documents/BTG-Factsheet%20Stirlingmotor_20-02-2007.pdf)

**Bosch Thermotechniek (z.d.).** *Bosch Thermotechniek invests in climate protection*. Geraadpleegd op 13 maart, 2010, via <http://www.bosch-thermotechniek.com/sixcms/detail.php/2381690>

**Brouwers, J., Lodewijks, P., & Van Hooste, H. (2009).** *Milieuverkenning 2030*. Geraadpleegd op 20 maart, 2011, via [http://www.milieurapport.be/upload/main/MIRA\\_compleet\\_TW.pdf](http://www.milieurapport.be/upload/main/MIRA_compleet_TW.pdf)

**Carbon Trust (2007).** *Micro-CHP Accelerator*. Geraadpleegd op 16 mei, 2009, via [http://www.warwickshire.gov.uk/Web/corporate/pages.nsf/Links/AF861E015721F387802572FB004AADF6/\\$file/CTC726+Micro-CHP+Interim+Report+FINAL+\(26+Nov+07\).pdf](http://www.warwickshire.gov.uk/Web/corporate/pages.nsf/Links/AF861E015721F387802572FB004AADF6/$file/CTC726+Micro-CHP+Interim+Report+FINAL+(26+Nov+07).pdf)

**Cengel, Y.A. & Boles, M.A. (2002).** *Thermodynamics: an engineering approach*. New York: McGraw-Hill.

**Cetinkaya, E. & Lemmens, J. (2008).** *Dimensionering van micro-WKK voor residentiële gebouwen*. (Masterproef Katholieke Hogeschool Limburg, 2008).

Geraadpleegd via

[https://doks.khlim.be/do/files/FiSe413eb8681a58cfe3011a6d872ea00135/E08\\_MP\\_EM\\_05\\_CetinkayaErik\\_LemmensJoris.pdf;jsessionid=78039B2D52891A59CB2A02067DFE79CB?recordId=SIWT413eb8681a58cfe3011a6d872ea00134](https://doks.khlim.be/do/files/FiSe413eb8681a58cfe3011a6d872ea00135/E08_MP_EM_05_CetinkayaErik_LemmensJoris.pdf;jsessionid=78039B2D52891A59CB2A02067DFE79CB?recordId=SIWT413eb8681a58cfe3011a6d872ea00134)

**Cogen Europe (z.d.).** *Micro-CHP needs specific treatment in the European Directive on Cogeneration*. Geraadpleegd op 18 april, 2009, via [http://www.cogen-europe.eu/Downloadables/Publications/Position\\_Paper\\_MicroCHP.pdf](http://www.cogen-europe.eu/Downloadables/Publications/Position_Paper_MicroCHP.pdf)

**Cogen Vlaanderen (2004).** *Wegwijzer*. Geraadpleegd op 18 april, 2009, via [http://www.cogenvlaanderen.be/beheer/uploads/wegwijzer\\_2004.pdf](http://www.cogenvlaanderen.be/beheer/uploads/wegwijzer_2004.pdf)

**Cogen Vlaanderen (2006).** *Basishandboek*. Geraadpleegd op 18 april, 2009, via [http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/wkk\\_basishandboekcogen.pdf](http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/wkk_basishandboekcogen.pdf)

**Cogen Vlaanderen (2008).** *Nieuwsbrief mei 2008*. Geraadpleegd op 10 oktober, 2009, via [http://www.cogenvlaanderen.be/beheer/uploads/2008.05.01\\_nieuwsbrief\\_mei\\_2008%281%29.pdf](http://www.cogenvlaanderen.be/beheer/uploads/2008.05.01_nieuwsbrief_mei_2008%281%29.pdf)

**Cogen Vlaanderen (2009a).** *Warmtekrachtcertificaten*. Opgevraagd op 30 december, 2009, via [http://www.cogenvlaanderen.be/subsubpage.php?subsubpage\\_id=8](http://www.cogenvlaanderen.be/subsubpage.php?subsubpage_id=8)

**Cogen Vlaanderen (2009b).** *Nieuwsbrief december 2009*. Geraadpleegd op 10 oktober, 2009, via [http://www.cogenvlaanderen.be/publicaties.php?publicatie\\_cat\\_id=6](http://www.cogenvlaanderen.be/publicaties.php?publicatie_cat_id=6)

**Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas (2010a).** *Evolutie van de elektriciteitsprijzen op de residentiële markt*. Geraadpleegd op 15 maart, 2010, via [http://www.creg.be/pdf/Tarifs/E/evolprix\\_e\\_nl.pdf](http://www.creg.be/pdf/Tarifs/E/evolprix_e_nl.pdf)

**Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas (2010b).** *Evolutie van de aardgasprijzen op de residentiële markt – maart 2010.* Geraadpleegd op 15 maart, 2010, via [http://www.creg.be/pdf/Tarifs/G/evolprixg\\_nl.pdf](http://www.creg.be/pdf/Tarifs/G/evolprixg_nl.pdf)

**Departement Leefmilieu, Natuur en Energie (2009).** *De klimaatconferentie in Kopenhagen in 10 vragen en antwoorden.* Geraadpleegd op 29 maart, 2010, via <http://www.lne.be/de-klimaatconferentie-in-kopenhagen-in-10-vragen-en-antwoorden>

**Dewulf, W. (2003).** *A proactive approach to ecodesign: framework and tools.* (Doctoraat Katholieke Universiteit Leuven, 2003). Geraadpleegd via [http://www.mech.kuleuven.be/lce/resources/pub/PhD\\_WDW.pdf](http://www.mech.kuleuven.be/lce/resources/pub/PhD_WDW.pdf)

**Dexia (2010).** *Tarief consumentenkredieten.* Geraadpleegd op 16 maart, 2010, via [http://www.dexia.be/wwwdexiabe/media/part/docu/Tariff\\_Consumercredits\\_NL.pdf](http://www.dexia.be/wwwdexiabe/media/part/docu/Tariff_Consumercredits_NL.pdf)

**Dexters, A. (2008).** *μWKK's, een stand van zaken!* [PowerPoint] Gepresenteerd op de Katholieke Hogeschool Brugge – Oostende.

**Energiezuinig (2009).** *Waterkracht.* Geraadpleegd op 7 januari, 2010, via <http://www.energie-zuinig.be/waterkracht.htm>

**Energik (2004).** *Wat is WKK?* Geraadpleegd op 7 december, 2009, via <http://www.energik.be/belcogen/index.html>

**Entchev, E. et al (2004).** Micro-generation technology assessment at the Canadian Centre for Housing Technology [Elektronische versie]. *Energy and buildings*, 36, 925-931.

**Europa Press Releases (2010).** *Klimaatverandering: de Europese Unie deelt naar aanleiding van het akkoord van Kopenhagen haar doelstellingen voor emissiereductie mee.* Geraadpleegd op 29 maart, 2010, via <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/10/97&format=HTML&aged=0&language=NL&guiLanguage=en>

**Europees Economisch en Sociaal Comité (2006).** *Advies van het Europees Economisch en Sociaal Comité over "Duurzame ontwikkeling als katalysator voor industriële reconversie".* Geraadpleegd op 15 februari, 2010, via <http://www.eesc.europa.eu/documents/opinions/avis.asp?type=nl>



**Europees Economisch en Sociaal Comité (2008).** *Advies van het Europees Economisch en Sociaal Comité over "Bevordering van duurzame productiviteit op de werkplek in Europa"*. Geraadpleegd op 15 februari, 2010, via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2008:010:0072:0079:NL:PDF>

**Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie (2008).** *De energiemarkt in 2007*. Geraadpleegd op 15 februari, 2010, via [http://economie.fgov.be/nl/modules/publications/statistiques/energie/energiemarkt\\_2007.jsp](http://economie.fgov.be/nl/modules/publications/statistiques/energie/energiemarkt_2007.jsp)

**Federale Overheidsdienst Financiën (2010).** *Bouwen – verbouwen*. Geraadpleegd op 14 maart, 2010, via <http://fiscus.fgov.be/nl/faq/woning/bouwen.htm#B>

**Feenstra, C.F.J. (2008).** *The flexibel future of micro combined heat and power: an analysis of the social embedding in Dutch households in 2030*. Geraadpleegd op 3 januari, 2010, via <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2008/e08038.pdf>

**Fortis (2010).** *Groen<sup>+</sup> krediet*. Geraadpleegd op 16 maart, 2010, via <https://www.promo.fortisbanking.be/loa/messagent.aspx?LOA=16&LANG=NL&SOURCETAG=GROEN-GEN-PROD#anchor>

**Giancoli, D.C. (2005).** *Physics: Principles with applications*. New Jersey: Prentice Hall.

**Gordon, R. J. (2009).** *Macroeconomics*. Boston: Pearson Education.

**Hers, J. S., Wetzels, W., Seebregts, A. J., & van de Welle, A. J. (2008).** *Onrendabele top berekeningen voor bestaande WKK 2008*. Geraadpleegd op 6 mei, 2010, via [http://www.senternovem.nl/mmfiles/ECN%20WKK%20Onrendabele%20top%20%282008%29\\_tcm24-296400.pdf](http://www.senternovem.nl/mmfiles/ECN%20WKK%20Onrendabele%20top%20%282008%29_tcm24-296400.pdf)

**Het Europees parlement & de raad van de Europese Unie (05.06.2009).** Richtlijn van 23 april 2009 ter bevordering van het gebruik van energie uit hernieuwbare bronnen. *Publicatieblad van de Europese Unie*, p. 46.

**ING (2010).** *Kredietsimulaties*. Geraadpleegd op 16 maart, 2010, via [https://promo.ing.be/MyHouse/2010/messagent.aspx?ID=XFY2fHACjBrBPK8j6Lyz1LEB3CZHv3v8r\\_B5m](https://promo.ing.be/MyHouse/2010/messagent.aspx?ID=XFY2fHACjBrBPK8j6Lyz1LEB3CZHv3v8r_B5m)

**Intergovernmental Panel on Climate Change (2007).** *Climate Change 2007: Synthesis report*. Geraadpleegd op 21 december, 2009, via [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)

**Kardar, M. (2007).** *Statistical physics of particles*. Cambridge: Cambridge University Press.

**Kennedy, D. & Hanson, B. (2006).** Ice and history. *Science*, 311, 1673-1674.

**Klimaattop eindigt met minimaal akkoord (2009).** *Knack*, 52. Opgevraagd op 24 december, 2009, via <http://knack.rnews.be/nl/actualiteit/nieuws/wereld/klimaattop-eindigt-met-minimaal-akkoord/article-1194680129301.htm>

**Knight, I., Ugursul, I., & Beausoleil-Morrison, I. (2005).** *Residential cogeneration systems: a review of the current technologies*. Opgevraagd op 18 april, 2009, via [www.cogen-sim.net](http://www.cogen-sim.net)

**Laveren, E., Engelen, P.-J., Limère, A., & Vandemaele, S. (2004).** *Handboek financieel beheer*. Antwerpen: Intersentia.

**Lemeire, F. (2002).** *Seminarie technologie: Thermodynamica en energieproductie*. Diepenbeek: Universiteit Hasselt.

**Merkcen, R. (2004).** *De investeringsbeslissing. Een beleidsgerichte analyse*. Antwerpen-Apeldoorn: Garant.

**Miles, R.W., Hynes, K.M., & Forbes, I. (2005).** *Photovoltaic solar cells: an overview of state-of-the-art cell development and environmental issues*. Opgevraagd op 3 januari, 2010, via [http://www.sciencedirect.com.proxy.uhasselt.be/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6TJB-4HNS67R-1-6&\\_cdi=5306&\\_user=1543454&\\_orig=search&\\_coverDate=12%2F31%2F2005&\\_sk=999489998&view=c&wchp=dGLbVzb-zSkzk&md5=10a466ed799cb951355c45cf45184402&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com.proxy.uhasselt.be/science?_ob=MImg&_imagekey=B6TJB-4HNS67R-1-6&_cdi=5306&_user=1543454&_orig=search&_coverDate=12%2F31%2F2005&_sk=999489998&view=c&wchp=dGLbVzb-zSkzk&md5=10a466ed799cb951355c45cf45184402&ie=/sdarticle.pdf)

**Milieurapport Vlaanderen (2009a).** *Emissies van broeikasgassen door de energiesector*. Opgevraagd op 25 december, 2009, via <http://www.milieurapport.be/nl/feiten-cijfers/MIRA-T/sectoren/energiesector/emissies-naar-lucht-door-de-energiesector/emissie-van-broeikasgassen-door-de-energiesector/>

**Milieurapport Vlaanderen (2009b).** *Emissies van broeikasgassen per sector.*

Opgevraagd op 25 december, 2009, via [http://www.milieurapport.be/nl/feiten-cijfers/MIRA-T/milieuthemas/klimaatverandering/emissie-van-broeikasgassen/emissie-van-broeikasgassen-per-sector-\(co2-ch4-n2o-sf6-hfks-pfks\)/](http://www.milieurapport.be/nl/feiten-cijfers/MIRA-T/milieuthemas/klimaatverandering/emissie-van-broeikasgassen/emissie-van-broeikasgassen-per-sector-(co2-ch4-n2o-sf6-hfks-pfks)/)

**Milieurapport Vlaanderen (2009c).** *Emissies van broeikasgassen door huishoudens.*

Opgevraagd op 25 december, 2009, via <http://www.milieurapport.be/nl/feiten-cijfers/MIRA-T/sectoren/huishoudens/energiegebruik-en-emissies-door-huishoudens/emissie-van-broeikasgassen-door-huishoudens/>

**Miller, G.T. (2005).** *Living in the environment: principals, connections, and solutions.*

Belmont: Brooks/Cole.

**Moran, M.J. & Shapiro, H.N. (1998).** *Fundamentals of engineering thermodynamics.*

West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.

**Nationale Bank van België (2010).** *Rendement van Belgische overheidsleningen op de*

*secundaire markt – referentietarief van lineaire obligaties.* Geraadpleegd op 15 april, 2010, via <http://www.nbb.be/belgostat/PresentationLinker?TableId=960000091&Lang=N>

**Ouwehand, J., Papa, T.J.G., Post, E., & Taal, A. (1998).** *Toegepaste*

*energietechniek.* Schoonhoven: Academic Service.

**Peeters, K. (2008).** *Beleidsbrief Duurzame Ontwikkeling.* Geraadpleegd op 11 februari,

2010, via [http://docs.vlaanderen.be/portaal/beleidsbrieven2008-2009/Peeters\\_Duurzame\\_ontwikkeling.pdf](http://docs.vlaanderen.be/portaal/beleidsbrieven2008-2009/Peeters_Duurzame_ontwikkeling.pdf)

**Remeha (2010a).** *HRe ketel: veelgestelde vragen.* Geraadpleegd op 10 maart, 2010,

via <http://www.remeha.nl/hre/index.php?id=213>

**Remeha (2010b).** *Prijslijst gaswandtoestellen.* Geraadpleegd op 17 april, 2010, via

[http://nl.remeha.com/fileadmin/user\\_upload/Prijslijsten/Prijslijst\\_2010/II\\_Gaswandtoestellen.pdf](http://nl.remeha.com/fileadmin/user_upload/Prijslijsten/Prijslijst_2010/II_Gaswandtoestellen.pdf)

**Rogner, H.-H., Zhou, D., Bradley, R., Crabbé, P., Edenhofer, O., Hare, B.,**

**Kuijpers, L., & Yamaguchi, M. (2007).** *Introduction.* In *Climate Change 2007:*

*Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press

**Sekaran, U. (2003).** *Research Methods for Business. A Skill Building Approach. 4th ed.*, New York: Wiley and Sons.

**Simader, R.G., Krawinkler R & Trnka G. (2006).** *Micro CHP systems: state-of-the-art.* Geraadpleegd op 13 mei, 2009, via [http://www.energyagency.at/fileadmin/aea/pdf/energietechnologien/Micor\\_KWK/micro-CHP.pdf](http://www.energyagency.at/fileadmin/aea/pdf/energietechnologien/Micor_KWK/micro-CHP.pdf)

**Sims, R.E.H. et al. (2007).** *Energy supply. In Climate Cchange 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press.

**Six, D. & Dexters, A. (2009).** *Oriënterende studie microwarmtekrachtkoppeling in Vlaanderen.* Geraadpleegd op 12 mei, 2009, via [http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/energietechnologie\\_micro\\_wkk\\_in\\_vlaanderen.pdf](http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/energietechnologie_micro_wkk_in_vlaanderen.pdf)

**Smart Power Foundation (2008).** *Wat doet SPF?* Geraadpleegd op 10 maart, 2010, via <http://www.smartpowerfoundation.nl/spf.php?id=6>

**Solar 4 Power (2009).** *Global solar power map.* Geraadpleegd op 7 januari, 2010, via <http://www.solar4power.com/solar-power-global-maps.html>

**Stern, N. et al. (2006).** *Stern review: the economics of climate change. Executive summary.* Geraadpleegd op 11 februari, 2010, via [http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.hm-treasury.gov.uk/media/4/3/Executive\\_Summary.pdf](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.hm-treasury.gov.uk/media/4/3/Executive_Summary.pdf)

**Synergrid (2008).** *Specifieke technische voorschriften voor decentrale productie-installaties die in parallel werken met het distributienet.* Geraadpleegd op 30 december, 2009, via <http://www.vreg.be/vreg/documenten/Consultatienota/66208.pdf>

**The Magic Boiler Company (2010).** *WhisperGen.* Geraadpleegd op 10 maart, 2010, via <http://www.magicboiler.com/nl/producten/whispergen/>

**Thomson, M. (2008).** *High density micro-generation in UK distribution networks.* Paper gepresenteerd op The first international conference and workshop on micro-cogeneration technologies and applications, Ottawa, 30 april – 1 mei 2008.

**Torfs, R., De Nocker, L., Schrooten, L. Aernouts, K., & Liekens, I. (2005).** *Internalisering van externe kosten voor de productie en verdeling van elektriciteit in Vlaanderen*. Geraadpleegd op 11 februari, 2010, via [http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/03\\_GEVOLGEN/03\\_03/ECON\\_O&O\\_07.PDF](http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/03_GEVOLGEN/03_03/ECON_O&O_07.PDF)

**Vaillant (2010a).** *Innovatie zeoTHERM & micro-WKK*. Geraadpleegd op 13 maart, 2010, via <http://www.vaillant.be/consument/documentatie-1/commerciele-folder/#commerciele-folder>

**Vaillant (2010b).** *Prijslijst condensatieketels*. Geraadpleegd op 17 april, 2010, via <http://www.vaillant.be/professioneel/documentatie/prijslijst/>

**van Kimmenaede, A.J.M. (1989).** *Warmteleer voor technici*. Culemborg: Educaboek BV.

**Vanhecke, K. & Zgajewski, T. (2008).** *The Kyoto policy of Belgium*. Gent: Academia Press.

**Verrycken, R. (2009, 19 december).** *Klimaattop loopt af met sisser*. *De Tijd*. Geraadpleegd op 21 december, 2009, via <http://www.tijd.be>

**Viessmann (2010).** *Prijslijst Batibouw 2010: richtprijzen voor huishoudelijke ketels*. Geraadpleegd op 17 april, 2010, via [http://www.viessmann.be/etc/medialib/internet-be/preislisten\\_\\_paket.Par.27272.File.File.tmp/Prijslijst-Batibouw-2010-NL.pdf](http://www.viessmann.be/etc/medialib/internet-be/preislisten__paket.Par.27272.File.File.tmp/Prijslijst-Batibouw-2010-NL.pdf)

**Vlaams Energieagentschap (2008).** *Extra subsidie micro-WKK voor vzw's en lokale besturen*. Geraadpleegd op 13 mei, 2009, via <http://www.energiesparen.be/node/1121>

**Vlaams Energieagentschap (2009a).** *Premies voor energiebesparing in Vlaanderen*. Geraadpleegd op 28 december, 2009, via <http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/premies/premies2009.pdf>

**Vlaams Energieagentschap (2009b).** *Groene leningen*. Geraadpleegd op 28 december, 2009, via <http://www.energiesparen.be/node/1432>

**Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (2008a).** *WKK-inventaris Vlaanderen 2007*. Geraadpleegd op 2 mei, 2009, via

[http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/milieuvriendelijke/WKK-inventaris\\_Vlaanderen\\_2007.pdf](http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/milieuvriendelijke/WKK-inventaris_Vlaanderen_2007.pdf)

**Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (2008b).** *Energiebalans Vlaanderen 2007*. Geraadpleegd op 7 januari, 2010, via <http://www.emis.vito.be/energiebalans-vlaanderen>

**Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (2009a).** *Energiebalans Vlaanderen 2008: voorlopige schatting*. Geraadpleegd op 7 januari, 2010, via [http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/Energiebalans%20voorlopig%20rapport%202008%20\\_%20okt%202009.pdf](http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/Energiebalans%20voorlopig%20rapport%202008%20_%20okt%202009.pdf)

**Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (2009b).** *Smart grids: slimme systemen voor intelligente energienetten*. Geraadpleegd op 6 januari, 2010, via [http://www.vito.be/NR/rdonlyres/951D093A-1A12-4C6A-8B5C-B58FF3F9062F/0/VITOVISION\\_02.pdf](http://www.vito.be/NR/rdonlyres/951D093A-1A12-4C6A-8B5C-B58FF3F9062F/0/VITOVISION_02.pdf)

**Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (2009c).** *WKK-inventaris in Vlaanderen 2008*. Geraadpleegd op 7 december, 2009, via [http://www.emis.vito.be/sites/default/files/pagina/Rapport\\_inventaris\\_duurzame\\_energie\\_2008\\_FINAAL\\_deel2.pdf](http://www.emis.vito.be/sites/default/files/pagina/Rapport_inventaris_duurzame_energie_2008_FINAAL_deel2.pdf)

**Vlaamse Milieumaatschappij (2007a).** *Milieurapport Vlaanderen: Achtergrond document, sector energie*. Geraadpleegd op 10 oktober, 2009, via [http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/01\\_SECTOREN/01\\_04/AG\\_ENERGIE.PDF](http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/01_SECTOREN/01_04/AG_ENERGIE.PDF)

**Vlaamse overheid (2006).** *Vlaams Klimaatbeleidsplan 2006-2012*. Geraadpleegd op 22 april, 2010, via [http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaams-klimaatbeleidsplan-2006-2012/vkp\\_2006-2012\\_def.pdf](http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaams-klimaatbeleidsplan-2006-2012/vkp_2006-2012_def.pdf)

**Vlaamse overheid (6.10.2006).** Besluit van 7 juli 2006 ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtcentrales. *Belgisch staatsblad*, p. 66753-66776.

**Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (2004).**

*Technisch reglement distributie elektriciteit Vlaams gewest.* Geraadpleegd op 11 maart, 2010, via

<http://www.vreg.be/vreg/documenten/technische%20reglementen/TRDE30112004.pdf>

**Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (2009a).**

*Energiemarkt – Wie doet wat? - Het systeem van warmtekrachtcertificaten (WKC).*

Geraadpleegd op 28 december, 2009, via

[http://www.vreg.be/nl/03\\_algemeen/02\\_energiemarkt/02\\_wiedoetwat/08\\_warmtekracht.asp](http://www.vreg.be/nl/03_algemeen/02_energiemarkt/02_wiedoetwat/08_warmtekracht.asp)

**Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (2009b).** *WKK-*

*producenten – Het systeem van warmtekrachtcertificaten.* Geraadpleegd op 28

december, 2009, [http://www.vreg.be/nl/06\\_sector/05\\_wkkproducenten/01\\_systeem.asp](http://www.vreg.be/nl/06_sector/05_wkkproducenten/01_systeem.asp)

**Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (2009c).** *WKK-*

*producenten – De aanvraag – Aanvraagformulieren.* Geraadpleegd op 6 januari, 2010,

via [http://www.vreg.be/nl/06\\_sector/05\\_wkkproducenten/02\\_aanvraag/](http://www.vreg.be/nl/06_sector/05_wkkproducenten/02_aanvraag/)

[04\\_aanvraagformulieren.asp](http://www.vreg.be/nl/06_sector/05_wkkproducenten/02_aanvraag/04_aanvraagformulieren.asp)

**Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (2009d).**

*Slimme meters.* Geraadpleegd op 6 januari, 2010, via

<http://www.vreg.be/nl/slimme%20meters/slimme%20meters.asp>

**Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (2010a).**

*Meteropneming – Gemiddeld verbruik.* Geraadpleegd op 10 februari, 2010, via

[http://www.vreg.be/nl/04\\_prive/05\\_meteropneming/04\\_verbruik.asp](http://www.vreg.be/nl/04_prive/05_meteropneming/04_verbruik.asp)

**Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (2010b).**

*Aantal verhandelde warmtekrachtcertificaten en gemiddelde prijs.* Geraadpleegd op 17

maart, 2010, via <http://www.vreg.be/vreg/documenten/Statistieken/54945.pdf>

**Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (2010c).** *De*

*verbruiksprofielen van huishoudelijke en niet-huishoudelijke aardgasverbruikers voor het jaar 2010.* Geraadpleegd op 7 januari, 2010, via

[http://www.vreg.be/nl/06\\_sector/02\\_leveranciers/03\\_voorschriften/04\\_aardgasprofiel.asp](http://www.vreg.be/nl/06_sector/02_leveranciers/03_voorschriften/04_aardgasprofiel.asp)

**Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (2010d).** *Lijst met de warmtekrachtinstallaties waaraan warmtekrachtcertificaten worden toegekend.*

Geraadpleegd op 27 april, 2010, via

<http://www.vreg.be/vreg/documenten/statistieken/57736.pdf>

**Wene, C.O. (2000).** *Experience curves for energy technology policy.* Michigan: OECD/IEA.

**WhisperGen (2007).** *Gebruikershandleiding.* Geraadpleegd op 15 maart, 2010, via

[http://www.whispergen.com/content/library/WP503703000\\_NL\\_USER.pdf](http://www.whispergen.com/content/library/WP503703000_NL_USER.pdf)

**World Atlas (2010).** *Countries of the world by highest population density.*

Geraadpleegd op 7 januari, 2010, via

<http://www.worldatlas.com/aatlas/populations/ctydensityh.htm>

**World Wide Fund (2008).** *Living planet report.* Geraadpleegd op 14 februari, 2010, via

[http://assets.panda.org/downloads/living\\_planet\\_report\\_2008.pdf](http://assets.panda.org/downloads/living_planet_report_2008.pdf)

**Wouterlood, F. (2007).** *Energie voor het opscheppen.* Utrecht: A.W. Bruna Uitgevers B.V.



## **BIJLAGEN**

---

Bijlage 1: Energiebalansen

Bijlage 2: Synthetisch lastprofiel aardgas

Bijlage 3: Opstelling JBCD met grootst mogelijke rechthoek

Bijlage 4: Berekening NCW van het basisscenario (in EUR)

## BIJLAGE 1 : ENERGIEBALANSEN

Energiebalans Vlaanderen 2008 (VITO, 2009a)

[PJ]	Kolen	Olie	Gas	Fossiele brandstoffen	Andere brandstoffen	Biomassa	Elektriciteit	Warmte	Nucleaire energie	TOTAAL
Primaire productie					92,5	33,5	1,3	5,6		132,8
Netto invoer	131,4	1.090,8	433,8	1.656,1			33,8		222,2	1.912,1
Internationale Bunkers		430,9		430,9						430,9
<b>Bruto binnenlands verbruik:</b>	<b>131,4</b>	<b>659,9</b>	<b>433,8</b>	<b>1.225,1</b>	<b>92,5</b>	<b>33,5</b>	<b>35,2</b>	<b>5,6</b>	<b>222,2</b>	<b>1.614,0</b>
Transformatie input:	97,2	1.584,7	157,8	1.839,7	12,1	19,5			222,2	2.093,5
Transformatie output:	38,1	1.575,8	10,5	1.624,4			176,3	26,7		1.827,4
Eigenverbruik transformatiesector:					2,5		13,1	7,2		102,5
Verliezen elektriciteitsnet:							9,3			9,3
<b>Finaal verbruik:</b>	<b>72,3</b>	<b>583,0</b>	<b>274,9</b>	<b>930,2</b>	<b>77,9</b>	<b>14,0</b>	<b>189,0</b>	<b>25,0</b>		<b>1.236,1</b>
* Niet-energetisch finaal verbruik:	8,5	249,7	33,2	291,4						291,4
* Energetisch finaal verbruik:	63,8	333,3	241,7	638,7	77,9	14,0	189,0	25,0		944,7
- Industrie:	57,5	17,3	95,4	170,3	76,5	6,4	97,5	21,7		372,3
- Residentieel en andere:	6,2	130,8	144,3	281,4	1,5	5,4	88,6	3,3		380,2
- Transport:		185,2	1,9	187,0		2,2	2,9			192,2

Energiebalans Vlaanderen 2007 (VITO, 2008b)

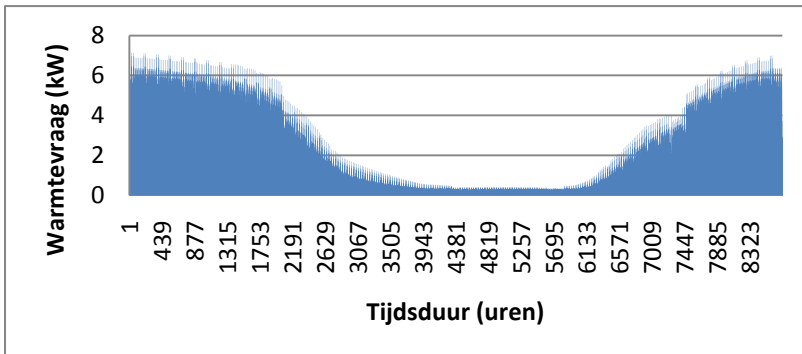
[PJ]	Kolen	Olie	Gas	Fossiele brandstoffen	Andere brandstoffen	Biomassa	Elektriciteit	Warmte	Nucleaire energie	TOTAAL
Primaire produktie					85,5	29,2	1,0	5,8		121,5
Netto invoer	143,0	1.099,6	420,9	1.663,4			24,7		246,3	1.934,4
Internationale Bunkers		446,2		446,2						446,2
<b>Bruto binnenlands verbruik:</b>	<b>143,0</b>	<b>653,4</b>	<b>420,9</b>	<b>1.217,2</b>	<b>85,5</b>	<b>29,2</b>	<b>25,7</b>	<b>5,8</b>	<b>246,3</b>	<b>1.609,8</b>
Transformatie input:	106,2	1.646,8	159,4	1.912,5	9,7	16,3			246,3	2.184,8
Transformatie output:	38,7	1.610,2	10,6	1.659,6			187,8	24,1		1.871,4
Eigenverbruik transformatiesector:		65,1	8,8	73,9	2,8		13,7	6,9		97,3
Verliezen elektriciteitsnet:							9,4			9,4
<b>Finaal verbruik:</b>	<b>75,5</b>	<b>551,7</b>	<b>263,3</b>	<b>890,5</b>	<b>72,9</b>	<b>12,9</b>	<b>190,3</b>	<b>23,0</b>		<b>1.189,6</b>
* Niet-energetisch finaal verbruik:	8,4	222,8	33,0	264,2						264,2
* Energetisch finaal verbruik:	67,1	328,9	230,2	626,2	72,9	12,9	190,3	23,0		925,4
- Industrie:	61,3	24,3	97,3	183,0	71,5	6,3	99,9	19,4		380,1
- Residentieel en andere:	5,7	120,8	131,0	257,6	1,5	4,6	87,6	3,6		354,8
- Transport:		183,8	1,9	185,7		2,0	2,8			190,4

**BIJLAGE 2: SYNTHETISCH LASTPROFIEL AARDGAS**

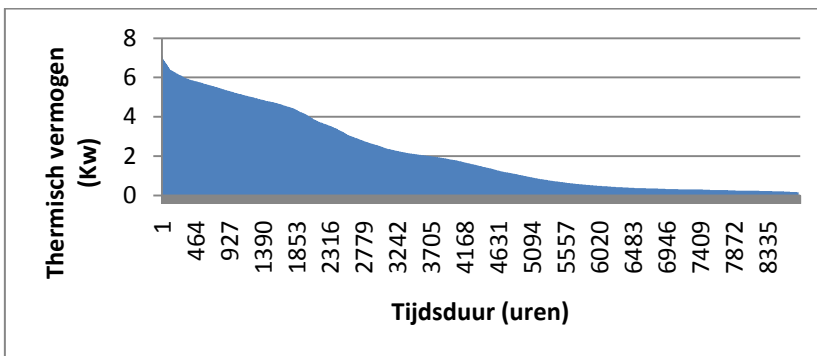
Year	Month	Day	H	From	To	Procentuele warmtevraag
2010	1	1	6	01/01/2010 06:00	01/01/2010 07:00	0,0002791071
2010	1	1	7	01/01/2010 07:00	01/01/2010 08:00	0,0003302789
2010	1	1	8	01/01/2010 08:00	01/01/2010 09:00	0,0003413037
2010	1	1	9	01/01/2010 09:00	01/01/2010 10:00	0,0003437418
2010	1	1	10	01/01/2010 10:00	01/01/2010 11:00	0,0003260778
2010	1	1	11	01/01/2010 11:00	01/01/2010 12:00	0,0003102570
2010	1	1	12	01/01/2010 12:00	01/01/2010 13:00	0,0002979859
2010	1	1	13	01/01/2010 13:00	01/01/2010 14:00	0,0002837323
2010	1	1	14	01/01/2010 14:00	01/01/2010 15:00	0,0002781672
2010	1	1	15	01/01/2010 15:00	01/01/2010 16:00	0,0002859037
2010	1	1	16	01/01/2010 16:00	01/01/2010 17:00	0,0003088567
2010	1	1	17	01/01/2010 17:00	01/01/2010 18:00	0,0003163422
2010	1	1	18	01/01/2010 18:00	01/01/2010 19:00	0,0003073014
2010	1	1	19	01/01/2010 19:00	01/01/2010 20:00	0,0002942716
2010	1	1	20	01/01/2010 20:00	01/01/2010 21:00	0,0002819565
2010	1	1	21	01/01/2010 21:00	01/01/2010 22:00	0,0002570777
2010	1	1	22	01/01/2010 22:00	01/01/2010 23:00	0,0002021425
2010	1	1	23	01/01/2010 23:00	02/01/2010 00:00	0,0001508437
2010	1	2	0	02/01/2010 00:00	02/01/2010 01:00	0,0001272310
2010	1	2	1	02/01/2010 01:00	02/01/2010 02:00	0,0001191070
2010	1	2	2	02/01/2010 02:00	02/01/2010 03:00	0,0001162812
2010	1	2	3	02/01/2010 03:00	02/01/2010 04:00	0,0001183295
2010	1	2	4	02/01/2010 04:00	02/01/2010 05:00	0,0001289411
2010	1	2	5	02/01/2010 05:00	02/01/2010 06:00	0,0001577416
2010	1	2	6	02/01/2010 06:00	02/01/2010 07:00	0,0002389119
2010	1	2	7	02/01/2010 07:00	02/01/2010 08:00	0,0003358499
2010	1	2	8	02/01/2010 08:00	02/01/2010 09:00	0,0003784218
2010	1	2	9	02/01/2010 09:00	02/01/2010 10:00	0,0003695882
2010	1	2	10	02/01/2010 10:00	02/01/2010 11:00	0,0003428599
2010	1	2	11	02/01/2010 11:00	02/01/2010 12:00	0,0003160884
2010	1	2	12	02/01/2010 12:00	02/01/2010 13:00	0,0002992620
2010	1	2	13	02/01/2010 13:00	02/01/2010 14:00	0,0002809774
2010	1	2	14	02/01/2010 14:00	02/01/2010 15:00	0,0002713945
2010	1	2	15	02/01/2010 15:00	02/01/2010 16:00	0,0002756494
2010	1	2	16	02/01/2010 16:00	02/01/2010 17:00	0,0002995317
2010	1	2	17	02/01/2010 17:00	02/01/2010 18:00	0,0003179404
2010	1	2	18	02/01/2010 18:00	02/01/2010 19:00	0,0003126143
2010	1	2	19	02/01/2010 19:00	02/01/2010 20:00	0,0002992064
2010	1	2	20	02/01/2010 20:00	02/01/2010 21:00	0,0002845989
2010	1	2	21	02/01/2010 21:00	02/01/2010 22:00	0,0002589798
2010	1	2	22	02/01/2010 22:00	02/01/2010 23:00	0,0002017370
2010	1	2	23	02/01/2010 23:00	03/01/2010 00:00	0,0001468350
2010	1	3	0	03/01/2010 00:00	03/01/2010 01:00	0,0001222254

### BIJLAGE 3: OPSTELLING JBDC MET GROOTST MOGELIJKE RECHTHOEK

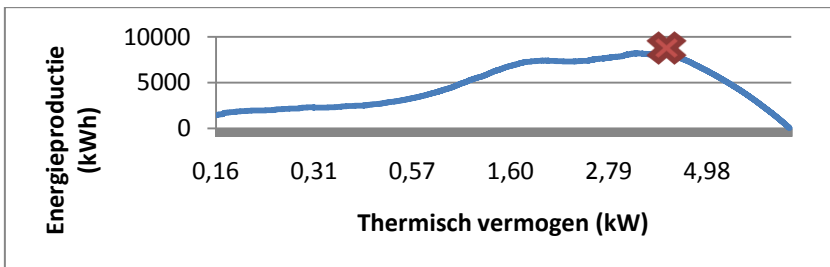
Stap 1: Jaarlijks warmtevraagprofiel



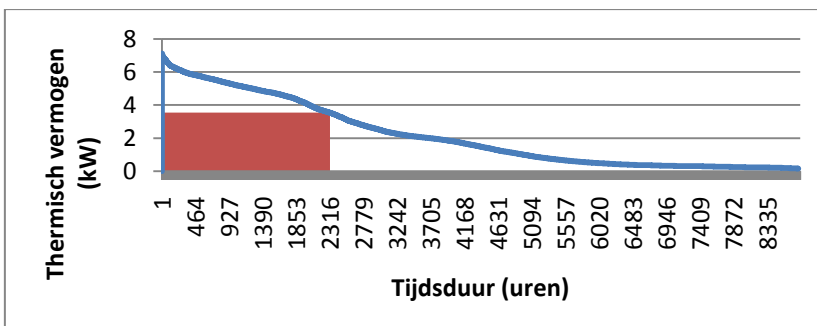
Stap 2: JBDC op basis van de warmtevraag



Stap 3: Productiecurve



Stap 4: JBDC met grootst mogelijke rechthoek





## Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

**Microwarmtekrachtkoppeling ( $\mu$ WKK) in private woningen. Een economische, ecologische en energetische analyse**

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur-technologie-, innovatie- en milieumanagement**

Jaar: **2010**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

**De Cleene, Tine**

Datum: **3/06/2010**